БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ФАКУЛЬТЕТ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ 62-Й НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ АСПИРАНТОВ, МАГИСТРАНТОВ И СТУДЕНТОВ БГУИР

МИНСК 2026

Комиссия конференции:

Ульянов Николай Николаевич — декан ФКСиС, кандидат технических наук, доцент, председатель комиссии по организации и проведению конференции «Компьютерные системы и сети»;

Русин Виталий Геннадьевич — заместитель декана ФКСиС.

Голда Ольга Алексеевна — кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой ПОИТ.

Григорьев Александр Александрович — кандидат физико-математических наук доцент, заведующий кафедрой физики.

Малыхина Галина Ивановна — кандидат философских наук, доцент, заведующая кафедрой философии.

Сиротко Сергей Иванович — кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой информатики.

Никульшин Борис Викторович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ЭВМ.

Азаров Илья Сергеевич — доктор технических наук, заведующий кафедрой ВВС.

Князюк Наталья Владимировна— кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой Высшей Математики.

Деменковец Денис Викторович — старший преподаватель кафедры ПОИТ, зам. декана по научной работе ФКСиС, ответственный за подготовку, выпуск программы электронного сборника тезисов докладов конференции «Компьютерные системы и сети».

В сборнике опубликованы материалы докладов, представленных на 62-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР по направлению «Компьютерные системы и сети». Авторами рассматриваются вопросы имитационного моделирования, численных методов, новых информационных технологий в образовании, радиоэлектронике, телекоммуникациях, вычислительных сетях, а также возможности современных систем автоматизированного проектирования.

Материалы одобрены оргкомитетом и публикуются с учетом того, что авторская позиция и стилистические особенности публикаций полностью сохранены при соблюдении требований к оформлению.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области электронных систем и технологий, а также будет полезен научным и инженерно-техническим работникам, преподавателям, аспирантам, магистрантам и студентам технических специальностей.

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2026

СЕКЦИЯ 1

«ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СЕГМЕНТАЦИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АРХИТЕКТУРЫ U-NET ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ КАНАЛЬНОСТИ
Ерофеев В.С *22*

ИССЛЕДОВАНИЕ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПАТТЕРНОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ "РАЗРАБОТЧИК – ИИ-АССИСТЕНТ" ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА НАПИСАНИЯ, РЕФАКТОРИНГА И ОТЛАДКИ КОДА
Бочаров А.Н *26*

РАЗРАБОТКА СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ГРУЗОВЫХ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ НА ЗАМКНУТОМ ПУТИ
Машков И.А *31*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ
Хотеновская В.С., Шахлан П.С *35*

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТОКОЛОВ HTTP И ИХ ВЛИЯНИЕ НА АЛГОРИТМЫ И ПАТТЕРНЫ РАЗРАБОТКИ СЕТЕВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ
Кравчук К. А., Лукьянов Д. Д., Лазакович А. А *40*

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ MULTILINGUAL BERT НА ПРИМЕРЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ НОВОСТЕЙ
Шагун Д.В *43*

АРХИТЕКТУРА ИИ-АГЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MCP И RAG ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ
Хорошун Н.А *45*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ ПОЧТОВЫХ ОТПРАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ
Можейко Д.О., Мынзул А.Э *46*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ: МЕТОДЫ ВЕРИФИКАЦИИ И СНИЖЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ РИСКОВ
Григоренко Б.С., Кохнюк К.А *47*

КРОСС-ПЛАТФОРМЕННОЕ МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЯМИ
Савинич Т.М *49*

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИМИ ПРОЦЕССАМИ СЕТИ РЕСТОРАНОВ
Золотницкий А.А *52*

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ И БЛОКЧЕЙН В УПРАВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНЫМ АВТОМОБИЛЕМ
Селезнёв А.И *53*

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА ПОИСКА ОБЪЕКТОВ НА ВИДЕО С ПОМОЩЬЮ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД
Мальченко А.Е., Шапутько А.Е *56*

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ DEEPLABV3+
Антоненко А.В *58*

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ ДОКУМЕНТАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ
Демидович Р.С *59*

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ПОИСКА МЕЛОДИИ ПО НАПЕВУ
Каминский А.В *60*

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ В ЗАДАЧЕ SLAM
Феденков К. К *62*

СИСТЕМА УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА УЗЛОВ СЕТИ
Слинько А.Г *64*

СОБЫТИЙНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ТУРИСТИЧЕСКИХ ЛОКАЦИЙ НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ И ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
Бакунович Н.А *65*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ELECTRE I, II И III ПРИ ВЫБОРЕ ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ
Вабищевич А.С., Василёнок М.В., Михайлов К.В., Савич А.С., Якубовская А.А *66*

СЕКЦИЯ 2

«ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ ПЛАТФОРМ И БАЛАНСИРОВОЧНЫХ ДИСКОВ В ДИАГНОСТИКЕ НАРУШЕНИЙ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
Глушаченко Н.С., Деменковец Д.В *69*

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСИРОВКИ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ
Потёмин И.В. *73*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ В МНОГОПОТОЧНОМ TCP-СЕРВЕРЕ НА JAVA ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ HIBERNATE
Толстик А.С., Герасимович А.Ю.,Скворец И.С *80*

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ «СОЦИАЛЬНАЯ СЕТЬ»
Алесина А.Е *83*

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПРОФИЛЕЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ МЕЖДУ ПРОВАЙДЕРОМ KEYCLOAK IAM И РЕЛЯЦИОННОЙ БАЗОЙ ДАННЫХ В SPRING-ПРИЛОЖЕНИИ
Войтов А.В *84*

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ СРЕДСТВО МИКРОПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕСТИРОВАНИЕМ ПАМЯТИ
Головин Е.С *85*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА АУДИО-ВИДЕО КОНФЕРЕНЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ GOLANG
Гридюшко Б.О. *87*

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО УЧЁТА И АНАЛИЗА МУЗЕЙНЫХ КОЛЛЕКЦИЙ ПРЕДМЕТОВ АРХЕОЛОГИИ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ .NET
Гуща А.С *89*

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА В КАЧЕСТВЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО МОНИТОРА
Дадуш М.С *91*

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАНЯТОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ ПО ДАННЫМ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ
Жук Я.С *93*

УПРАВЛЕНИЕ ПУЛОМ СОЕДИНЕНИЙ И МАРШРУТИЗАЦИЯ ЗАПРОСОВ В POSTGRESQL
Киселёв А.С *95*

СПОСОБЫ ДОСТАВКИ КОРПОРАТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ
Клезович О.С *97*

АРХИТЕКТУРНЫЕ ПОДХОДЫ К ОБРАБОТКЕ АСИНХРОННЫХ ОПЕРАЦИЙ В СРЕДАХ ВЫПОЛНЕНИЯ NODE.JS И BUN
Короткая М.Д *98*

ПРИМЕНЕНИЕ ПАТТЕРНОВ «ЧИСТОЙ» АРХИТЕКТУРЫ И РЕАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯМИ В РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ АГРЕГАТОРОВ ДАННЫХ
Крутько А.А *100*

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ
Кулик М.И *102*
ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ПРОВЕДЕНИЯ И ЖЕРЕБЬЕВКИ СПОРТИВНЫХ ТУРНИРОВ
Лапусь В.А *104*
API ДЛЯ РАБОТЫ С ПОДКАСТАМИ
Лысяков И.С *105*
АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
Марковский И.М *106*
РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЧАСТНОЙ СЕТИ УДАЛЕННОГО ДОСТУПА
Мисюль В.С *108*
СПОСОБ ГЕЙМИФИКАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ НА ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ИНТЕРФЕЙСА ВВОДА
Рачинская А.С., Евсеенко Е.С *110*
ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ДЕТЕКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯ ESP32-CAM
Русакович Е.С. *112*
ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО СОЗДАНИЯ, РЕДАКТИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕДУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ГРАФИЧЕСКОГО API VULKAN
Сазонов А.В *114*
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ СООБЩЕСТВА ВЛАДЕЛЬЦЕВ ДОМАШНИХ ЖИВОТНЫХ
Стасевич Ю.М *116*
ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО КОДА КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРЫ АППАРАТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ
Трубач К.И *117*
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СКЛАДСКОГО УЧЁТА И ЭЛЕКТРОННОГО ТОВАРНОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА НА ТОРГОВОМ ПРЕДПРИЯТИИ
Убоженко М.А *119*
РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРООБУЧЕНИЯ И МОДУЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ МАТЕРИАЛОВ
Устинович М.А *121*
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФИНАНСОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И СОЦИАЛЬНОЙ КООРДИНАЦИИ НА БАЗЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КАТАЛОГИЗАЦИИ ПЛАНИРУЕМЫХ ПОКУПОК
Хомельянская К.В *122*
ИМИТАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИХ ПОЛЕТЕ В ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ
Януцевич Д.В *124*

СЕКЦИЯ 3

«ИНФОРМАТИКА»

ИНТЕГРАЦИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АРХИТЕКТУРУ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ
Славинский Г.А *127*

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ФНФ НА КОНФИГУРИРУЕМЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ОСЦИЛЛЯТОРАХ
Бурко Л.А *130*

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ВОЛАТИЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ И СКАЧКОВ
Круговой В.Н *135*

РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНТЕЙНЕРИЗАЦИИ И АСИНХРОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗАДАЧ
Худницкий А.В *139*

СИСТЕМЫ ИТЕРИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПОЛЯЦИИ
Савинов А.В., Авраменко Р.А *142*

РАСШИРЕНИЕ КОНТЕКСТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПОСРЕДСТВОМ ПРОТОКОЛА MODEL CONTEXT PROTOCOL (MCP)
Маслаков С. А *149*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОПУЛЯРНЫХ РЕЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
Бахмат А.М *153*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ МЕТОДА ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА НА МОДЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЯХ
Ануфриева Е.В *156*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ: ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОРАНГОВОЙ СТРУКТУРЫ ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА
Венско В.В., Якуть А.Ю. *162*

ЧИСЛЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МЕТОДОВ ИНТЕГРИРОВАНИЯ В КОМПЬЮТЕРНЫХ ИГРАХ
Визгин А.П., Финевич А.В *168*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФЕКЦИОННОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ С УЧЕТОМ ВАКЦИНАЦИИ И СОЦИАЛЬНОЙ УСТАЛОСТИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ SIR
Вирбал А.Е., Турчук А.А *173*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИИ КРОСС-ЭНТРОПИИ
Гладкая Н.Н. *179*

СВОЙСТВА ОГИБАЮЩИХ СЕМЕЙСТВА КРИВЫХ
Лопата Д.А *184*

ГЕНЕРАЦИЯ МУЗЫКИ С ПОМОЩЬЮ L –СИСТЕМ
Кузьмицкий М.С., Сарело Е.К *193*

АППРОКСИМАЦИЯ СУММОЙ ЭКСПОНЕНТ ДЛЯ НЕЯВНО ЗАДАННОЙ ФУНКЦИИ
Арещенко М.С., Луканский Д.Н., Хадорик М.Д *198*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
Василенко Д.В., Халамов Н.А *205*

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ГЕЙМИФИКАЦИИ
Печерский М. Д *210*

КРИВЫЕ И ПОВЕРХНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА
Яковук Н.В *214*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЛАКТИК И КЛАСТЕРИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОЧЕЧНЫХ ПРОЦЕССОВ
Скробот Д.А *221*

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИГРОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИГРОВЫХ СТРАТЕГИЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО
Ярцев А.А *225*

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПАРОЛЕЙ К ЦЕЛЕВОМУ ПОДБОРУ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ ЦИФРОВОГО ПРОФИЛЯ
Живица Н.А., Мазепин Я.Д., Гормаш П.Е *231*

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА A* И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ
Тюшкевич Ф.И *238*

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КОЖИ ЛИЦА И ГЛАЗ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ
Михалко А.Н., Филон Д.А *240*

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ОТ АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ К АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМАМ
Косяков М.М *242*

ИНТЕЛЛЕКТУРАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ КОНДИТЕРСКОЙ НА ОСНОВЕ ТЕГОВ И СЕМАНТИЧЕСКИХ ЭМБЕДДИНГОВ
Рысник А.В *244*

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЛИЧНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЕЙМИФИКАЦИИ И АНАЛИЗА БИОРИТМОВ
Таргонский Д.А *245*

АРХИТЕКТУРА NON-AUTOREGRESSIVE СИНТЕЗА РЕЧИ С CTC-ВЫРАВНИВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ДВУХЭТАПНОГО ПАЙПЛАЙНА
Бекарев С.С *247*

АЛГОРИТМЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В КООПЕРАТИВНО-СОРЕВНОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ
Гулис А.А *249*

ЭМОЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ КНИГОТОРГОВЛИ С ИНТЕГРАЦИЕЙ AI-АНАЛИЗА ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ
Жгутов Е.Д *251*

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЛЮКОЗО-ИНСУЛИНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ДИАБЕТЕ ПЕРВОГО ТИПА
Лишик К.Я *253*

СЕРВИС ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ АВТОМОБИЛЯ И ОЦЕНКИ ЕГО СТОИМОСТИ
Артиш В.О *254*

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АССИСТЕНТ КОД-РЕВЬЮ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ В PULL REQUEST
Поборцева У.С *255*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОДНОСТОРОННЕГО ДОМИНИРОВАНИЯ С ЗАПРЕТАМИ
Политанский А.И *257*

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ПО УЧЕТУ И КОНТРОЛЮ ТОВАРНО-МАТЕРИАЛЬНЫХ ЦЕННОСТЕЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ
Петровский В.В *259*
ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ГЕНЕРАТИВНОГО ИИ НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
Клемятенко П.В *260*
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТУРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВКУСОВЫХ И КУЛЬТУРНЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ
Махвееня К.Е *262*
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ФРИЛАНС ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ
Рабец И.О *263*
АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИРОВАННЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ
Красёв П.А *264*
СКВОЗНОЙ БЕНЧМАРКИНГ ML-СТЕКА: ОТ PYTHON-БЭКЕНДА ДО JS-ФРОНТЕНДА В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
Бурчук Д.А., Ясев А.И *266*

СЕКЦИЯ 4

«ВСТРАИВАЕМЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ»

ПРИМЕНЕНИЕ LSTM МОДЕЛЕЙ С МЕХАНИЗМОМ ВНИМАНИЯ И ОСТАТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ ДЛЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ЭМОЦИЙ В РЕЧИ
Краснопрошин Д.В. *269*

АЛГОРИТМ МИНИМИЗАЦИИ АРТЕФАКТОВ В МНОГОМЕРНЫХ GAN-АРХИТЕКТУРАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИТЕРАТИВНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБОРОК
Ковбаса Г.А *272*

IP-КОМПОНЕНТ КОНВЕЙЕРНОГО УСКОРИТЕЛЯ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СНК СЕРИИ ZYNQ-7000
Осипов А.С *275*

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ
Ерамкович В.А *278*

СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ТРАНСФОРМЕРНОГО ТИПА
Зубрицкая Е.И. *284*

СИНТЕЗАТОР ЗВУКА ГИТАРНОЙ СТРУНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА КАРПЛУСА-СТРОНГА НА БАЗЕ ПЛИС
Тондель Д.А *289*

СИСТЕМА МНОГОКАНАЛЬНОЙ АУДИОЗАПИСИ НА БАЗЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ STM32
Субботенко О.Р *294*

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АНАЛИЗА ГОЛОСОВЫХ И РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
Субботенко О.Р *296*

УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
Андруконис М.В *298*

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ХОДОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ НА БАЗЕ ИНТЕРФЕЙСА CAN
Варицкий М.К *299*

СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ НА БАЗЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА LUCKFOX PICO
Шендик Д.В *301*

СВЕТОВОЙ МЕЧ НА БАЗЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO
Лобацевич С.С *303*

СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА БАЗЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ESP32 LYRA
Лобацевич С.С *305*

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИНТЕЗАТОРА МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ
Лавинецкая П.В., Протасевич А.В., Бельский К.Ю. *307*

АКУСТИЧЕСКИЙ МОДЕМ: ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Падневич Д.С *309*

СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦИФРОВОГО КАНАЛА РЕЧЕВОЙ СВЯЗИ
Вашкевич И.А *311*

СБОРКА ИГРОВОГО ДВИЖКА ДЛЯ ОС WINDOWS 95
Вашкевич И.А *313*

АКУСТИЧЕСКИЙ МОДЕМ: КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПА МОДУЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Бирицкий В.П *315*

АКУСТИЧЕСКИЙ МОДЕМ: КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Масколенко Г.А *317*

СЧЁТЧИК ПОСЕТИТЕЛЕЙ МАГАЗИНА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА
Королёв М. А., Шахновский С. А *319*

ШУМОМЕР НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА
Калашников А.О., Нечай Г.И., Кислицкий А.И *321*

СЕКЦИЯ 5

«ВЫСШАЯ МАТЕМАТИКА»

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR AUTOMATIC GENERATION OF MATHEMATICAL PROBLEMS
Stepanov D.E *323*

ПРОГНОЗИРУЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОТОПЛЕНИЕМ
Асимова С.Р., Емельянчиков М.Ю *331*

АНАЛИЗ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ В КОНТЕКСТЕ SVM
Березина С.В., Романов Д.А *336*

ОБЫКНОВЕННЫЕ ДИФФЕПЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ КАК МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ВРЕМЕНИ
Богуш Р.Д.; Телипко Д.А.; Доценко Е.В. *344*

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КРИПТОГРАФИИ: ПРИМЕНЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФИБОНАЧЧИ
Болбас К.В., Филипова А.Д *351*

ПРИМЕНЕНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ И КОСИНУСНОЙ МЕРЫ В РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМАХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ
Бугаёв П. А., Стрелко А. А *355*

МАГНИТОПОДОБНАЯ МОДЕЛЬ ХЕМОТАКСИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ У МУРАВЬЁВ
Волколовский М.Д.; Мацур И.Н *362*

A VECTOR ALGEBRA PERSPECTIVE ON DATA DIMENSIONALITY REDUCTION
Harbar A.E *367*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭПИДЕМИЙ: РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ КОМПАРТМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В МОБИЛЬНОМ ПРИЛОЖЕНИИ «EPIDEMICLAB»
Железняков А.М., Смаловская А.В *371*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ (SIR-МОДЕЛЬ)
Житко Р.В *375*

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В КРИПТОГРАФИИ: ОТ АЛГОРИТМОВ ЕВКЛИДА ДО RSA
Кардаш Д.О., Гук Н.И., Пархонюк М.П *378*

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СХОДИМОСТИ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СЛАУ
Кондратова У. О., Болбас К. В *382*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОПОЛОС ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ
Король А.В., Павлова М.Д *385*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ФУНКЦИИ ПОЛЕЗНОСТИ
Красикова О. В, Михед А. В *390*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА И СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАДАЧ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ЛОГИСТИКИ
Кудан Т.А., Манько А.А *394*

ЭВОЛЮЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И ПОСТОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ
Медюха А.Е., Левоненко Ю.И *398*

ГРАФЫ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЙ
Литвинович М.О., Вольский Г.В *403*

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ В НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ
Ляшко М.С., Гурина Т.Д *407*

МАТЕМАТИКА ВЫБОРОВ
Малащенко В.Д *413*

ПОРОЖДАЕМОСТЬ ТОПОЛОГИИ ЕВКЛИДОВА ПРОСТРАНСТВА ОТНОШЕНИЯМИ ЧАСТИЧНЫХ ПОРЯДКОВ
Пархонюк М.П *417*

ОПТИМАЛЬНОСТЬ ПРОФИЛЯ ЗУБА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЬВЕНТЫ И ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ КРИВЫХ
Савицкая А.Б., Романчук Е.В. *421*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПРЕДЕЛЁННОГО ИНТЕГРАЛА И ДИСКРЕТНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ
Солодовников Е.А., Рыжков М.А *425*

ГРАДИЕНТНЫЙ СПУСК И МЕТОДЫ ЕГО ОПТИМИЗАЦИИ
Сороколетов А.А., Блышко Н.В *430*

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАТРИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ML
Булавин К.С, Степченков Р.О *433*

СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ И ЕГО ПРИКЛАДНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ
Терёхин Б.В., Гайдук Н.И., Мухин З.С *437*

ИДЕАЛЬНАЯ КРИПТОСИСТЕМА. ШИФР ВЕРНАМА
Ципко А.И *443*

ТЕОРЕМА ПИФАГОРА В ЭКОНОМИКЕ: ИНТЕРАКТИВНАЯ ГОЛОВОЛОМКА КАК МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕСУРСНЫХ ЗАТРАТ
Чой А.К., Жибрик А.В *448*

ПРИМЕНЕНИЕ РЯДОВ ФУРЬЕ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА К ВЫЯВЛЕНИЮ ЦИКЛИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НА КРИПТОВАЛЮТНОМ РЫНКЕ
Плехов М.К., Чумак А.П *452*

СВОЙСТВА ФУНКЦИЙ, ДОПУСКАЮЩИХ РАЗРЫВЫ ПЕРВОГО РОДА
Берговин С.А., Юркевич Д.А *459*

МАТЕМАТИКА РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ
Гомонов М.А., Васильев А.М *464*

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЦВЕТНИК «РОЗЫ ГВИДО ГРАНДИ»
Задонцева С.И., Насевич Д.Р *466*

ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ: МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БИФУРКАЦИЙ И МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ПУЗЫРЯ
Камоцкая З., Габрияник А *471*

СХОДИМОСТЬ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ: МЕТОД ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА В СРАВНЕНИИ С МЕТОДОМ НЬЮТОНА
Кахно А.А., Ступаков М.В *475*

ВЫЧИСЛЕНИЕ КРАТНЫХ ИНТЕГРАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО
Климук С.П., Кравченко В.С *477*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НАХОЖДЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ И СОБСТВЕННЫХ ВЕКТОРОВ МАТРИЦЫ: СТЕПЕННОЙ МЕТОД, МЕТОД ВРАЩЕНИЙ И QR-АЛГОРИТМ
Паскаль Д.А., Делендик Д.О *479*
ЭВОЛЮЦИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ МЕТОДОВ В ОБУЧЕНИИ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ
Яцук К.М., Пищ Т.Г *481*
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИЙ: ОПЫТ COVID-19
Асташонок Д. А., Рагозик Е. Е *483*

СЕКЦИЯ 6

«ФИЛОСОФИЯ И ЛОГИКА В КОНТЕКСТЕ ЦИФРОВОЙ КУЛЬТУРЫ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»

АВСТРИЙСКАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ШКОЛА В ЭПОХУ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
Глушаченко Н.С *489*

МНОГООБРАЗИЕ ФОРМ ПОЗНАНИЯ. СПЕЦИФИКА ФИЛОСОФСКОГО И НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ
Панфиленко Е.Д., Провлоцкая Д.В *491*

МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ФИЛОСОФСКИХ АСПЕКТОВ РЕКРУТИНГА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ
Гайсенок А.А *493*

ПРОБЛЕМА МЫШЛЕНИЯ В ЭПОХУ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И ФУНКЦИОНАЛИСТСКАЯ ПЕРСПЕКТИВА
Терешкова К.Д *496*

ГУМАНИТАРНЫЙ ИММУНИТЕТ КАК МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИКТ В НАУЧНОМ ПОЗНАНИИ
Степанец Е.В *498*

НАУКА КАК ВАЖНЕЙШАЯ ФОРМА ПОЗНАНИЯ. ФУНКЦИИ НАУКИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ
Провлоцкая Д.В, Панфиленко Е.Д *500*

НАРУШЕНИЕ ЗАКОНА ИСКЛЮЧЕННОГО ТРЕТЬЕГО В SOFTMAX-КЛАССИФИКАТОРАХ КАК СИСТЕМНАЯ ПРОБЛЕМА ЛОГИЧЕСКОЙ НЕПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ИИ
Охотенко А.Л *502*

ФИЛОСОФСКИЕ АСПЕКТЫ СОГЛАСИЯ НА ОБРАБОТКУ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ
Колесинский А.Д *505*

ЦИФРОВОЙ ФЕТИШИЗМ
Корото М.С *507*

ФИЛОСОФИЯ БОЛЬШИХ ДАННЫХ
Круговой В.Н *509*

ЭТИЧЕСКИЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ ИНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГА С ПОЗИЦИЙ УТИЛИТАРИЗМА И ДЕОНТОЛОГИИ
Курлович М.Н *512*

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В БГУИР: ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ
Черторицкий И. Г *516*

ПЕРСПЕКТИВЫ ЦЕННОСТНОЙ РЕВОЛЮЦИИ В КУЛЬТУРЕ XXI СТОЛЕТИЯ
Лебедевич А.В., Шушкевич Д.В *518*

ГИПОТЕЗА ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ГИПОТЕЗА СЕПИРА-УОРФА) В ПРОГРАММИРОВАНИИ
Попов А.А *520*

СТЕРЕОТИПЫ КАК МЕХАНИЗМ ИНСТИТУЦИОНАЛИЗАЦИИ ГЕНДЕРНОЙ СЕГРЕГАЦИИ В ОБЩЕСТВЕ
Покало К.А *523*

СЕМАНТИКА КАК КЛЮЧЕВОЙ КОМПОНЕНТ ЛОГИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ
Гомонов М.А., Малыхин И.В *525*

ПРОБЛЕМА МОРАЛЬНОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Доманькова В.В., Лащенко Н.А *527*

ЧТО «ЧУВСТВУЕТ» ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ?
Пометько Д.И *529*

ПЕРСПЕКТИВЫ И РИСКИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА
Говор Г.Г., Мухомедзянов Е.С *531*

ПРОБЛЕМА АНТРОПОГЕНЕЗА: ОЧЕВИДНОЕ-НЕВЕРОЯТНОЕ
Дорошкевич В.Д *533*

СОХРАНЕНИЕ ЛИЧНОСТНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ
Горбель А.А *536*

ФИЛОСОФИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ: РЕКЛАМА КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕННОСТНЫХ УСТАНОВОК ЛИЧНОСТИ
Ойслендер К.Э., Лазовская К.С *538*

СОЗНАНИЕ КАК ИЛЛЮЗИЯ: АНАЛИЗ АРГУМЕНТОВ ДЭНИЕЛА ДЕННЕТТА
Тихонович Д.Д., Рубинштейн Е.Ю *539*

ПРИМЕРЫ МАНИПУЛИРОВАНИЯ СОЗНАНИЕМ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ МАНИПУЛЯЦИЙ
Соловей Т.В., Лис А.А *540*

МОРАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО КРИЗИСА ДОВЕРИЯ
Селятыцкий С.С *542*

ПРОБЛЕМА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ
Тутин Н. В., Марудин А.А *544*

ЛОГИКА УСЛОВНЫХ ЗНАКОВ И МИФОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА СЛАВЯН
Печенев Е.О *546*

КОНЦЕПЦИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ДОГОВОРА: ОТ КЛАССИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ К СОВРЕМЕННЫМ ИНТЕРПРЕТАЦИЯМ
Евтухович А.С., Ловцевич А.Ю *548*

КОНФУЦИАНСКАЯ ЭТИКА В ЦИФРОВОЙ КОРПОРАТИВНОЙ КУЛЬТУРЕ
Грабовский А. К., Яцков А. А *550*

ФОРМИРОВАНИЕ ИДЕНТИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ: ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ
Дубровский П.И., Фатеев И.А *552*

ЦИФРОВОЕ МЫШЛЕНИЕ VS КРИТИЧЕСКОЕ: ПОЧЕМУ GOOGLE ДЕЛАЕТ НАС ГЛУПЕЕ
Апетёнок И.А *553*

ВЛИЯНИЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОГО ПОВЕДЕНИЯ И ТРЕВОЖНОСТИ У ЧЕЛОВЕКА
Родевич М.С *555*

ЗАКОНЫ ФОРМАЛЬНОЙ ЛОГИКИ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ
Ковалёв А.В *556*

ФЕНОМЕН ХИКИКОМОРИ В КОНТЕКСТЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО СПОСОБА БЫТИЯ
Ковчур П. Д., Житник А. Д *558*

ЗАКОНЫ ЛОГИКИ И АРГУМЕНТАЦИЯ В РЕКЛАМЕ
Воробьева К. В *559*

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА СВОБОДУ ЧЕЛОВЕКА В КОНТЕКСТЕ ТЕОРИИ ЗИГМУНДА ФРЕЙДА
Рязанова С.Е.....561

ФИЛОСОФИЯ ОБРАЗОВАНИЯ В ЭПОХУ ГЛОБАЛИЗАЦИИ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОБУЧЕНИЮ
Кравцова А.Б., Федорович А.Л.....563

ЭСТЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МУЗЫКАЛЬНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ: ПРОБЛЕМА ОБЪЕКТИВНОСТИ
Врублевский И. Е.....564

ПРОБЛЕМНОСТЬ КОНЦЕПЦИИ ТРАНСМИРОВОГО ТОЖДЕСТВА
Кумищо А.В.....566

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И СОВРЕМЕННОЕ ИСКУССТВО: ОТ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ДЕТЕРМИНИЗМА К РАСПРЕДЕЛЕННОМУ АВТОРСТВУ
Фролов М.А., Кузьмич Д.С.....568

ФИЛОСОФИЯ ПОСТПРАВДЫ: КАК МЫ МОЖЕМ ПЕРЕОСМЫСЛИТЬ ПОНЯТИЕ ИСТИНЫ В ЭПОХУ ФЕЙКОВЫХ НОВОСТЕЙ И МАНИПУЛЯЦИЙ ИНФОРМАЦИЕЙ
Полещук О.В., Ишеков А.М.....570

ДИПФЕЙК КАК СИМУЛЯКР: ФИЛОСОФСКИЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВОЙ ИЛЛЮЗИИ
Николащенко Е.А, Гладышева Д.А.....572

СОЦИАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУСТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
Микулин К.А.....574

САМОИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИЧНОСТИ КАК ПРОБЛЕМА СОВРЕМЕННОЙ СОЦИАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ
Москалькова А.Ю., Кухарёнок А.С.....576

ФИЛОСОФИЯ КОММУНИКАЦИИ И СОВРЕМЕННАЯ ЦИФРОВАЯ СРЕДА
Лаппо В. Д., Сосновская А. В.....577

АЛГОРИТМЫ, ВНИМАНИЕ И ИДЕНТИЧНОСТЬ: ФИЛОСОФСКИЙ ВЗГЛЯД НА ЦИФРОВОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ
Макей П.Ю.....579

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМЕ СОВРЕМЕННОГО НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ
Нгуен Хоанг Хиеп.....580

ТРАНСФОРМАЦИЯ МОРАЛЬНЫХ ЦЕННОСТЕЙ В ЭПОХУ ЦИФРОВИЗАЦИИ
Хартанович У.И., Хомич Н.М.....582

ФОРМИРОВАНИЕ ИДЕНТИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ИНДИВИДУАЛИЗАЦИИ И КУЛЬТУРЫ САМОПРЕЗЕНТАЦИИ
Чухонская К.А., Павлюткина М.С.....584

МЕТАБОЛИЗМ ДАННЫХ И АЛГОРИТМИТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ МАТТЕО ПАСКИНЕЛЛИ
Шимченко Р.В., Шоломицкий Д.И.....586

АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ДЕТЕРМИНИЗМ И ИЛЛЮЗИЯ СВОБОДЫ ВОЛИ: ЧЕЛОВЕК КАК ПРЕДСКАЗУЕМЫЙ МЕХАНИЗМ
Василевский В.В., Иосько М.А.....588

АНАЛИЗ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ РАЗРАБОТОК В БГУИР В КОНТЕКСТЕ ПЕРЕХОДА К ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКОМУ ЭТАПУ РАЗВИТИЯ НАУКИ
Черторицкий И. Г.....590

СЕКЦИЯ 7
«ФИЗИКА»

УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ
Диковицкая А.О.....593

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В СОВРЕМЕННЫХ СМАРТФОНАХ
Житникова Д.С., Зайцева С.В.....597

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛН НА ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ И ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА
Юргель Д.С., Ванченко А.Д 601

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПАКЕТЕ MATHCAD
Соловьёв А.Л 605

ЛАЗЕР КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ
Сакович А.П, Навицкая Т.В.....609

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ШТЕРНА-ГЕРЛАХА ДЛЯ СЛУЧАЯ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ КОНИЧЕСКОГО СОЛЕНОИДА В СРЕДЕ РАЗРАБОТКИ MATLAB
Семерник Р.Д.....613

ЦИФРОВОЙ МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ В ХОЛОДОВОЙ ЦЕПИ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ
Константинова Ю.С.....618

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДИФФУЗИИ
Константинова Ю.С.....622

АЭРОГЕЛИ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ
Гурин Е.Е., Демидко Н.А., Борис А.А.....625

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ НА СКОРОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ WI-FI
Страчинский А.Т., Зененко М.А 629

ЭКОУСТОЙЧИВЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ
Корниенко Н.А., Тимофеюк Д.К 633

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ
Кужель Д.А 637

ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА
Лобович А.А.....642

СОВРЕМЕННЫЕ ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
Богданович К.Д 646

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (ГРАФЕН, МЕТАМАТЕРИАЛЫ, КОМПОЗИТЫ) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ-ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
Жильский К.А., Жильский Н.А.....651

ОТКРЫТИЯ ПРОШЛОГО НА СТРАЖЕ НАСТОЯЩЕГО. КОНСТРУКЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЕЙ
Буйневич Д.А.....657

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТА ДВОЙНОЙ СЕТКИ
Поцелуев Р.С., Елинов Е.Д 661

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ВОЛОКОННЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА (MOS_2)
Теслёнок А.В *665*

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ (НА ПРИМЕРЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СВЕТОДИОДНЫХ СИСТЕМ)
Сериков М. А., Тищенко А.М *669*

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ 3D-МОДЕЛЕЙ ЛЁГКИХ ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ
Еськов И.С., Сивицкий Р.Д *674*

МЕМРИСТОРЫ: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ПРИМЕНЕНИЕ
Заяц И.Г., Отливщиков Ф.В *678*

КАПИЛЛЯРНОЕ САМОЗАЛЕЧИВАНИЕ В ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ПОКРЫТИЯХ: КИНЕТИКА ЗАПОЛНЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН НА ПРИМЕРЕ ЛАКОВ
Ребковец И.В *682*

КАК РАБОТАЕТ NFC? ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В БЕСКОНТАКТНЫХ ПЛАТЕЖАХ
Кузьмина А.А., Яровская И.А *686*

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
Штундер А.А *690*

ЁМКОСТНЫЙ ДАТЧИК ВЛАЖНОСТИ ИЗ ТЕКСТОЛИТА
Сахарчук Д.С., Басалай А.Н., Круглая К.П *695*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
Золотухина Д.И., Томчик А.А *700*

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЁТОК
Ясюкевич М.А., Евсюк А.В *704*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
Снопкова А.А., Ворожбицкий М.И *708*

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
Устимчук Р.В., Шубаба М.И *713*

ПРОЯВЛЕНИЯ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ: КРИВЫЕ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК И ОТКЛОНЕНИЕ СВЕТА
Гук Н.И, Пархонюк М.П *720*

СНИЖЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИПОКИНЕЗИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕЛОВЕКА ТЕРАПИЕЙ БИОУПРАВЛЯЕМЫМ УЛЬТРАЗВУКОМ
Климовец А.И., Китаёв И.А *722*

ГЕНЕРАЦИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КЛЮЧЕЙ НА ОСНОВЕ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ МАГНИТНОГО МАЯТНИКА
Кудан Т.А., Манько А.А *723*

ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
Пукало Д.А *725*

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ
Ахремчик А.А., Генюш Б.А *727*

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ
Клочко Е.С., Чеботарёва А.В *730*

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
Ангур А.П., Семёнов Т.В., Свириденко Р.А *731*

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ: ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Веремьёва Е. О *732*

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ ПАССИВНОГО РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
Левченко К.М., Королёнок В.И *734*

ЭВОЛЮЦИЯ КОНЦЕПЦИИ БЕЛЫХ ДЫР
Филичкин И. А *736*

ОБРАБОТКА И РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ НА КОЛЛАЙДЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
Пурус А.О., Голубев А.А., Дивас А.А *738*

ФИЗИКА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ДИСПЛЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
Доронин Д.С *740*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СУХОМ И ВЛАЖНОМ СОСТОЯНИЯХ
Кускова В.А., Андрушкевич Э.В *742*

СЕКЦИЯ 1
«ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ»

УДК 004.932.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СЕГМЕНТАЦИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АРХИТЕКТУРЫ U-NET ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ КАНАЛЬНОСТИ

Ерофеев В.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Перцев Д.Ю. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В работе проводится исследование влияния количества каналов входных изображений на результат сегментации и вычислительную эффективность нейронной сети U-Net. Экспериментальные результаты показывают, что использование RGB-изображений обеспечивает улучшение качества сегментации и более высокую вычислительную эффективность, несмотря на увеличение объёма входных данных.

Ключевые слова. Семантическая сегментация, U-Net, нейронные сети, обнаружение объектов, нагрузочное тестирование, GPU.

Семантическая сегментация – важная задача компьютерного зрения, для решения которой широко применяется модель U-Net [1]. Одним из факторов, влияющих на качество сегментации и вычислительную эффективность, является число каналов входного изображения. Увеличение числа каналов потенциально позволяет модели извлекать более информативные признаки, однако одновременно повышает вычислительную сложность обработки данных.

В экспериментах использовалась архитектура U-Net с одинаковыми гиперпараметрами обучения. Изменялся только размер входного тензора: в первой конфигурации применялись изображения в градациях серого (1 канал), во второй – RGB-изображения (3 канала). Обучение выполнялось на одном и том же наборе данных.

Эксперименты проводились с использованием графического ускорителя NVIDIA Tesla T4 с объёмом видеопамяти 16 ГБ. В качестве центрального процессора использовался Intel Xeon с тактовой частотой 2,00 ГГц. Объём оперативной памяти составлял 12 ГБ. Все эксперименты проводились в одинаковых вычислительных условиях без изменения аппаратной конфигурации, что обеспечивало корректность и сопоставимость результатов сравнительного анализа моделей.

Для оценки качества сегментации использовались метрики Dice Loss, характеризующая степень перекрытия масок, F1-score – гармоническое среднее precision и recall, а также Intersection over Union (IoU), определяющая отношение площади пересечения предсказанной и истинной областей к площади их объединения.

Использование нескольких метрик позволяет комплексно оценить качество сегментации, учитывая как полноту обнаружения объектов, так и точность локализации их границ.

Тестирование моделей проводилось на данных, которые ранее не использовались в обучении, для объективности оценки качества сегментации. Результаты тестирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты тестирования моделей

Метрика	Одноканальная модель	Трехканальная модель
Dice Loss	**0,055**	**0,032**
F1-score	**0,949**	**0,970**
IoU	**0,911**	**0,946**

Сравнительный анализ показывает, что переход к RGB-данным привёл к снижению Dice Loss на 41,8%, увеличению F1-score на 2,1% и росту IoU на 3,5%. Это подтверждает, что цветовые признаки улучшают качество сегментации и точность выделения объектов.

Нагрузочное тестирование проводилось с batch size от 1 до 64. Измерялись общее время выполнения, время прямого прохода (forward time), накладные расходы (overhead), пропускная способность (throughput), загрузка CPU и GPU, а также использование памяти.

Результаты нагрузочного тестирования для одноканальных и трехканальных-изображений показаны в таблицах 2 и 3, а также на рисунках 1 и 2.

Результаты демонстрируют, что увеличение batch size улучшает пропускную способность и эффективность использования ресурсов, при этом RGB-данные позволяют достичь более высокой производительности по сравнению с одноканальными изображениями. Несмотря на то, что число входных каналов увеличилось в три раза, модель с RGB-данными показала большую пропускную способность. Это объясняется особенностями работы современных графических процессоров.

Таблица 2 – Результаты нагрузочного тестирования одноканальной модели

Batch Size	1	2	4	8	16	32	64
Iterations	1024	512	256	128	64	32	16
Total Time (s)	9,38	8,22	7,96	7,85	7,10	7,14	7,23
Forward Time (s)	5,83	2,80	1,43	0,81	0,40	0,51	0,20
Overhead (s)	3,55	5,42	6,54	7,04	6,70	6,62	7,03
Throughput (image/s)	175,68	365,72	717,34	1270,99	2560,75	1989,77	5173,35
Throughput (TB/day)	4,1280	8,5935	16,8556	29,8648	60,1709	46,7545	121,5603
CPU Load (%)	49,504	49,435	49,316	49,250	49,197	48,445	46,463
CPU Mem Used (MB)	1429,3	6739,2	8365,4	8060,3	7431,5	7168,5	7106,0
GPU Load (%)	89,91	95,73	96,79	96,74	95,91	99,38	93,75
GPU Mem Used (MB)	844,19	1046,19	1440,19	2216,19	3848,19	7100,19	13592,19

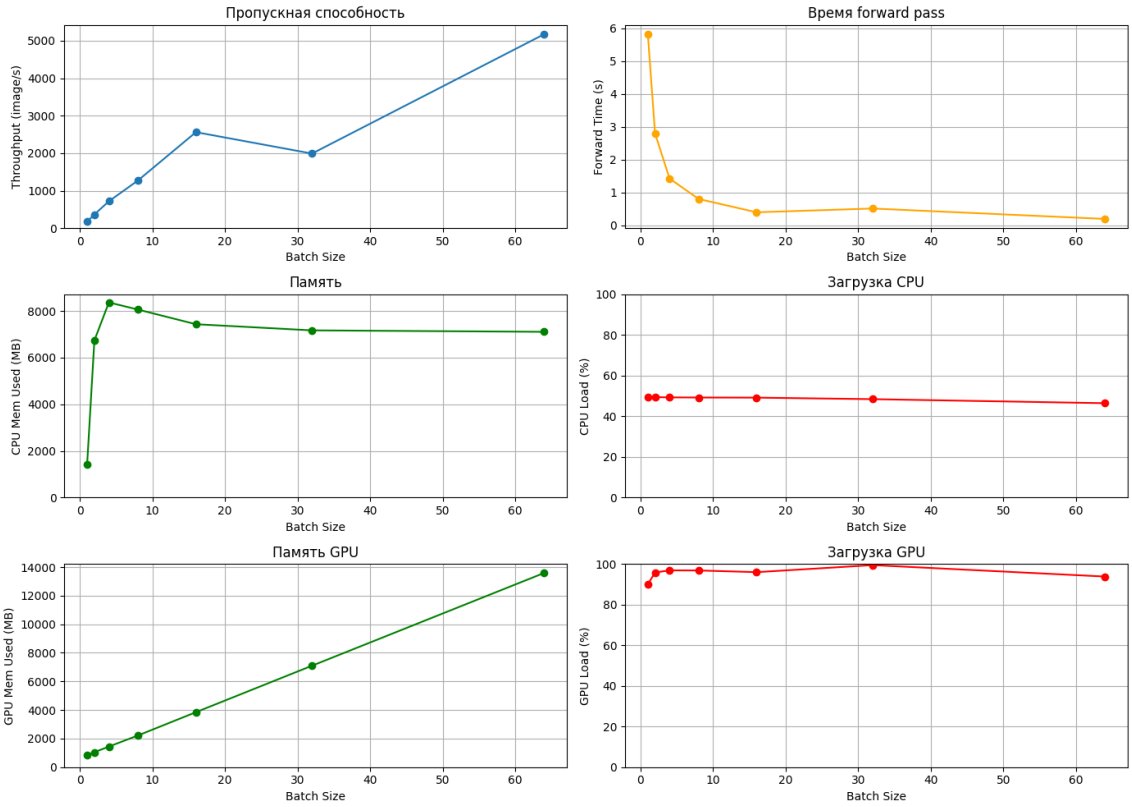


Рисунок 1 – Графики результатов нагрузочного тестирования одноканальной модели

Таблица 3 – Результаты нагрузочного тестирования трехканальной модели

Batch Size	1	2	4	8	16	32	64
Iterations	1024	512	256	128	64	32	16
Total Time (s)	8,92	5,75	5,60	5,43	4,82	4,71	4,69
Forward Time (s)	7,12	2,43	1,25	0,64	0,39	0,41	0,14
Overhead (s)	1,79	3,31	4,35	4,79	4,42	4,30	4,55
Throughput (image/s)	143,70	419,96	818,77	1593,97	2560,40	2478,75	7032,88
Throughput (TB/day)	2,3628	6,9051	13,462	26,208	42,099	40,756	115,63
CPU Load (%)	48,543	50,412	50,002	49,710	48,53	48,128	47,015
CPU Mem Used (MB)	1406,10	6759,85	8218,80	7546,90	7365,30	7059,00	6865,70
GPU Load (%)	71,97	94,26	95,83	95,88	95,00	95,25	92,75
GPU Mem Used (MB)	601,88	729,88	997,88	1501,88	2593,88	4765,88	9097,88

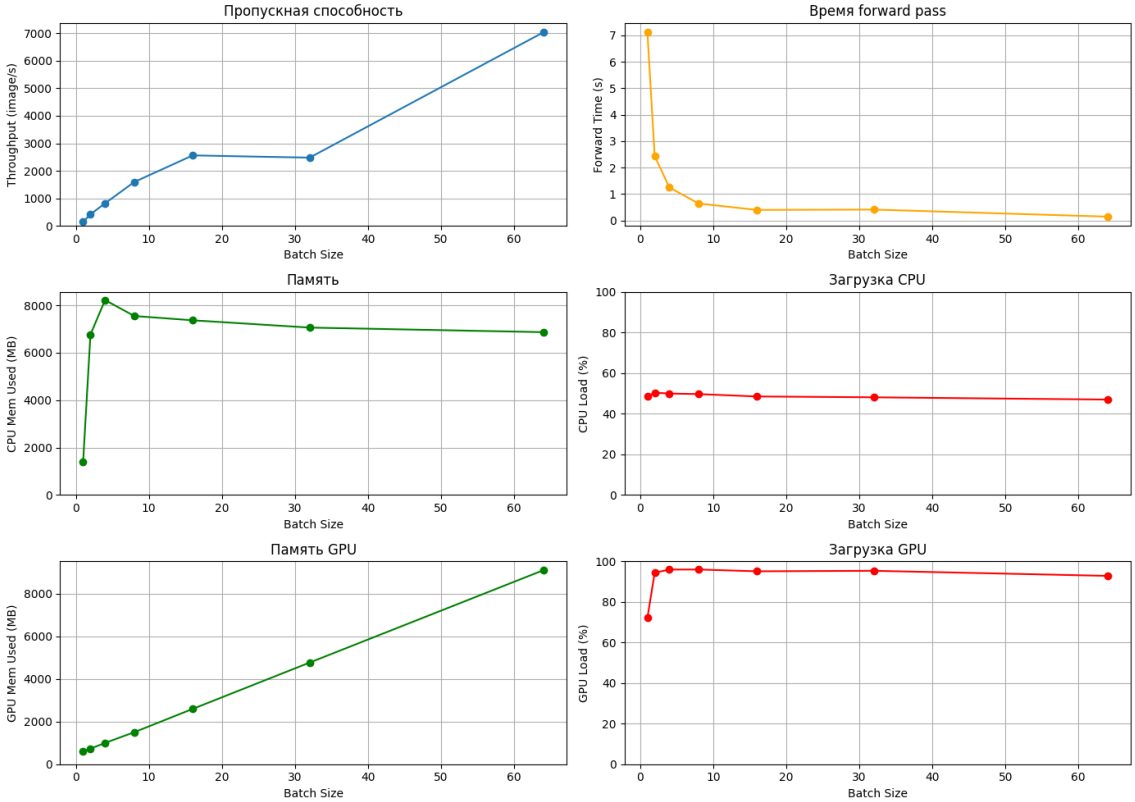


Рисунок 2 – Графики результатов нагрузочного тестирования трехканальной модели

Вычислительная сложность свёрточных операций растёт пропорционально числу каналов, однако эффективность GPU определяется не только количеством операций, но и степенью параллелизма вычислений. Одноканальные изображения формируют относительно небольшие вычислительные задачи, что приводит к неполной загрузке вычислительных блоков видеокарты. В результате значительная часть времени тратится на служебные операции, включая запуск вычислительных ядер и синхронизацию потоков. Для одноканальных данных накладные расходы составили 3,55 с. при batch size равном 1, тогда как для RGB-модели – лишь 1,79 с., что указывает на недостаточную вычислительную плотность задач в первом случае.

Увеличение числа каналов повышает арифметическую интенсивность вычислений и позволяет более эффективно использовать параллельную архитектуру GPU. При этом относительная доля накладных расходов уменьшается, а вычисления переходят в режим, ограниченный вычислительной мощностью устройства, а не задержками памяти или служебными операциями. Дополнительно, оптимизация библиотек cuDNN [2] под большие тензоры позволяет выбирать более эффективные алгоритмы свёртки, улучшая доступ к памяти и загрузку вычислительных блоков. Таким образом, RGB-вход обеспечивает более высокий уровень утилизации GPU, что и приводит к росту производительности.

Особенно заметный рост пропускной способности наблюдается на batch size равном 64, когда cuDNN перераспределяет вычислительные ресурсы в пользу более эффективных GEMM-ядер (SGEMM/volta_sgemm). При небольших размерах batch свёртки в основном обрабатывались через комбинацию Winograd и FFT, что создаёт ощутимые накладные расходы.

Полученные результаты показывают, что увеличение объёма входных данных не обязательно приводит к снижению скорости обработки. Напротив, при использовании современных GPU увеличение вычислительной нагрузки может улучшать эффективность вычислений. RGB-данные одновременно повышают качество сегментации и обеспечивают более стабильное масштабирование производительности при увеличении batch size.

Список использованных источников:

1. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation: [электронный ресурс] // arXiv. – 2015. – URL: https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf (дата обращения: 27.03.2026).

2. NVIDIA. cuDNN: CUDA Deep Neural Network Library*. NVIDIA Developer. URL: https://developer.nvidia.com/cudnn (дата обращения: 27.03.2026).*

UDC 004.932.1

COMPARATIVE ANALYSIS OF SEGMENTATION QUALITY AND COMPUTING PERFORMANCE OF ARCHITECTURE U-NET FOR IMAGE PROCESSING OF VARIOUS CHANNELS

Yerofeyev V., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Pertseu D.– PhD in Technical Sciences

Annotation. The paper investigates the effect of the number of input image channels on the segmentation result and computational efficiency of the U-Net neural network. Experimental results show that the use of RGB images provides improved segmentation quality and higher computational efficiency, despite an increase in the amount of input data.

Keywords. Semantic segmentation, U-Net, neural networks, object detection, load testing, GPU.

УДК 004.89

ИССЛЕДОВАНИЕ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПАТТЕРНОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ "РАЗРАБОТЧИК – ИИ-АССИСТЕНТ" ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА НАПИСАНИЯ, РЕФАКТОРИНГА И ОТЛАДКИ КОДА

Бочаров А.Н, студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Скиба И.Г. – ассистент

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная проблема взаимодействия разработчиков программного обеспечения с интеллектуальными ассистентами кодирования (ИИ-ассистентами). Проанализированы практики и проблемы, возникающие при использовании GitHub Copilot, AWS CodeWhisperer, Tabnine. Проведен анализ и предложены паттерны взаимодействия для оптимизации процессов написания, рефакторинга и отладки кода. Оценено потенциальное влияние внедрения данных паттернов на продуктивность разработчиков и качество программного продукта.

Ключевые слова. Искусственный интеллект, ИИ-ассистент, GitHub Copilot, разработка программного обеспечения, взаимодействие человека с компьютером, паттерны взаимодействия, промпт-инжиниринг, генерация кода, рефакторинг, отладка.

Введение. В современную разработку программного обеспечения (ПО) все активнее интегрируются инструменты на основе искусственного интеллекта (ИИ). Значительное распространение получают ИИ-ассистенты кодирования, такие как GitHub Copilot, AWS CodeWhisperer, Tabnine. Эти ИИ-ассистенты позволяют значительно ускорить процесс разработки за счет автоматической генерации кода, автодополнения, помощи в рефакторинге и отладке [1]. Однако, несмотря на потенциальные преимущества, эффективное использование ИИ-ассистентов остается задачей, требующей системного подхода. Проблема заключается в том, что взаимодействие разработчика с ИИ-ассистентом часто носит нерегламентированный характер. Отсутствие устоявшихся методик и паттернов взаимодействия приводит к следующим проблемам: нерелевантность или ошибочность предложений кода, сложность формулирования точных запросов (промптов), проблемы интеграции и последующей верификации сгенерированного кода. Это может не только нивелировать ожидаемый прирост производительности, но и привести к снижению качества ПО и появлению новых уязвимостей [2].

Целью данного исследования является изучение особенностей взаимодействия разработчиков с ИИ-ассистентами и формализация эффективных паттернов этого взаимодействия для оптимизации ключевых этапов разработки: написание, рефакторинг и отладка кода.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи:

1. Анализ текущих практик использования ИИ-ассистентов разработчиками разного уровня квалификации.
2. Выявление основных проблем, возникающих при взаимодействии "разработчик – ИИ-ассистент".
3. Определение эффективных стратегий формулирования запросов, верификации и интеграции кода.
4. Формализация выявленных эффективных стратегий в виде паттернов взаимодействия.
5. Предварительная оценка потенциального влияния предложенных паттернов на процесс разработки.

Анализ существующих практик и проблем. Было проведено анкетирование и серия неформальных интервью с разработчиками ПО (n=35) различного уровня (Junior, Middle, Senior), использующих ИИ-ассистенты в своей работе. Анализ показал, что ИИ-ассистенты применяются для широкого спектра задач: от генерации шаблонного кода и автодополнения (основное использование у Junior-разработчиков) до помощи в реализации сложных алгоритмов, рефакторинге и поиске неочевидных ошибок (характерно для Middle/Senior). Несмотря на активное использование ИИ-ассистентов, были выявлены типичные проблемы (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Основные проблемы взаимодействия с ИИ-ассистентами

Проблема	Частота упоминания, %	Характерные комментарии
Неточность/нерелевантность предложений	75	«Часто предлагает не то, что нужно», «Код не учитывает контекст проекта»
Трудности с формулированием запросов (промптов)	60	«Непонятно, как правильно спросить, чтобы получить нужный результат»
Необходимость тщательной проверки кода	85	«Никогда не принимаю код без проверки», «Иногда генерирует код с ошибками/уязвимостями»
Сложности интеграции предложенного кода	40	«Стиль кода отличается», «Нужно дорабатывать, чтобы вписать в архитектуру»
«Черный ящик» / Непонимание логики ИИ	30	«Не всегда понимаю, почему он предложил именно это»

Результаты указывают на необходимость выработки структурированных подходов к взаимодействию с ИИ-ассистентами, которые позволят минимизировать указанные проблемы.

Эффективные стратегии взаимодействия. В результате анализа проблем и примеров эффективного использования ИИ-ассистентов были определены стратегии, которые могут сделать взаимодействие разработчика с этими ИИ-ассистентами более продуктивным и безопасным. Качество результата работы ИИ напрямую зависит от качества запроса, который ему задает человек. Поэтому одним из важнейших навыков становится промпт-инжиниринг – умение грамотно формулировать задачи для ИИ. Эффективные запросы отличаются четкостью и однозначностью постановки задачи. Например, вместо общей фразы «напиши функцию для пользователя» результативнее будет конкретный запрос типа «напиши функцию Python get_user_by_id(user_id: int) с использованием SQLAlchemy для получения пользователя из БД по ID». ИИ-ассистент функционирует эффективнее, если ему предоставить релевантный контекст: окружающий код, комментарии с описанием требований, указание на используемые библиотеки и фреймворки. Получение оптимального результата не всегда возможно с первой попытки, особенно для сложных задач. В таких случаях эффективен итеративный подход, когда разработчик рассматривает взаимодействие как диалог: анализирует первый ответ ИИ и формулирует уточняющий запрос, корректируя предложения или добавляя новые детали. Эти наблюдения подтверждают важность четких запросов и управления ожиданиями, что также отмечается в исследованиях пользовательского опыта и юзабилити подобных ИИ-ассистентов [3].

Другой важный аспект – верификация и интеграция предложенного ИИ кода. Требуется постоянное проведение анализа логики, корректности, безопасности и производительности предложенного кода. Этому способствуют существующие инструменты разработки: статические анализаторы, линтеры и тесты (модульные, интеграционные). Код, генерируемый ИИ-ассистентами, в большинстве случаев требует последующей модификации. Почти всегда требуется его адаптация под стиль кодирования, принятый в проекте, под существующие архитектурные решения и конкретные требования задачи, что подчеркивает влияние инструментов ИИ-генерации на устоявшиеся процессы разработки и необходимость внимательного отношения к их результатам [4].

Использование возможностей современных IDE, таких как подсветка синтаксиса в предложениях ИИ, навигация по коду, инструменты сравнения версий, также способствует более эффективному рабочему процессу.

Формализация паттернов взаимодействия. Для систематизации полученных данных и упрощения применения эффективных стратегий использован подход, основанный на паттернах взаимодействия. По аналогии с паттернами проектирования в ПО, паттерны взаимодействия описывают проверенное, повторяемое решение типичной проблемы, возникающей при работе с ИИ-ассистентом. Рассмотрим три таких паттерна, выявленных в ходе исследования.

Первый предложенный паттерн, «Контекстно-ориентированный запрос», решает распространенную проблему генерации ИИ-ассистентом синтаксически верного, но не соответствующего контексту проекта кода (например, использование нерелевантных библиотек или нарушение принятого стиля). Это часто происходит из-за обучения моделей на обширных, но гетерогенных наборах данных, где отсутствует специфика конкретной кодовой базы. Решение заключается в том, чтобы перед формулированием основного запроса на генерацию кода явно предоставить ИИ необходимую контекстную информацию, тем самым направляя процесс генерации и повышая релевантность результата. Контекст может быть эффективно передан несколькими способами: через подробные комментарии в коде, предшествующие запросу и описывающие требования, ожидаемое поведение и окружение; через включение в сам промпт сигнатур (или даже

тел) релевантных функций, классов или структур данных, с которыми должен взаимодействовать генерируемый код; либо используя специальные возможности интегрированной среды разработки (IDE), многие из которых позволяют явно указать ассистенту файлы или выделенные фрагменты кода, которые следует учитывать при обработке запроса. Пример эффективного промпта с контекстом представлен на рисунке 1.

```
Context: Use Pydantic model 'UserData' defined above.
Input: json_string (str)
Output: UserData instance or None if parsing fails
Task: generate a Python function parse_user_data(json_string:
str) -> UserData | None:
```

Рисунок 1 – Пример промта с контекстом

Второй паттерн – «Итеративное Уточнение». Данный паттерн находит применение при решении с помощью ИИ сложных или слабо формализованных задач (например, при разработке комплексных алгоритмов, выполнении значительного рефакторинга или генерации кода по нечетким требованиям), где первый ответ ИИ-ассистента часто оказывается неполным или содержит логические неточности. Решение в таких случаях состоит в том, чтобы рассматривать взаимодействие не как однократный запрос-ответ, а как последовательный диалог или процесс совместной доработки. Получив первоначальный вариант кода от ИИ, разработчик проводит его критический анализ и, вместо полного отказа, формулирует уточняющий запрос. Ключевым аспектом здесь является предоставление конкретной и конструктивной обратной связи: явное указание на обнаруженные ошибки или логические просчеты, предложение альтернативных подходов или библиотек для использования, добавление ранее не учтенных ограничений или функциональных требований. Этот цикл «запрос – анализ – уточняющий запрос с обратной связью» повторяется итеративно до тех пор, пока не будет получен результат, полностью удовлетворяющий разработчика и соответствующий всем поставленным требованиям (см. рисунок 2).

```
Запрос: // Переработай код, чтобы он стал эффективнее
Анализ ответа ИИ: "Стало лучше, но используется N+1 запрос к БД".
Уточняющий запрос: // переработай предыдущее решение, чтобы избежать
N+1 проблемы, возможно используя "selectinload"
```

Рисунок 2 – Пример промта с уточнением

Третий паттерн – «Цикл Предложение-Верификация-Интеграция». Данный паттерн предназначен для минимизации рисков (функциональных ошибок, уязвимостей, снижения производительности и качества кода), связанных с интеграцией непроверенного кода, сгенерированного ИИ-ассистентом. При получении любого нетривиального кодового предложения от ИИ-ассистента необходимо применение регламентированного рабочего цикла, представленного на рисунке 3. Процесс начинается с получения предложения от ИИ, за которым следует обязательный этап верификации. На этом этапе выполняется всесторонняя оценка предложенного кода: проверяется корректность реализованной логики, отсутствие явных уязвимостей, потенциальное влияние на производительность и соответствие стандартам проекта, включая архитектурные ограничения. Для этого эффективно использовать как ручной анализ, позволяющий оценить читаемость и общую адекватность предложенного решения, так и инструментальные средства, такие как: статические анализаторы, SAST-инструменты, профилировщики, существующие модульные тесты. По результатам верификации принимается взвешенное решение о приемлемости кода. В случае отрицательного решения код отклоняется, и разработчик может перейти к уточнению запроса (согласно Паттерну 2) или выбрать другой подход к решению задачи. При успешной верификации, следующим этапом, выполняемым при необходимости, является адаптация кода. Даже корректный код может требовать модификаций для лучшей интеграции с существующей кодовой базой или для полного соответствия стилю кодирования, принятому в команде или проекте. Только после этапов проверки и необходимой адаптации код интегрируется в основную кодовую базу, например, через систему контроля версий. Завершающим этапом цикла является финальное тестирование. Его цель – убедиться, что интеграция не только добавила новую функциональность, но и не нарушила работу существующей части системы, то есть не вызвала регрессий. Сбой на данном этапе требует незамедлительной отладки или, возможно, отката внесенных изменений для сохранения стабильности продукта. Успешное прохождение финального тестирования завершает применение данного цикла для конкретного предложения ИИ.

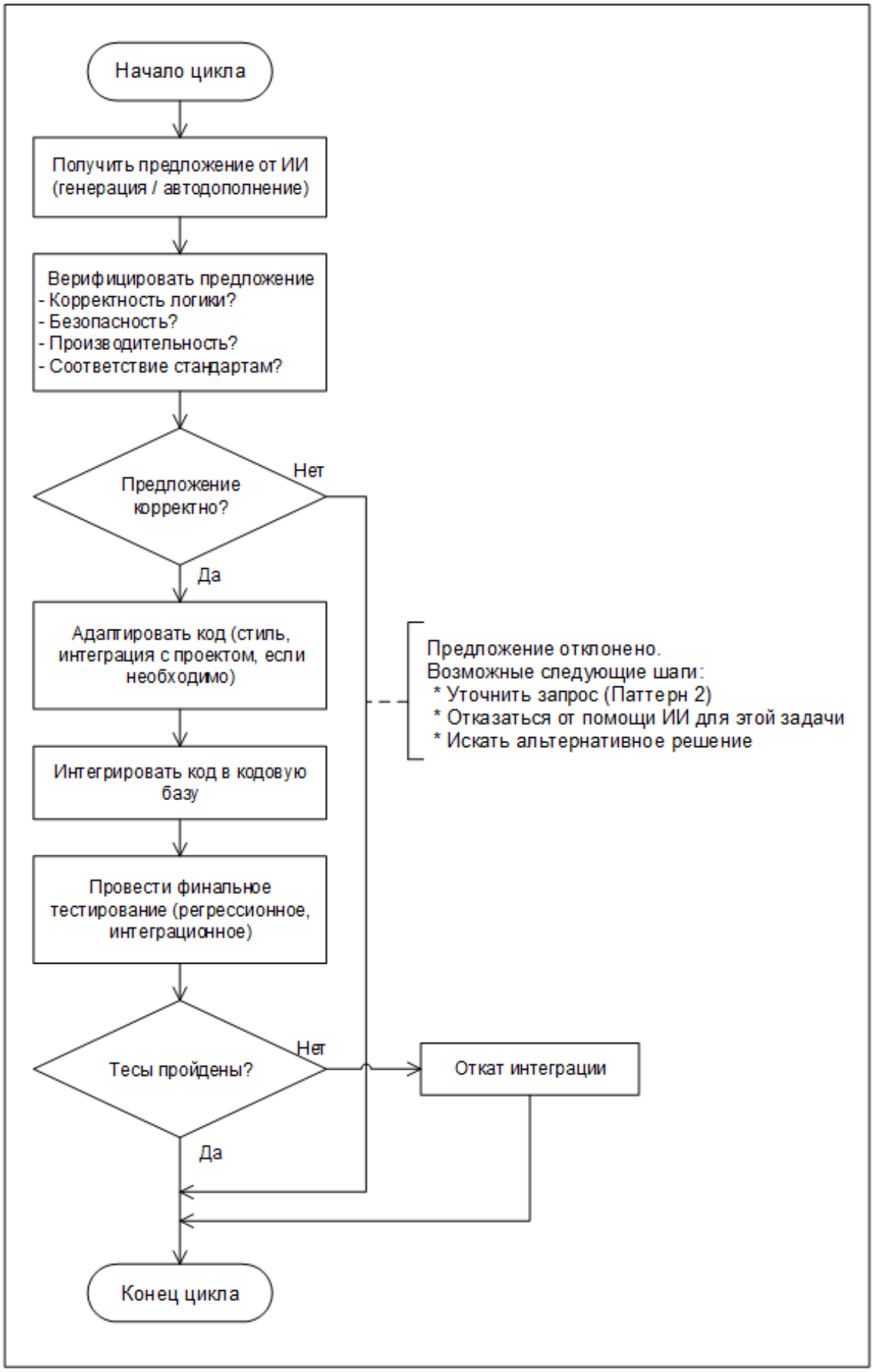


Рисунок 3 – Схема цикла «Предложение-Верификация-Интеграция»

Заключение. ИИ-ассистенты кодирования являются важной частью инструментальных средств современного разработчика. Однако реализация их потенциала требует разработки методик эффективного взаимодействия. В ходе исследования были проанализированы текущие практики использования ИИ-ассистентов и связанные с этим проблемы, выделены стратегии и формализованы три паттерна взаимодействия: «Контекстно-ориентированный запрос», «Итеративное Уточнение» и «Цикл Предложение-Верификация-Интеграция». Применение данных паттернов позволяет структурировать взаимодействие с ИИ-ассистентами, что способствует лучшему пониманию принципов эффективной работы с ИИ-ассистентом и его ограничений и ведет к росту продуктивности и улучшению качества ПО. В дальнейшем необходимо выявление и формализация большего числа паттернов, разработка инструментов для поддержки этих паттернов в IDE, а также изучение влияния ИИ-ассистентов и паттернов взаимодействия на командную работу и процессы обучения разработчиков.

Список использованных источников:

1. Ziegler, M. Programming with AI Assistance: A Comparative Study of GitHub Copilot and Human Programmers / M. Ziegler, L. G. Szafron // Proceedings of the 44th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP '22). – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2022. – P. 288–297.

2. Pearce, H. Asleep at the Keyboard? Assessing the Security of GitHub Copilot's Code Contributions / H. Pearce [et al.] // 2022 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). – San Francisco, CA, USA, 2022. – P. 754-768.

3. Vaithilingam, P. Expectation vs. Experience: Evaluating the Usability of Code Generation Tools Powered by Large Language Models / P. Vaithilingam, T. D. LaToza, K. Moran // Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23). – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2023. – Article 715. – P. 1–17.

4. Bird, C. Don't Touch My Code! Examining the Effects of AI-Based Code Generation on Software Development / C. Bird, D. S. Sarkar, A. Mastropaolo // IEEE Software. – 2023. – Vol. 40, № 3. – P. 58-65.

UDC 004.89

RESEARCH AND FORMALIZATION OF INTERACTION PATTERNS "DEVELOPER – AI ASSISTANT" FOR OPTIMIZING THE PROCESS OF WRITING, REFACTORING, AND DEBUGGING CODE

Bocharov A.N., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Skiba I.G. – Assistant

Annotation. The article addresses the relevant issue of interaction between software developers and intelligent coding assistants (AI assistants). Practices and challenges associated with using GitHub Copilot, AWS CodeWhisperer, and Tabnine are analyzed. An analysis is presented, and interaction patterns are proposed for optimizing the processes of code writing, refactoring, and debugging. The potential impact of implementing these patterns on developer productivity and software product quality is assessed.

Keywords. Artificial intelligence, AI assistant, GitHub Copilot, software development, human-computer interaction, interaction patterns, prompt engineering, code generation, refactoring, debugging.

УДК 004.42:621.865.8

РАЗРАБОТКА СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ГРУЗОВЫХ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ НА ЗАМКНУТОМ ПУТИ

Машков И.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Татур М.М. – д-р техн. наук, профессор

Аннотация. Работа представляет собой описание разработки особой системы моделирования, предназначенной для рассмотрения симуляций мультиагентных систем грузовых роботов. Определяются метрики и параметры для подобной системы. Приводится схема модульного представления системы и описывается назначение обозначенных на схеме модулей. Рассматривается алгоритм описывающий процесс симуляции мультиагентной системы. Описывается визуальная часть готового программного решения.

Ключевые слова. Симуляция, моделирование, модель, мультиагентная система, агент, автоматизация, алгоритм, случайность, генератор псевдослучайных чисел, робототехника, робот, роботизация, цикличность, координирование, координатор, коммуникация, модульные системы, модуль.

В условиях стремительного развития технологий автоматизации и роботизации особое место занимают мультиагентные системы. Они всё чаще используются в решении задач логистики и грузоперевозок. Использование симуляционных моделей позволяет исследовать поведение таких систем в контролируемой виртуальной среде, минимизируя риски и затраты, связанные с развёртыванием физических прототипов. Отдельное место занимают системы, функционирующие на замкнутых маршрутах, где цикличность процессов создаёт особые требования к управлению агентами. Данная работа описывает разработанную систему моделирования, предназначенную для симуляции мультиагентных систем грузовых наземных роботов, движущихся по замкнутому пути.

В контексте разработки данной системы необходимо определить следующие важные термины:

1. Агент – субъект некоторой системы, основное предназначение которого является выполнение конкретно поставленной задачи, чаще всего одной единственной [1].

2. Мультиагентная система – это вычислительная система, состоящая из множества взаимодействующих между собой агентов, обладающих поставленными, или динамически поставляемыми, целями и возможностями к их выполнению [2]. В робототехнике такие системы позволяют нескольким роботам работать скоординировано для выполнения сложных задач, которые были бы невозможны или слишком затруднительными для одной отдельной машины.

3. Симуляция, или моделирование – процесс, когда в качестве субъектов и среды тестирования используются виртуальные объекты, которые описывают основные параметры реальных объектов, и виртуальное пространство, соответственно [3]. Основным предназначением для подобной системы является обучение и (или) сбор статистики. По полученным результатам может проводится оптимизация и (или) улучшение моделируемой системы перед развёртыванием в реальном мире.

Разработка программного обеспечения, предназначенного для симуляции любых мультиагентных систем, является нетривиальной задачей. Перед началом разработки стоит определить основную рассматриваемую задачу, а также какие будут модули и агенты в системе и как они будут коммуницировать между собой.

Постановка задачи: разработать и реализовать симуляционную систему, состоящую из модуля создания и управления симуляцией, одного агента-координатора и N подчиненных ему агентов-роботов, в которой основной задачей является доставка грузов между двумя заданными точками в замкнутом в кольцо пространстве.

Для определения эффективности симулируемой мультиагентной системы требуется определить некоторые характеристики, по которым можно будет определять оптимальные параметры для систем на базе реальных устройств. К таким характеристикам относятся:

– $\mathrm{T}_{\text{общ}}$ – время, необходимое для транспортировки всех коробок-грузов;

– $\mathrm{T}_{\text{АБ}}$ – время, затраченное на загрузку или разгрузку в соответствующих точках;

– $\mathrm{T}_{\text{преп}}$ – время, затраченное на ожидание при возникновении препятствия на маршруте;

– $\mathrm{T}_{\text{затор}}$ – время, затраченное на ожидание в заторах (понятие «затор» будет определено позже по тексту).

Разработана схема модульного представления требуемой мультиагентной системы, схема изображена на рисунке 1.

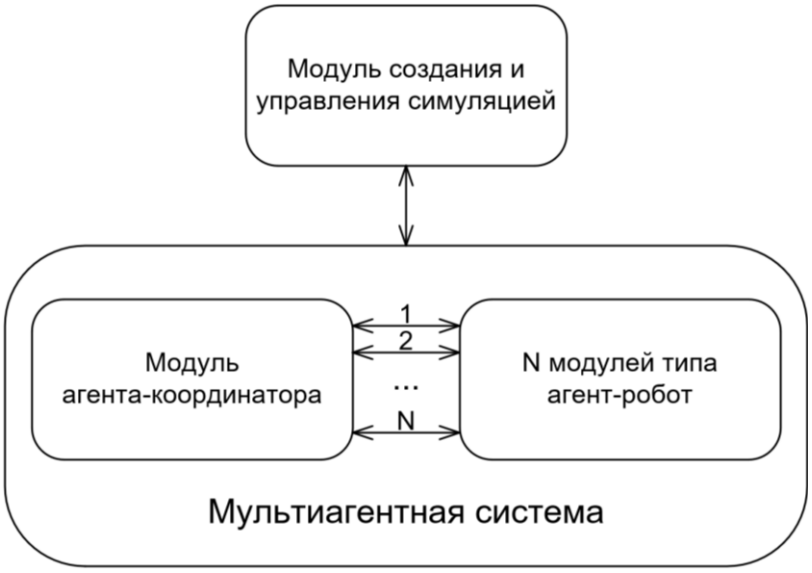


Рисунок 1 – Схема модульного представления мультиагентной системы

Основным блоком на схеме является «Модуль создания и управления симуляцией». Данный модуль объединяет в себе распознавание различных внешних сигналов, а также настройки для определения параметров среды. Под внешними сигналами понимаются те сигналы, которые в реальной ситуации были бы созданы и направлены на работу системы от её оператора. В условиях симуляционной модели данными сигналами управлять будет пользователь данной системы симуляций. Параметрами, в данном случае, являются некоторые характеристики всей симулируемой системы, которые определяют основные и негативные факторы, влияющие на выполнение работы системы. Под негативными понимаются те факторы, которые влияют на систему замедлением выполнения поставленной задачи. Однако, данные факторы предоставляют возможность более точно провести симуляционные эксперименты.

Параметрами данной симуляционной системы являются:

– $v(t) = const$ – постоянная скорость агентов-роботов;

– s – длина пути в одну сторону;

– N – количество активных агентов-роботов;

– M – количество перевозимых коробок-грузов;

– временная и пространственная дискретизации (не задается пользователем);

– временные характеристики загрузки и разгрузки (задаются с помощью генератора псевдослучайных чисел);

– максимальное количество потенциальных препятствий, появляющихся на пути (не задается пользователем);

– количество активных препятствий на пути (задается с помощью генератора псевдослучайных чисел);

– временная характеристика создаваемых препятствий (задается с помощью генератора псевдослучайных чисел).

Мультиагентная система состоит из двух блоков: «Модуль агента-координатора» и «N модулей типа агент-робот».

Агент-координатор является координирующим и управленческим для всех агентов-роботов в мультиагентной системе. Он распоряжается отправкой команд на начало и окончание загрузки или разгрузки, а также определяет начальный и конечный статус у всех подчинённых ему агентов-роботов. Данный модуль управляет обеими основными точками на заданном маршруте, то есть имеет контроль над точкой загрузки и точкой разгрузки.

Последним блоком на схеме является «N модулей типа агент-робот». Агенты-роботы – это исполнители в мультиагентной системе, именно они выполняют заданную им задачу по доставке грузов. Однако, для корректной работы системы из N одинаковых агентов-роботов у них должны быть описаны алгоритмы по взаимодействию между ними. В зависимости от данных алгоритмов мультиагентные системы делятся на системы с роевым интеллектом, имитирующим реальные биологические системы [4], и на системы с общим координатором. В рассматриваемом случае лучшим решением будет использование именно координирующей системы, так как для корректной работы системы достаточно лишь косвенного сигнализирования через агента-координатора. Данное решение облегчает работу устройству, на котором запущено программное обеспечение, вследствие чего

ускоряется работа агентов-роботов, а также положительно влияет на переносимость алгоритмов на реальные устройства.

В связи с геометрией маршрута (замкнутый маршрут – кольцо) на пути следования агентов-роботов может произойти ситуация затора. Затор – ситуация, когда два и больше агентов-роботов образуют очередь, которая проявляется в связи с препятствием или вследствие достижения точки загрузки или разгрузки агентом-роботом и переход его в состояние загрузки или разгрузки.

Вышеописанные условия и параметры всех модулей определяют следующие основные состояния агента-робота:

– движение агента-робота к следующей точке (точкам) – движение;
– остановка для загрузки – загрузка;
– остановка для разгрузки – разгрузка;
– остановка в связи с препятствием – остановка (препятствие);
– остановка в связи с затором – остановка (затор).

Исходя из поставленных условий было разработано программное решение с помощью, которого пользователь может проводить симуляции мультиагентной системы грузовых наземных роботов на замкнутом пути в заданных пределах и с устанавливаемыми пользователем условиями. Некоторые условия были установлены исключительно в связи с аппаратными ограничениями и оптимальным временем выполнения симуляции.

Основным алгоритмом в данном программном решении является алгоритм основного цикла симуляции, так как он описывает как проходит процесс моделирования данной мультиагентной системы (см. рисунок 2).

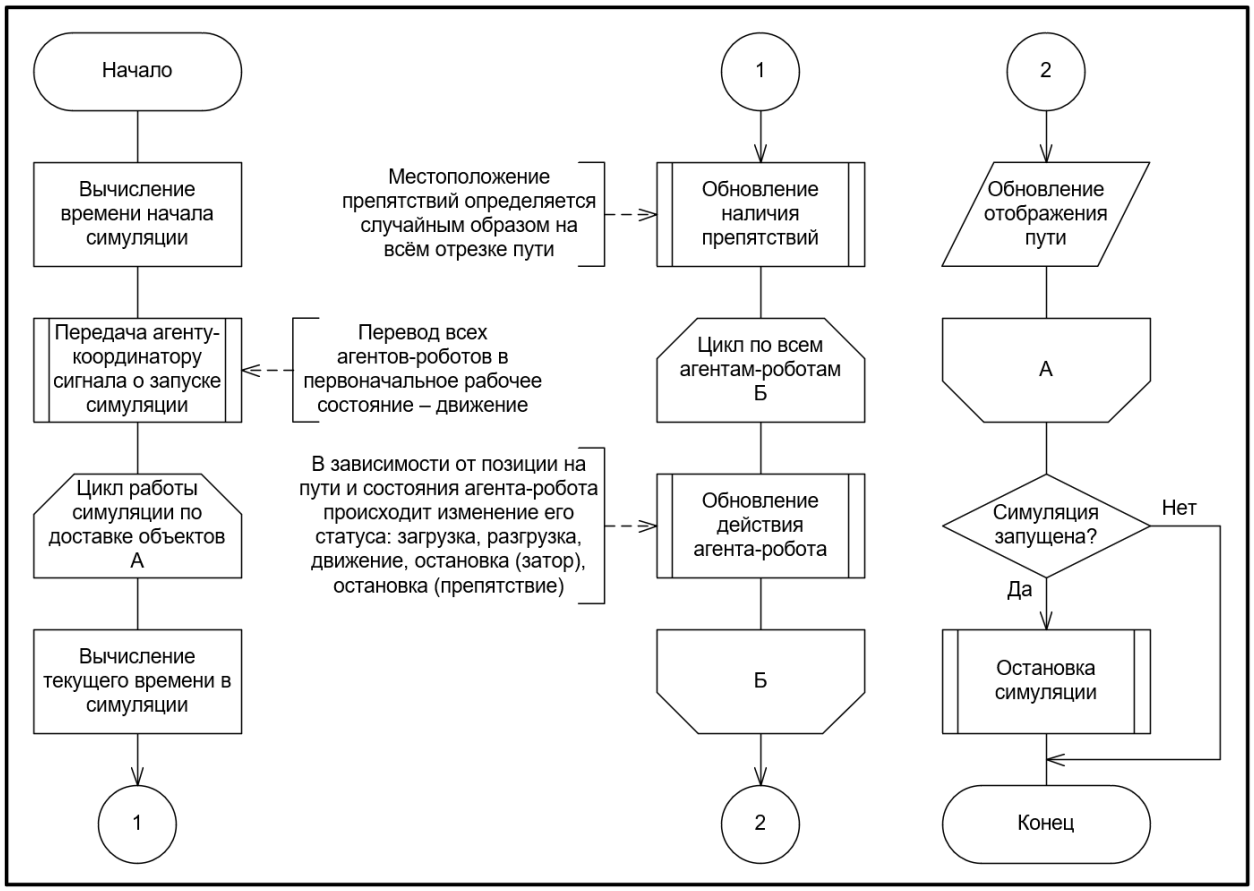


Рисунок 2 – Программная реализация. Блок-схема алгоритма основного цикла работы симуляции мультиагентной системы

После определения параметров симуляции пользователем, он создает и запускает симуляцию. В процессе создания моделируемой системы происходит инициализация всех агентов, участвующих в данной системе, а также первоначальных препятствий на пути следования агентов-роботов. Для обеспечения корректной работы симуляции функция, отвечающая за основной цикл работы симуляции, выносится в отдельный поток, тем самым защищая созданную симуляцию от вмешательства извне. Однако, присутствует возможность к преждевременной остановке симуляции. В конце симуляции, то есть после доставки всех грузов, агент-координатор выдает команду на остановку

всех агентов-роботов, а также выдаются результаты выполнения поставленной симуляционной модели мультиагентной системы.

Визуальное представление программного решения в состоянии запущенного процесса симуляции представлено на рисунке 3.

Рисунок 3 – Программная реализация. Визуальная часть при запущенной симуляции

На рисунке 3 можно увидеть различные обозначения для конкретных объектов системы. Клетки с бирюзовым цветом и числом внутри на рисунке обозначены свободные, незагруженные, агенты-роботы, если же цвет клетки зеленый – агент-робот несет груз. Красные клетки с крестом внутри обозначают препятствия. Клетки с обозначением «A» и «B» являются точкой загрузки и точкой разгрузки, соответственно. Белыми клетками обозначены отрезки пути, не занятые ничем.

По итогу проведенной работы была разработана и реализована программная среда для симуляции мультиагентных систем грузовых наземных роботов, функционирующих на замкнутом пути. Созданное решение позволяет моделировать процесс доставки грузов с учетом ключевых параметров, включая возникающие случайные препятствия и появление заторов. Применение модульной схемы с центральным агентом-координатором обеспечило гибкость настройки, масштабируемость количества роботов и упростило логику взаимодействия между элементами системы. Данные получаемые по окончанию симуляции (временные характеристики выполнения задач, простои и т.д.) предоставляют возможность провести предварительную оптимизацию параметров системы перед её физическим развертыванием, что существенно снижает риски и затраты. Таким образом, разработанная модель выступает эффективным инструментом для изучения потенциальных оптимизационных возможностей для подобной системы.

Список использованных источников:

1. Булгаков С.В. Применение мультиагентных систем в информационных системах // Перспективы Науки и Образования. 2015. №5(17). С. 137-140.

2. Безгубова Ю.О. Модели программных агентов в задачах информационного поиска // Славянский форум. 2015. №2(8). С. 41-49.

3. Virtual Environments. In subject area: Computer Science // ScienceDirect. – URL: https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/virtual-environments (дата обращения: 31.03.2026).

4. Enhancing drone swarm efficiency through a high-flexibility biomimetic formation algorithm. Drone Systems and Applications // Canadian Science Publishing. – URL: https://doi.org/10.1139/dsa-2024-0066 (дата обращения: 31.03.2026).

UDC 004.42:621.865.8

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR A MULTI-AGENT SYSTEM OF GROUND-BASED CARGO ROBOTS OPERATING ON A CLOSED TRACK

Mashkou I.A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Tatur M.M. – Doctor of Technical Sciences, professor

Annotation. This paper describes the development of a specialized simulation system designed to model multi-agent systems of cargo robots. Metrics and parameters for such a system are defined. A diagram of the system's modular structure is provided, and the functions of the modules indicated in the diagram are described. An algorithm describing the simulation process of a multi-agent system is examined. The visual component of the final software solution is described.

Keywords. Simulation, modeling, model, multi-agent system, agent, automation, algorithm, randomness, pseudorandom number generator, robotics, robot, robotization, cyclicity, coordination, coordinator, communication, modular systems, module.

УДК 004.056.55

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

Хотеновская В.С.; Шахлан П.С. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Богдан Е.В. – маг. техн. наук, ассистент

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ криптостойкости генераторов псевдослучайных чисел: стандартного модуля random, защищенного модуля secrets и пользовательского LCG-алгоритма. На основе экспериментов показано, что высокие показатели энтропии и визуальная хаотичность данных не гарантируют защиту от предсказания последовательности. Работа наглядно демонстрирует уязвимость некриптографических генераторов к атакам восстановления состояния и обосновывает необходимость использования CSPRNG в задачах защиты информации, несмотря на снижение производительности.

Ключевые слова. Генератор псевдослучайных чисел, PRNG, CSPRNG, криптостойкость, информационная энтропия, алгоритм Mersenne Twister, линейный конгруэнтный генератор, информационная безопасность, Python, анализ алгоритмов, предсказуемость последовательностей.

Генераторы случайных и псевдослучайных чисел являются важным компонентом современных информационных систем, в особенности в области криптографии и информационной безопасности. Они применяются при формировании криптографических ключей, одноразовых токенов, nonce-значений, а также в различных протоколах аутентификации и шифрования.

Несмотря на широкое распространение, не все генераторы случайных чисел удовлетворяют требованиям, предъявляемым к средствам криптографической защиты. В частности, многие стандартные псевдослучайные генераторы (PRNG), используемые в языках программирования, ориентированы преимущественно на высокую производительность и приемлемые статистические характеристики, однако не обеспечивают достаточной криптографической стойкости, включая устойчивость к предсказанию и восстановлению внутреннего состояния [1, 2].

Использование подобных генераторов в задачах информационной безопасности может приводить к возникновению уязвимостей, связанных с возможностью восстановления последовательности генерируемых значений и прогнозирования последующих элементов. Это, в свою очередь, приводит к компрометации защищаемых систем.

В связи с этим актуальной является задача сравнительного анализа генераторов случайных и псевдослучайных чисел с учетом как их статистических характеристик, так и показателей криптографической стойкости.

Целью данной работы является сравнительное исследование генераторов псевдослучайных чисел, включая встроенные средства языков программирования и пользовательские алгоритмы, с точки зрения их пригодности для применения в криптографических задачах.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

– рассмотрение теоретических основ функционирования генераторов псевдослучайных (PRNG) и криптографически стойких псевдослучайных чисел (CSPRNG);

– анализ характеристик выбранных генераторов;

– проведение статистического и криптографического тестирования;

– оценка устойчивости генераторов к практическим атакам.

Псевдослучайные генераторы (PRNG). Псевдослучайные генераторы чисел (Pseudo-Random Number Generators, PRNG) представляют собой алгоритмы, формирующие последовательности значений, обладающих статистическими свойствами случайных величин. Функционирование PRNG основано на детерминированном процессе, при котором каждое последующее значение определяется текущим внутренним состоянием генератора и начальным параметром – зерном (seed).

Одним из наиболее распространённых алгоритмов данного класса является Mersenne Twister, применяемый в стандартных библиотеках многих языков программирования [3]. Указанный алгоритм характеризуется высокой скоростью генерации и хорошими статистическими свойствами, включая равномерность распределения и большой период повторения. Внутреннее состояние генератора представлено массивом из 624 32-битных целых чисел. При наличии информации о состоянии становится возможным его полное восстановление, что позволяет предсказывать все последующие значения.

С точки зрения математической структуры Mersenne Twister относится к линейным рекуррентным генераторам. Линейность используемых преобразований обуславливает возможность восстановления внутреннего состояния на основе анализа выходной последовательности, в частности, с применением

методов решения систем линейных уравнений. Теоретические основы функционирования подобных генераторов подробно рассмотрены в работах Д. Кнута [4].

Ключевой особенностью PRNG является их детерминированность: при фиксированном начальном значении генератор воспроизводит одну и ту же последовательность. Данное свойство делает их удобными для задач моделирования и тестирования, однако ограничивает возможность применения в криптографических системах.

Кроме того, для многих PRNG разработаны методы восстановления внутреннего состояния на основе анализа части выходной последовательности. После восстановления состояния становится возможным предсказание последующих значений, что делает такие генераторы непригодными для использования в задачах, связанных с обеспечением информационной безопасности.

Криптографически стойкие генераторы (CSPRNG). Криптографически стойкие генераторы псевдослучайных чисел (Cryptographically Secure Pseudo-Random Number Generators, CSPRNG) предназначены для применения в условиях, предъявляющих повышенные требования к защите от предсказания и анализа генерируемых последовательностей.

В отличие от генераторов общего назначения, CSPRNG должны удовлетворять ряду строгих требований:

– непредсказуемость (unpredictability), заключающаяся в невозможности определения последующих значений на основе анализа части последовательности;

– устойчивость к восстановлению внутреннего состояния, при которой даже частичное раскрытие состояния не позволяет определить предыдущие или будущие значения;

– прямая криптографическая стойкость (forward secrecy), обеспечивающая невозможность восстановления ранее сгенерированных значений при компрометации текущего состояния;

– обратная криптографическая стойкость (backward secrecy), при которой знание предыдущих значений не позволяет предсказать последующие.

На практике CSPRNG реализуются на основе криптографических примитивов, включая блочные и потоковые шифры (например, ChaCha20), либо используют источники энтропии операционной системы, такие как /dev/urandom в Unix-подобных системах или специализированные криптографические интерфейсы в операционных системах семейства Windows.

В современных языках программирования для работы с криптографически стойкими генераторами, как правило, предусмотрены специализированные интерфейсы. В частности, модуль secrets языка Python использует системные источники энтропии и предназначен для генерации значений, применяемых в задачах обеспечения безопасности.

Таким образом, основное различие между PRNG и CSPRNG заключается в целевой направленности: первые ориентированы на обеспечение статистических характеристик и высокой производительности, тогда как вторые – на устойчивость к криптографическим атакам.

В качестве объектов исследования рассматриваются следующие генераторы:

1. Стандартный генератор общего назначения (random), основанный на алгоритме Mersenne Twister и широко применяемый в прикладных задачах, не связанных с криптографией.

2. Криптографически стойкий генератор (secrets), использующий источники энтропии операционной системы и предназначенный для генерации защищённых значений (токенов, ключей, паролей).

3. Пользовательский генератор, реализующий простой алгоритм псевдослучайной генерации (например, линейный конгруэнтный генератор или генератор семейства Xorshift), характеризующийся простотой реализации и высокой скоростью работы при ограниченной криптографической стойкости.

Для проведения сравнительного анализа генераторов псевдослучайных чисел разработана методология, включающая три взаимодополняющих направления: статистическое тестирование, криптографический анализ и оценку производительности.

Статистическое тестирование применяется для оценки соответствия выходной последовательности свойствам случайных величин. В рамках исследования используются следующие базовые тесты:

– частотный тест (monobit test), предназначенный для проверки равномерности распределения битов;

– тест серий (runs test), анализирующий длины последовательностей одинаковых битов;

– оценка энтропии, характеризующая степень неопределённости последовательности;

– критерий согласия χ^2, используемый для проверки соответствия эмпирического распределения теоретическому.

Указанные тесты позволяют выявить отклонения от случайности, однако их успешное прохождение не является достаточным условием криптографической стойкости генератора.

Криптографический анализ. Криптографический анализ направлен на оценку устойчивости генераторов к атакам, связанным с предсказанием выходной последовательности и восстановлением внутреннего состояния.

В рамках исследования рассматриваются следующие сценарии атак:

– атака восстановления состояния, при которой по части выходной последовательности предпринимается попытка реконструкции внутреннего состояния генератора;

– атака предсказания, направленная на определение возможности вычисления последующих значений на основе уже сгенерированных;

– анализ чувствительности к начальному значению (seed), предполагающий оценку влияния начальных параметров на предсказуемость последовательности.

Для стандартного генератора (Mersenne Twister) исследуется возможность восстановления внутреннего состояния по ограниченному числу выходных значений. Для пользовательского генератора (например, линейного конгруэнтного генератора) проводится анализ возможности восстановления параметров алгоритма.

Оценка производительности. Практическая применимость генераторов определяется, в том числе, их производительностью. В рамках исследования оцениваются следующие показатели:

– время генерации фиксированного объёма данных;

– среднее время получения одного значения;

– относительная нагрузка на вычислительные ресурсы.

Это позволяет сопоставить уровень безопасности генератора с его вычислительной стоимостью.

Условия проведения эксперимента. Экспериментальное исследование выполнено с использованием языка программирования Python. В качестве объектов анализа выбраны три реализации: стандартный модуль random (алгоритм Mersenne Twister), криптографически стойкий модуль secrets (интерфейс к системному CSPRNG), а также авторская реализация линейного конгруэнтного генератора с параметрами $a=1664525$, $c=1013904223$, $m=2^{32}$.

Для каждого генератора сформирована выборка объёмом $N=10^5$ значений. Оценка проводилась по трём критериям: статистические характеристики распределения, информационная энтропия и устойчивость к аналитическому восстановлению. Методология статистического анализа основана на подходах, изложенных в спецификации NIST SP 800-22 [5].

Результаты статистического анализа. Первичный анализ показал, что на уровне распределений исследуемые генераторы демонстрируют схожие характеристики. Гистограммы плотности распределения (см. рисунок 1) имеют близкий к равномерному вид без выраженных аномалий.

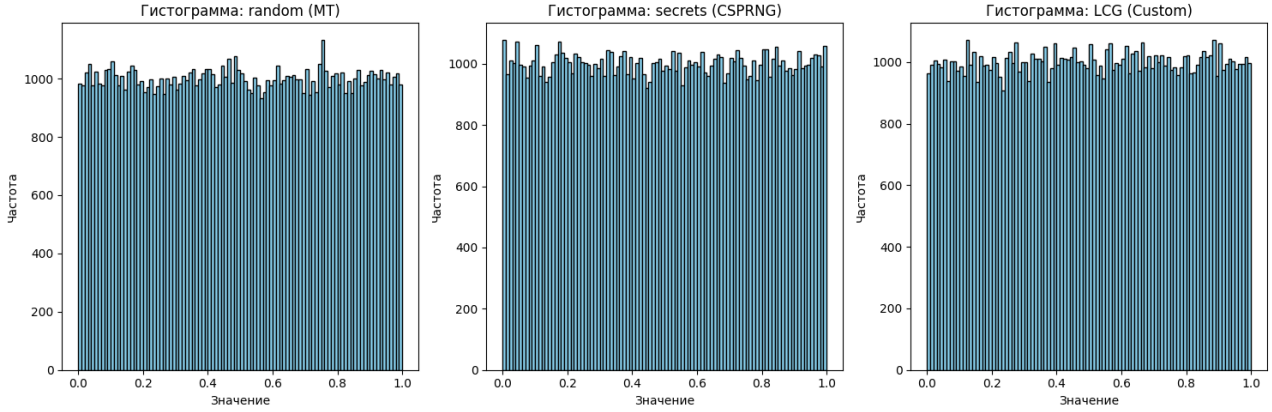


Рисунок 1 – Гистограммы распределения значений для исследуемых генераторов

Для количественной оценки вычислена информационная энтропия Шеннона по значениям, приведённым к 8-битному представлению. Для генератора random получено значение 7,9924, для secrets – 7,9926, для LCG – 7,9925. Близость указанных значений к теоретическому максимуму (8,0) свидетельствует о высокой степени неопределённости последовательностей.

Вместе с тем высокая энтропия отражает лишь качество статистического распределения и не является достаточным критерием криптографической стойкости, поскольку не исключает возможности предсказания последующих значений.

Результаты криптографического анализа. Проведённый криптографический анализ выявил принципиальные различия в стойкости исследуемых алгоритмов. Для визуализации скрытых зависимостей построены диаграммы рассеяния (scatter plot), в которых каждая точка соответствует паре соседних значений последовательности (см. рисунок 2).

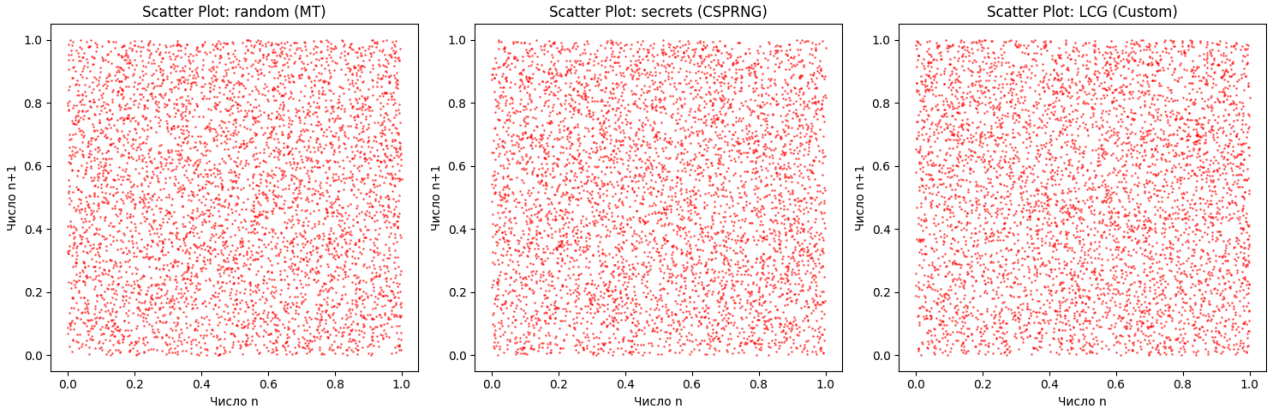


Рисунок 2 – Анализ корреляции соседних значений

Несмотря на визуально хаотичный характер распределения точек и отсутствие выраженных структур (см. рисунок 3), аналитические методы продемонстрировали уязвимость некриптографических генераторов.

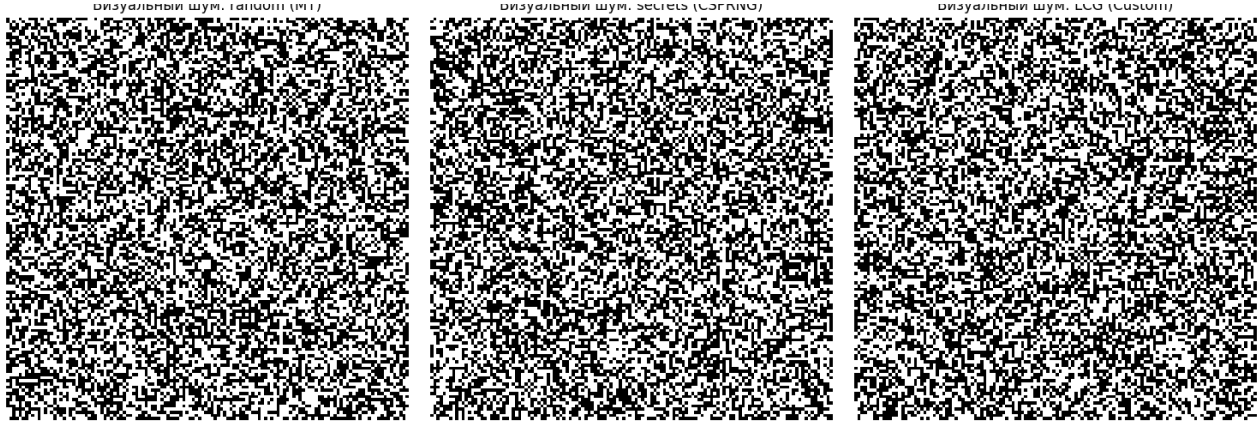


Рисунок 3 – Визуализация последовательностей в виде битового шума

В ходе эксперимента реализована атака на пользовательский генератор линейного конгруэнтного типа. Показано, что знание алгоритма и перехват одного текущего значения позволяют восстановить внутреннее состояние генератора. Для генератора Mersenne Twister установлено, что восстановление состояния требует 624 последовательных выходных значений, что также является практически реализуемым сценарием. В то же время попытки анализа генератора secrets не выявили статистически или аналитически значимых закономерностей.

Оценка производительности. Результаты измерения времени генерации 10^5 значений показали существенные различия в вычислительной эффективности алгоритмов. Установлено, что модуль secrets работает в 8,1 раза медленнее по сравнению со стандартным модулем random, тогда как пользовательская реализация LCG демонстрирует замедление примерно в 3,2 раза. Данные различия обусловлены использованием в CSPRNG дополнительных механизмов обеспечения безопасности, включая сбор энтропии и применение нелинейных криптографических преобразований.

Выводы по эксперименту. Проведённое исследование выявило существенное расхождение между статистическими характеристиками последовательностей и их криптографической стойкостью. Несмотря на близких к теоретически оптимальным значения энтропии и равномерности распределения, некриптографические генераторы продемонстрировали полную предсказуемость в условиях целенаправленного анализа. Показано, что стандартные методы визуальной и статистической оценки не позволяют выявить детерминированную природу PRNG, что ограничивает их применение в задачах информационной безопасности.

Установлено, что снижение производительности криптографически стойких генераторов является обоснованной платой за обеспечение устойчивости к аналитическим атакам, включая невозможность предсказания последующих значений.

Заключение. В работе выполнен комплексный сравнительный анализ генераторов псевдослучайных чисел различных классов, включая стандартные библиотечные реализации, криптографически стойкие генераторы и пользовательские алгоритмы. Экспериментально

подтверждена гипотеза о том, что статистическая случайность не является достаточным условием криптографической стойкости.

Показано, что генераторы общего назначения, такие как Mersenne Twister и линейные конгруэнтные алгоритмы, обеспечивают высокую скорость работы и приемлемые статистические свойства, однако обладают уязвимостями, связанными с возможностью восстановления внутреннего состояния. Это делает их непригодными для применения в защищённых информационных системах.

Практическая значимость работы заключается в обосновании необходимости использования специализированных криптографически стойких генераторов при решении задач, связанных с формированием ключей, токенов и иных чувствительных данных. Полученные результаты позволяют учитывать компромисс между уровнем безопасности и вычислительными затратами при проектировании информационных систем.

Список использованных источников:

1. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: https://citforum.ru/book/cryptogr/fullsoder.shtml. Дата доступа: 05.03.2026.

2. Randomness Requirements for Security [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4086.html. Дата доступа: 05.03.2026.

3. Mersenne Twister [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: https://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/m-mat/MT/ARTICLES/mt.pdf. Дата доступа: 05.03.2026.

4. Получисленные алгоритмы [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: http://lib.ysu.am/disciplines_bk/843e2a65af2ae099da1a826e92f2d85b.pdf. Дата доступа: 05.03.2026.

5. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-22r1a.pdf. Дата доступа: 05.03.2026.

UDC 004.056.55

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CRYPTOGRAPHIC STRENGTH AND PERFORMANCE OF PSEUDO-RANDOM NUMBER GENERATORS

Khotenovskaya V.S., Shakhlan P.S., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1]
Minsk, Republic of Belarus

Bogdan E.V. – Master of Technical Sciences, Assistant

Annotation. This article presents a comparative analysis of the cryptographic security of pseudorandom number generators: the standard random module, the secure secrets module, and a custom LCG algorithm. Experimental results show that high entropy values and the apparent randomness of the data do not guarantee protection against sequence prediction. This work clearly demonstrates the vulnerability of non-cryptographic generators to state-recovery attacks and justifies the need to use CSPRNGs in information security applications, despite the resulting decrease in performance.

Keywords. Pseudorandom number generator, PRNG, CSPRNG, cryptographic strength, information entropy, Mersenne Twister algorithm, linear congruential generator, information security, Python, algorithm analysis, sequence predictability.

УДК 004.774-043.86

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТОКОЛОВ HTTP И ИХ ВЛИЯНИЕ НА АЛГОРИТМЫ И ПАТТЕРНЫ РАЗРАБОТКИ СЕТЕВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Кравчук К. А., Лукьянов Д. Д., Лазакович А. А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шатилова О.О. – маг. техн. наук, старший преподаватель

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ протоколов HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3 в контексте современных реалий веб-разработки. Рассматриваются архитектурные изменения протоколов и их влияние на алгоритмические подходы при проектировании клиент-серверных приложений. Особое внимание уделено эволюции прикладных механизмов реализации: от методов программной компенсации ограничений в HTTP/1.1 до использования встроенных алгоритмов сжатия контекста (HPACK) и интерфейсов гибкой доставки данных (WebTransport) в современных стандартах. Обосновывается необходимость адаптации паттернов программирования при переходе от транспортного протокола TCP к QUIC (UDP).

Ключевые слова. HTTP/1.1, HTTP/2, HTTP/3, QUIC, мультиплексирование, алгоритмы оптимизации, HPACK, WebTransport, приоритизация потоков, ненадежная доставка данных.

Современная парадигма разработки программного обеспечения неразрывно связана с сетевым взаимодействием. Протокол HTTP (HyperText Transfer Protocol) является фундаментальной основой передачи данных в глобальной сети. Однако лавинообразный рост объема передаваемых данных и усложнение архитектуры веб-приложений выявили существенные ограничения классических версий протокола. Понимание алгоритмических различий между HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3 критически важно для разработчиков при проектировании высоконагруженных систем, так как выбор протокола напрямую диктует использование конкретных паттернов программирования и подходов к оптимизации.

Протокол HTTP/1.1, стандартизированный в 1997 году, является текстовым и использует транспортный протокол TCP. Главной алгоритмической проблемой данной версии является блокировка начала очереди (Head-of-Line blocking, HOL) на уровне HTTP. В рамках одного TCP-соединения запросы обрабатываются строго последовательно. Для обхода этого ограничения разработчикам приходилось внедрять специфические алгоритмы и паттерны («антипаттерны» с точки зрения современной архитектуры).

Domain Sharding — это программное распределение статических ресурсов по разным поддоменам для искусственного увеличения лимита параллельных TCP-соединений браузера [1].

Спрайты (CSS Sprites) — алгоритмическое объединение множества мелких изображений в одно для минимизации количества HTTP-запросов, требующее сложной математики расчета координат на стороне клиента. Конкатенация и минификация кода — сборка десятков JS/CSS файлов в один огромный бандл (bundle) [1].

Принятый в 2015 году стандарт HTTP/2 кардинально изменил подход к передаче данных. Протокол стал бинарным, что упростило алгоритмы парсинга и обработки фреймов на стороне сервера и клиента [4]. Главное нововведение — мультиплексирование потоков в рамках единственного TCP-соединения [4]. Это позволило отправлять множество запросов и получать ответы параллельно, не дожидаясь завершения предыдущих. Влияние на разработку: внедрение HTTP/2 сделало алгоритмы бандлинга и шардинга избыточными и даже вредными [1]. Разработчикам стало выгоднее загружать модули асинхронно небольшими частями (гранулярная загрузка), что значительно улучшило эффективность алгоритмов кэширования браузера. Дополнительно был внедрен алгоритм сжатия заголовков HPACK, снижающий накладные расходы на метаданные. Несмотря на успехи HTTP/2, проблема HOL-блокировки не была решена полностью, она переместилась на уровень протокола TCP. Потеря одного TCP-пакета приводила к остановке всех мультиплексированных потоков HTTP/2 до момента повторной передачи пакета. HTTP/3, одобренный IETF в 2022 году, представляет собой революционный шаг, так как отказывается от TCP в пользу протокола QUIC, базирующегося на UDP [2].

Алгоритмические и архитектурные преимущества HTTP/3:

1. Независимость потоков: QUIC реализует мультиплексирование на транспортном уровне. Потеря UDP-дейтаграммы влияет только на тот конкретный поток, к которому она принадлежит; остальные продолжают выполнение [3].

2. Ускоренное установление соединения (0-RTT): алгоритмы криптографии (TLS 1.3) интегрированы непосредственно в QUIC [3]. Если клиент ранее подключался к серверу, обмен данными может начаться в первом же пакете (Zero Round Trip Time), минуя длительное «тройное рукопожатие» (Three-way handshake) TCP.

3. Миграция соединений: идентификация соединения происходит не по связке «IP-адрес + порт», а по уникальному Connection ID [3]. Программно это означает, что при переключении пользователя с Wi-Fi на мобильную сеть (смена IP) соединение не рвется, и алгоритмы приложения не требуют обработки разрывов связи и повторного подключения.

Переход между версиями HTTP сопровождался не только изменением транспортной логики, но и появлением специфических программных механизмов, которые определили современные стандарты разработки сетевого ПО. В условиях текстовой природы протокола и отсутствия мультиплексирования программные реализации в HTTP/1.1 были сфокусированы на преодолении ограничений синхронной модели «запрос-ответ».

Механизмы кэширования: основной акцент в реализациях сделан на алгоритмах условных запросов с использованием заголовков ETag и Last-Modified [1]. Это позволяет программно минимизировать объем передаваемых данных, избегая повторной загрузки неизмененных ресурсов.

Паттерн Long Polling: для реализации систем реального времени (чаты, уведомления) в рамках HTTP/1.1 используется механизм «длинных опросов». Программный интерфейс удерживает открытое соединение до момента появления данных на сервере, что является ресурсоемкой, но необходимой имитацией двусторонней связи в условиях отсутствия нативного стриминга [1].

Появление бинарного слоя фреймирования в HTTP/2 позволило перенести часть логики оптимизации с прикладного уровня на уровень протокола. Одной из ключевых реализаций HTTP/2 стало внедрение сжатия заголовков по алгоритму HPACK. Программные реализации поддерживают динамические таблицы индексов на стороне клиента и сервера [5]. Это позволяет передавать только изменения в метаданных, что критически важно для микросервисных архитектур, где объем заголовков (например, передача JWT-токенов) может превышать объем полезной нагрузки.

Взвешенная приоритизация: в отличие от HTTP/1.1, реализации HTTP/2 позволяют программно управлять приоритетами потоков. Разработчик может назначать вес (weight) потоку [4], влияя на приоритет его обработки планировщиком: чем выше вес, тем больше фреймов этого потока будет отправлено относительно других при распределении доступной пропускной способности.

HTTP/3 предоставляет разработчикам доступ к управлению надежностью доставки, что ранее было скрыто внутри стека TCP. Интерфейс WebTransport, построенный на базе HTTP/3, предоставляет разработчикам гибкий выбор между надёжной доставкой (потоки QUIC) и ненадёжной (дейтаграммы) в рамках одного соединения [6]. Это позволяет создавать приложения реального времени без необходимости использовать отдельные протоколы вроде WebSocket или WebRTC для простых сценариев. В рамках одного HTTP-сеанса это открывает возможность реализовывать гибридные алгоритмы: критически важные данные передаются с гарантией доставки, а потоковые данные, где задержка критичнее полноты, передаются без повторных запросов потерянных пакетов [6]. Такой подход радикально упрощает разработку высоконагруженных систем реального времени.

В таблице 1 представлены ключевые различия протоколов.

Таблица 1 — Сравнение протоколов HTTP

Характеристика	HTTP/1.1	HTTP/2	HTTP/3
Транспортный уровень	TCP	TCP	QUIC
Формат данных	Текстовый	Бинарный	Бинарный
Мультиплексирование	Нет (HOL на уровне HTTP)	Да (Единое соединение)	Да (независимые потоки)
Ключевой механизм	REST, Long Polling, ETag	HPACK, Stream Weights	WebTransport, Datagrams
Устойчивость к потере сети	Низкая (разрыв TCP)	Низкая (разрыв TCP)	Высокая (ConnectionID)
Безопасность (TLS)	Опционально	Обязательно	Встроено (TLS 1.3)

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что эволюция протоколов HTTP от версии 1.1 к 3 существенно меняет подходы к разработке сетевых приложений. Переход к новым стандартам позволяет отказаться от ресурсоемких обходных решений прикладного уровня в пользу высокопроизводительных механизмов транспортного и сеансового уровней, что напрямую влияет на производительность и отказоустойчивость современных веб-сервисов.

Список использованных источников:

1. Илья Григорик. Скорость загрузки веб-страниц. Высокопроизводительные приложения / И. Григорик. — М.: Питер, 2015 г. — Дата доступа: 20.03.2026

2. RFC 9114: HTTP/3 [Электронный ресурс] / Internet Engineering Task Force (IETF). — Режим доступа: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9114 — Дата доступа: 20.03.2026

3. RFC 9000: QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport [Электронный ресурс] / Internet Engineering Task Force. — Режим доступа: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9000 — Дата доступа: 21.03.2026

4. Поллард Б. HTTP/2 в действии / Б. Поллард. — М.: ДМК Пресс, 2018 г. — Дата доступа: 21.03.2026

5. RFC 7541: HPACK: Header Compression for HTTP/2 [Электронный ресурс] / IETF. — Режим доступа: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7541 — Дата доступа: 24.03.2026

6. WebTransport Framework [Электронный ресурс] / World Wide Web Consortium (W3C). — Режим доступа: https://www.w3.org/TR/webtransport/ — Дата доступа: 26.03.2026

UDC 004.774-043.86

THE EVOLUTION OF HTTP PROTOCOLS AND THEIR IMPACT ON ALGORITHMS AND PATTERNS FOR DEVELOPING NETWORK APPLICATIONS

Kravchuk K. A., Lukianov D. D., Lazakovich A. A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Shatilova O.O. – Master in Technical Sciences, senior lecturer

Annotation. This article provides a comparative analysis of the HTTP/1.1, HTTP/2, and HTTP/3 protocols in the context of modern web development. Architectural changes to the protocols and their impact on algorithmic approaches to designing client-server applications are discussed. Particular attention is paid to the evolution of application implementation mechanisms: from methods for software-based compensation of limitations in HTTP/1.1 to the use of built-in context compression algorithms (HPACK) and flexible data delivery interfaces (WebTransport) in modern standards. The need to adapt programming patterns when transitioning from the TCP transport protocol to QUIC (UDP) is substantiated.

Keywords. HTTP/1.1, HTTP/2, HTTP/3, QUIC, multiplexing, optimization algorithms, HPACK, WebTransport, stream prioritization, unreliable data delivery.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ MULTILINGUAL BERT НА ПРИМЕРЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ НОВОСТЕЙ

Шагун Д.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куприянова Д. В. – маг. техн. наук, старший преподаватель

Работа посвящена созданию мобильного приложения, которое предоставляет пользователю персонализированную новостную ленту на основе анализа сохранённых новостей. Представлен алгоритм машинного обучения, основанный на применении эмбеддингов BERT для построения профиля пользователя и анализа тональности текста. Особое внимание уделяется архитектурным аспектам построения мобильного приложения с использованием multilingual BERT в задачах анализа и персонализации новостных данных.

В современном информационном обществе пользователи ежедневно сталкиваются с огромным потоком новостей. Задача выбора релевантных и интересных материалов становится нетривиальной. Существующие новостные агрегаторы часто предлагают однотипный контент или недостаточно учитывают индивидуальные предпочтения. Целью данной работы является разработка программного модуля, способного формировать персонализированные рекомендации на основе истории взаимодействия пользователя с новостями, а также учитывать эмоциональную окраску материалов.

Представленный алгоритм рекомендаций основан на том, что каждая текстовая новость состоит из заголовка, описания и содержимого и сводится к следующей последовательности действий:

Шаг 1. Приведение к нижнему регистру, удаление неалфавитных символов и токенизация.

Шаг 2. Вычисляется эмбеддинг как среднее по всем токенам последнего скрытого слоя:

$$e = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} h_t\,, \tag{1}$$

где e – эмбеддинг новости; h_t – выходной вектор BERT для t-го токена; T – количество токенов. Размерность эмбеддинга – 768 значений.

BERT (от англ. Bidirectional Encoder Representations from Transformers) – это предобученная нейросетевая архитектура на основе трансформера, разработанная Google в 2018 году [1]. Ключевой особенностью модели является использование механизма внимания (от англ. self-attention), который позволяет обрабатывать каждый токен в контексте всех остальных токенов предложения одновременно, что дает глубокое понимание семантики текста. На рисунке 1 изображена схема структуры модели BERT.

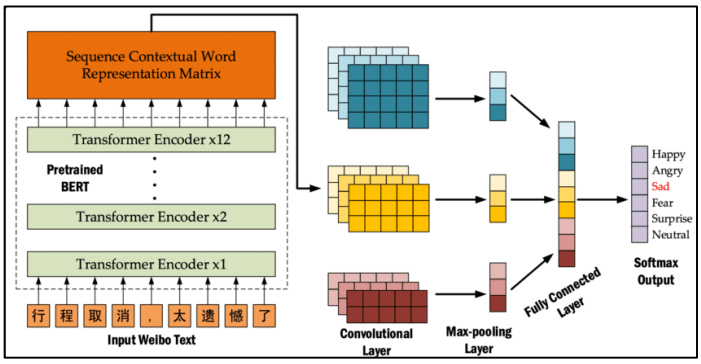


Рисунок 1 – Схема структуры модели BERT [2]

Шаг 3. Определение настроения новости по наличию ключевых слов позитивной или негативной окраски. Для этого были сформированы словари для русского и английского языков. В результате для каждой новости строится признаковое описание, объединяющее эмбеддинг BERT, one-hot кодировку категории и one-hot кодировку настроения:

$$f = [e, c, m], \tag{2}$$

где f – объединённый вектор признаков новости; c – one-hot вектор категории новости; m – one-hot вектор настроения новости. Итоговая размерность признакового пространства – 778 значений.

Шаг 4. Формирование профиля для рекомендации пользователя как среднее арифметическое векторов признаков всех сохранённых пользователем новостей:

$$p = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f_i\,, \tag{3}$$

где p – профиль пользователя; N – количество сохранённых новостей.

Шаг 5. Нормирование значений. Для этого каждый признак центрируется и масштабируется по выборочному среднему и стандартному отклонению, вычисленным по множеству кандидатов:

$$f_j' = \frac{f_j - \mu}{\sigma}, \qquad \mu = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} f_j\,, \qquad \sigma = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\left(f_j - \mu\right)^2}, \tag{4}$$

где f_j' – нормализованный вектор признаков j-й новости-кандидата после нормализации; μ – среднее значение каждого признака по всем новостям-кандидатам; σ – стандартное отклонение каждого признака по всем новостям-кандидатам; M – общее количество новостей.

Шаги 1-5 выполняются для новостей, которые выбрал пользователь, на основе чего формируется его профиль. Также эти шаги выполняются для формирования новостей-кандидатов.

Шаг 6. Для каждой новости-кандидата вычисляется косинусное сходство с нормализованным профилем пользователя:

$$sim\left(p', f_j'\right) = \frac{p' \times f_j'}{\|p'\|\left\|f_j'\right\|}, \tag{5}$$

где $sim\left(p', f_j'\right)$ – косинусное сходство между нормализованным профилем пользователя и нормализованным вектором j-го кандидата.

Архитектура решения включает клиентское Android-приложение и сервер рекомендательной системы. Клиент реализован на языке Kotlin с использованием Clean Architecture. Локальное хранение данных обеспечивается SQLite, синхронизация с Firebase – для аутентификации и резервного копирования сохранённых новостей. Сетевое взаимодействие с NewsAPI и собственным сервером осуществляется через Retrofit и OkHttp. В приложении реализованы экраны новостной ленты, фильтрации по категориям, сохранённых новостей, профиля и оплаты VIP-подписки (без рекламы). Поддерживается переключение языка (русский/английский) и валюты. Серверная часть написана на FastAPI и включает модули: парсер RSS-лент, построитель эмбеддингов на основе multilingual BERT. На рисунке 2 представлена схема взаимодействия компонентов системы.

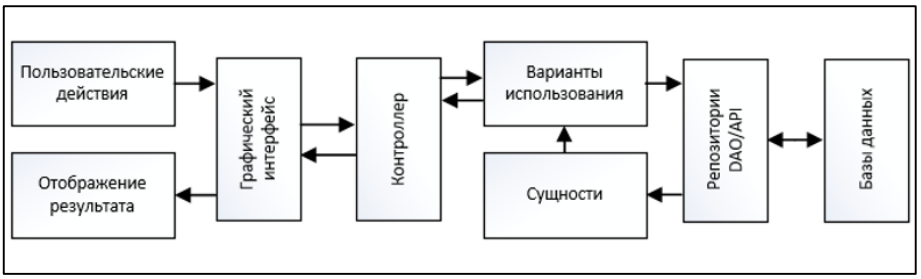


Рисунок 2 – Схема взаимодействия компонентов системы

Представленный алгоритм апробирован с помощью приложения для мобильного телефона и может быть использован как самостоятельный новостной агрегатор, а также в качестве платформы для дальнейших исследований в области персонализации контента. Перспективы развития включают внедрение коллаборативной фильтрации, учёт времени чтения и использование более сложных моделей тональности.

Список использованных источников:

1. Devlin, J. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Delvin,[etc.] // ArXiV Preprints. – 2019. – ArXiV ID: 1810.04805.

2. Xiao, X. Exploring spatiotemporal changes in the multi-granularity emotions of people in the city: a case study of Nanchang, China / X. Xiao, [etc.] // Computational Urban Science. – 2022. – Vol.2. – DOI: 10.1007/s43762-021-00030-x.

АРХИТЕКТУРА ИИ-АГЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MCP И RAG ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ

Хорошун Н.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куприянова Д.В. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В работе рассматривается проектирование архитектуры интеллектуального ИИ-агента, объединяющего протокол Model Context Protocol (MCP) и метод Retrieval-Augmented Generation (RAG) для персонализированного управления продуктивностью пользователя. Описана реализация системы на базе микросервисной архитектуры с применением векторного поиска pgvector и LLM Gemini.

Современные системы управления продуктивностью, такие как трекеры времени и менеджеры задач, ограничиваются сбором количественных метрик: длительность сессий, количество выполненных задач, процент фокусного времени. Однако они не способны учитывать качественный контекст пользовательской деятельности – содержание рефлексивных заметок, историю взаимодействия с ИИ-ассистентом, индивидуальные паттерны продуктивности. Традиционные чат-боты на основе больших языковых моделей (LLM) работают в рамках ограниченного контекстного окна и не имеют доступа к долговременной памяти о пользователе, что снижает релевантность генерируемых рекомендаций [1]. В связи с этим актуальной задачей является проектирование архитектуры ИИ-агента, способного объединять структурированные и неструктурированные данные пользователя для формирования персонализированных рекомендаций в реальном времени.

В основу предлагаемого решения положены два ключевых подхода: Retrieval-Augmented Generation (RAG) и Model Context Protocol (MCP). RAG – это метод расширения возможностей LLM путём извлечения релевантных фрагментов из внешней базы знаний перед генерацией ответа [2]. MCP – открытый протокол, стандартизирующий взаимодействие LLM с внешними источниками данных и инструментами через унифицированный интерфейс «клиент–сервер», что позволяет агенту динамически подключать новые возможности без модификации ядра системы [3].

Серверная часть состоит из набора микросервисов, взаимодействующих через REST API и брокер сообщений Redpanda. Данные о телеметрии использования приложений собираются клиентом и передаются через потоковую обработку в аналитическое хранилище ClickHouse для агрегаций.

ИИ-агент реализован как отдельный сервис и использует Gemini API в качестве LLM. Подсистема RAG построена на расширении pgvector [4] для PostgreSQL, что позволяет хранить 768-мерные векторные представления непосредственно в реляционной СУБД без необходимости развертывания отдельной векторной базы данных. Для индексации используется алгоритм HNSW (Hierarchical Navigable Small World), обеспечивающий поиск ближайших соседей со сложностью O(log n). При поступлении запроса пользователя система выполняет семантический поиск по трём категориям источников: рефлексивные заметки из сессий фокусировки, описания задач и встроенная база знаний о методологиях продуктивности. Найденные фрагменты ранжируются по косинусному сходству и включаются в системный промпт LLM, что позволяет генерировать ответы с учётом индивидуального контекста пользователя.

Интеграция MCP обеспечивает модульное расширение возможностей агента. Через MCP-серверы агент получает доступ к инструментам управления задачами, запуска фокус-сессий, просмотра аналитики и синхронизации с Google Calendar. Каждый MCP-сервер предоставляет стандартизированное описание своих возможностей, что позволяет LLM автономно выбирать необходимый инструмент на основе намерения пользователя. Такая архитектура позволяет добавлять новые интеграции без изменения логики самого агента.

Таким образом, предложенная архитектура ИИ-агента обеспечивает три ключевых результата: семантический доступ к долговременной памяти пользователя посредством RAG устраняет ограничение контекстного окна LLM; стандартизация инструментного взаимодействия через MCP обеспечивает масштабируемость без модификации ядра агента; совмещение реактивного и проактивного режимов позволяет системе как отвечать на запросы, так и самостоятельно инициировать рекомендации на основе анализа поведенческих паттернов пользователя.

Список использованных источников:

1. Zhao W. X. A Survey of Large Language Models / W. X. Zhao [et al.] // arXiv preprint arXiv:2303.18223. – 2023.

2. Lewis P. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks / P. Lewis [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Vol. 33. – P. 9459–9474.

3. Model Context Protocol Specification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://modelcontextprotocol.io. – Дата доступа: 25.03.2026.

4. pgvector: Open-source vector similarity search for Postgres [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/pgvector/pgvector. – Дата доступа: 25.03.2026.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ ПОЧТОВЫХ ОТПРАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Можейко Д.О., Мынзул А.Э., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Перцев Д.Ю. – канд. техн. наук, доцент

В работе представлена реализация программно-аппаратного комплекса для автоматизации физической сортировки почтовой корреспонденции. Описана двухуровневая архитектура системы управления на базе микрокомпьютера Raspberry Pi 4 и микроконтроллера ESP32. Представлен алгоритм распознавания индексов с использованием многослойного перцептрона, реализованного на языке C++ с применением библиотеки OpenCV. Приведен расчет экономической эффективности внедрения системы в локальных узлах связи.

Автоматизация логистических процессов в локальных узлах связи является критическим фактором повышения эффективности доставки «последней мили». Существующие промышленные линии отличаются высокой стоимостью и закрытой архитектурой [1]. Целью работы является создание автономного комплекса с открытой архитектурой (Edge Computing), обеспечивающего высокую скорость обработки данных без обращения к облачным сервисам.

Аппаратная часть системы построена на базе одноплатного микрокомпьютера Raspberry Pi 4 (Master-узел), выполняющего функции захвата видеопотока и нейросетевого инференса. Периферийное управление реализовано на микроконтроллере ESP32-WROOM-32U, который в режиме реального времени обрабатывает сигналы датчиков и управляет приводами.

В качестве исполнительных механизмов применены коллекторный двигатель JGB37-520 для конвейера и сервопривод MG996R для узла динамического сброса. Оптическая регистрация осуществляется модулем Raspberry Pi Camera v2, что позволяет получать четкие и детализированные кадры движущихся объектов при минимальных задержках передачи данных напрямую в графический сопроцессор.

Программный модуль разработан на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV для предварительной фильтрации, сегментации и нормализации изображений [2]. Вычислительное ядро представляет собой многослойный перцептрон (MLP). Для достижения максимальной производительности математическая модель реализована полностью на нативном коде без использования избыточных сторонних фреймворков глубокого обучения.

Архитектура нейронной сети включает входной слой из 784 нейронов, что соответствует вектору нормализованного изображения размером 28x28 пикселей. Хранение синаптических весов организовано в виде непрерывных одномерных массивов в оперативной памяти, что обеспечивает эффективное использование кэш-памяти процессора и предотвращает фрагментацию ресурсов при выполнении ресурсоемких матричных операций. В качестве нелинейного преобразования в скрытых слоях применяется модифицированная функция активации ModRelu [3]. Данная функция решает проблему затухания градиентов за счет введения малого положительного коэффициента для отрицательных входных сигналов, а также защищает систему от взрывного роста значений на этапе обучения.

Обучение нейронной сети проводилось по методу обратного распространения ошибки с использованием стохастического градиентного спуска на репрезентативном наборе данных EMNIST. Для повышения обобщающей способности модели и предотвращения эффекта переобучения в архитектуру интегрирован алгоритм регуляризации Dropout, обеспечивающий случайное отключение 20% нейронов входного слоя на каждой итерации процесса обучения. Точность распознавания на тестовой выборке (Accuracy) составила 98% и рассчитывается по формуле:

$$Accuracy = \frac{correct}{N_{total}} \quad (1)$$

где $correct$ – количество верно распознанных символов; N_{total} – объем выборки.

Результаты внедрения системы показывают высокую экономическую эффективность: срок окупаемости инвестиций составляет 0,67 года при рентабельности 150,1%.

Список использованных источников:

1. Siemens Logistics Intelligent intralogistics for airports and postal services [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.siemens-logistics.com/en/ – Дата доступа: 16.03.2026.

2. OpenCV (Open Source Computer Vision Library) Библиотека алгоритмов компьютерного зрения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://opencv.org/ – Дата доступа: 16.03.2026.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ: МЕТОДЫ ВЕРИФИКАЦИИ И СНИЖЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ РИСКОВ

Григоренко Б.С., Кохнюк К.А. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Никульшин Б. В. – канд. тех. наук, доцент

В работе рассматривается применение больших языковых моделей в задачах системного анализа. Анализируются возможности их использования при обработке требований, подготовке проектной документации и формировании диаграмм, а также ограничения, возникающие при отсутствии процедур проверки. Предлагается гибридный подход, основанный на поэтапной декомпозиции требований, предварительной верификации и генерации артефактов под контролем аналитика. Отдельно рассматривается сравнение универсальных и специализированных моделей, обученных на материалах по системному анализу.

Развитие генеративного искусственного интеллекта заметно влияет на деятельность системного аналитика. Современные LLM могут выделять сущности из текстов требований, подготавливать черновики спецификаций, формировать сценарии использования и генерировать текстовую основу для диаграмм. Универсальные системы, к которым относится, например и Gemini, ориентированы на широкий круг задач: работу с документами, помощь в разработке и переход от требований к прототипу, то есть они полезны как общий интеллектуальный помощник.

Однако ускорение работы не означает автоматического повышения её качества. В системной инженерии ключевыми остаются полнота, непротиворечивость и трассируемость требований. Ошибки, допущенные на стадии анализа, затем переходят в проектную документацию, код, тестовые сценарии и бизнес-процессы. Поэтому применение LLM в системном анализе должно рассматриваться не как замена аналитика, а как средство поддержки принятия решений и подготовки промежуточных артефактов [1].

Основная проблема состоит в том, что универсальная языковая модель формирует ответ на основе вероятностного продолжения текста и не обладает инженерным пониманием предметной области.

В результате при прямой генерации спецификаций и диаграмм могут возникать логические разрывы, потеря нефункциональных ограничений, неполный учёт исключительных сценариев и эффект «чёрного ящика», когда формально убедительный ответ воспринимается как корректный без достаточной проверки [2]. Для системного анализа это особенно опасно, так как ошибка в интерпретации требования на раннем этапе масштабируется на весь проект.

Для снижения этих рисков предлагается гибридный подход. На первом этапе модель выполняет декомпозицию требований: выделяет акторов, сущности, события, правила, ограничения и исключения. На втором этапе проводится логическая проверка: для каждого действия уточняются предусловия, постусловия, альтернативные ветви и исключительные ситуации. На третьем этапе на основе уже проверенного набора фактов формируются проектные артефакты. На четвёртом этапе аналитик выполняет экспертную валидацию результата. Такой контур позволяет использовать преимущества LLM, но сохранять инженерный контроль над качеством.

Отдельного внимания заслуживает сравнение универсальной модели и специализированной системы, самостоятельно обученной или дообученной именно под задачи системного анализа. Gemini является мощным универсальным инструментом, но его сильная сторона – широта применения, а не узкая специализация. Напротив, модель, обученная на корпусе требований, спецификаций, use case, BPMN/UML-описаний, проектных шаблонов и примеров верификации, обычно лучше решает профильные аналитические задачи. Это связано с тем, что она точнее распознаёт профессиональную терминологию, устойчивее выделяет обязательные и альтернативные ветви процесса, лучше сохраняет нефункциональные ограничения и чаще формирует ответы в формате, пригодном для непосредственного включения в проектную документацию.

Материалы Google Cloud прямо указывают, что domain-specific fine-tuning адаптирует модель к конкретной области и может повышать точность и релевантность ответов, а также снижать вероятность галлюцинаций; исследования по domain-specific RAG и постобучению также показывают улучшение качества на внутриотраслевых задачах.

Существенным преимуществом специализированной модели является более высокая объяснимость результата в пределах предметной области. Если универсальная модель чаще формирует ответ как связный, но обобщённый текст, то модель, обученная на требованиях, сценариях использования и проектных шаблонах, способна выдавать структуру, ближе к профессиональной логике аналитика: отдельно фиксировать роли, ограничения, исключения и зависимости между

действиями. Это особенно важно в задачах, где требуется не только получить черновой артефакт, но и обосновать, каким образом каждый его элемент связан с исходным требованием.

Практическое преимущество самостоятельно обученной модели также проявляется в возможности её адаптации к внутренним стандартам конкретной организации. В отличие от универсального ИИ, специализированная система может быть настроена на использование корпоративной терминологии, шаблонов спецификаций, правил описания бизнес-процессов и требований к оформлению проектной документации. Благодаря этому снижается объём последующей ручной доработки, а результаты генерации становятся более единообразными и пригодными для включения в рабочий контур анализа и проектирования [3].

Преимущество специализированной модели объясняется несколькими факторами. Во-первых, она обучается на данных, отражающих именно логику системного анализа, а не на широком массиве разнородных текстов. Во-вторых, такая модель лучше усваивает типовые структуры артефактов: описание ролей, предусловий, постусловий, бизнес-правил, исключений и связей между требованиями. В-третьих, её можно дополнительно настраивать под внутренние стандарты организации: шаблоны спецификаций, корпоративные правила именования, требования к безопасности и форматы диаграмм. В результате она даёт не просто связный текст, а более дисциплинированный и воспроизводимый результат.

Важным условием эффективного применения специализированной модели является качество обучающего корпуса. Если в обучающую выборку включены формализованные требования, корректные спецификации, примеры диаграмм и верифицированные проектные артефакты, модель лучше воспроизводит профессиональную логику системного анализа. При этом наличие ошибок, противоречий или неполных описаний в данных обучения может привести к тиражированию тех же недостатков в новых результатах. Следовательно, эффективность такой модели зависит не только от архитектуры, но и от качества инженерной подготовки данных [4].

При этом утверждать, что специализированная модель всегда лучше универсальной, было бы некорректно. Её преимущества проявляются прежде всего в узком классе задач, где есть качественный обучающий корпус, понятные критерии оценки и стабильная предметная область. Универсальные модели остаются полезнее в ситуациях, где требуется широкий кругозор, работа с разнородной информацией, быстрый черновой анализ или междисциплинарный поиск решений. Поэтому на практике наиболее эффективным является не противопоставление этих систем, а их осмысленное сочетание.

Для оценки качества такого подхода могут использоваться три основные группы показателей: логическая полнота, согласованность и трассируемость. Первая отражает степень учёта обязательных, альтернативных и исключительных ветвей процесса. Вторая показывает отсутствие противоречий и логических разрывов. Третья характеризует возможность связать каждый элемент диаграммы или спецификации с исходным требованием. Если сравнивать универсальную модель и специализированную, то именно по этим метрикам профильно обученная система должна демонстрировать преимущество в задачах системного анализа.

При этом эффективность специализированной модели должна подтверждаться не только качественными наблюдениями, но и измеримыми показателями. Для такого сравнения целесообразно использовать экспертную оценку полноты учёта требований, количества пропущенных исключительных сценариев, степени сохранения нефункциональных ограничений и уровня трассируемости между исходным текстом и конечным артефактом.

Таким образом, использование LLM в системном анализе целесообразно рассматривать как инструмент инженерного усиления, а не как замену системного аналитика. Наиболее продуктивным является гибридный подход, при котором человек определяет рамки анализа, задаёт критерии корректности и валидирует результат, а ИИ выполняет декомпозицию требований, поиск пропусков и подготовку черновых артефактов. При этом специализированная модель, обученная на материалах системного анализа, может быть эффективнее универсального ИИ Gemini именно в профильных задачах, поскольку лучше учитывает предметную терминологию, ограничения и структуру проектных документов.

Это делает её более пригодной для повышения трассируемости требований и снижения вероятности логических ошибок на ранних этапах проектирования. Кроме того, применение таких моделей способствует стандартизации подготовки аналитических артефактов и повышает воспроизводимость результатов при повторной обработке схожих требований. Это особенно важно в условиях роста сложности информационных систем и увеличения требований к качеству проектной документации.

Список использованных источников:

1. Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D. et al. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models, 2022.

2. NIST. Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). NIST AI 100-1. 2023.

3. NIST. Generative Artificial Intelligence Profile. NIST AI 600-1. 2024.

4. SEBoK. System Requirements Definition; Requirements Management. The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge.

КРОСС-ПЛАТФОРМЕННОЕ МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЯМИ

Савинич Т.М., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куприянова Д.В. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В данной работе рассматривается проектирование и программная реализация мобильного приложения для автоматизации управления мероприятиями, предназначенного для организаторов событий различного масштаба – от частных торжеств до корпоративных конференций. Основной акцент сделан на построении модульной клиент-серверной архитектуры с разделением ответственности между слоями бизнес-логики, авторизации и уведомлений, а также на обеспечении масштабируемости системы через гибкую модель подписок и серверную проверку пользовательских лимитов.

Современный рынок цифровых инструментов для организации мероприятий характеризуется фрагментированностью решений: управление гостями, задачами, командой и коммуникациями зачастую осуществляется в разрозненных приложениях, что порождает проблему дублирования данных и потери контекста. Традиционные подходы, основанные на использовании табличных редакторов, мессенджеров и бумажных чек-листов, не способны обеспечить единое информационное пространство мероприятия: централизованный учёт гостей с их статусами подтверждения, контроль выполнения задач с назначением ответственных и сроков, а также оперативное информирование всех участников команды о текущем состоянии подготовки. Недостаточная интеграция таких инструментов приводит к снижению эффективности организационного процесса, увеличению количества ошибок и потере критически важной информации на этапах планирования. В связи с этим актуальной научно-практической задачей является создание архитектуры мобильного приложения, способной объединить все аспекты управления мероприятием в едином контексте и обеспечить оперативное взаимодействие между участниками в режиме реального времени.

Анализ существующих аналогов (Eventbrite, Trello, Google Sheets в связке с мессенджерами) показал, что ни одно из представленных решений не обеспечивает полного покрытия жизненного цикла мероприятия в рамках единого мобильного приложения. Платформы продажи билетов ориентированы на публичные мероприятия и не предоставляют инструментов для внутренней координации команды. Универсальные менеджеры задач лишены доменной специфики: понятий «гость», «приглашение», «рассадка» или «шаблон мероприятия». Таким образом, разработка специализированного решения, объединяющего функции управления задачами, гостевыми списками, командной работой и коммуникациями в контексте конкретного мероприятия, является обоснованной.

Разрабатываемое решение основано на клиент-серверной архитектуре с применением REST API и токенной авторизации, что позволяет строго разделить логику представления и обработки данных.

Серверный слой (REST API). Центральным узлом обработки данных выступает сервер на основе платформы Node.js с фреймворком Express.js [1]. Каждое взаимодействие мобильного клиента с системой (создание мероприятия, управление задачами, отправка приглашений, обмен сообщениями) инкапсулируется в HTTP-запрос и направляется на соответствующий маршрут API. Серверная часть содержит 44 файла маршрутов, покрывающих все функциональные модули приложения, и набор вспомогательных утилит (usersHelper, tasksHelper, emailHelper, paymentHelper), инкапсулирующих повторно используемую бизнес-логику. Это позволяет реализовать чёткое разделение ответственности: сервер выполняет проверку входных данных, проверку прав доступа через middleware-слой и бизнес-логику, а клиент отвечает исключительно за представление и пользовательское взаимодействие. Использование пула соединений MySQL2 в режиме Promise обеспечивает асинхронную обработку запросов к базе данных без блокировки основного потока событий (Event Loop) Node.js, что критично при одновременной работе множества пользователей. Middleware-компонент authMiddleware выполняет верификацию JWT-токена при каждом защищённом запросе, извлекая идентификатор пользователя из поля sub токена и помещая его в объект запроса для дальнейшей обработки маршрутами.

Реляционное ядро (MySQL). Для моделирования предметной области применяется реляционная база данных MySQL, структура которой отражает доменную модель системы управления мероприятиями. Пользователи, мероприятия, задачи, гости, приглашения и шаблоны представляются в виде связанных таблиц с внешними ключами, обеспечивающими ссылочную целостность. Ключевым элементом архитектуры данных является связующая таблица user_event_mapping, реализующая ролевую модель доступа: каждому участнику мероприятия назначается роль с определённым набором прав (управление гостями, создание и назначение задач, приглашение новых членов команды, отправка сообщений). Данная модель позволяет одному пользователю участвовать в нескольких мероприятиях с различными ролями, а одному мероприятию – иметь несколько организаторов с дифференцированными правами доступа. В отличие от неструктурированных и документо-

ориентированных хранилищ, реляционная модель обеспечивает целостность данных через механизмы транзакций и каскадных ограничений (ON DELETE CASCADE, ON UPDATE CASCADE), что критично для системы, где несколько организаторов параллельно вносят изменения в одно мероприятие. Подключение к базе данных организовано через модуль config/db.js, формирующий пул соединений с параметрами, вынесенными в конфигурационный файл, что упрощает переключение между средами разработки и продакшена.

Слой авторизации и безопасности. Система авторизации построена на базе JSON Web Tokens (JWT) и реализует стандартную схему «access token + refresh token». При первичной аутентификации пользователь передаёт учётные данные (email и пароль), пароль верифицируется с помощью алгоритма bcrypt, после чего сервер генерирует подписанный JWT-токен с использованием секретного ключа, хранящегося в конфигурационном файле. Каждый последующий запрос к защищённым эндпоинтам проходит через middleware authMiddleware, который декодирует токен, проверяет его корректность и срок действия, а затем извлекает идентификатор пользователя для дальнейшей авторизации на уровне бизнес-логики. На мобильном клиенте управление сессиями реализовано через модуль SessionManager, использующий React Native Keychain для безопасного хранения токенов в защищённом хранилище операционной системы (Keychain на iOS, Keystore на Android), что предотвращает компрометацию учётных данных при несанкционированном доступе к файловой системе устройства [2].

Слой уведомлений (Push Notifications). Для обеспечения оперативного информирования пользователей о значимых событиях применяется сервис Firebase Cloud Messaging (FCM) [3]. Серверный модуль FirebaseNotificationManager инкапсулирует логику формирования и отправки push-уведомлений. При возникновении триггерных событий (новое приглашение в команду, изменение статуса задачи, новое сообщение в чате мероприятия, подтверждение присутствия гостем) серверная часть формирует структурированное push-уведомление с указанием типа события и идентификатора связанной сущности, после чего направляет его на зарегистрированные FCM-токены устройств целевых пользователей. На стороне мобильного клиента модуль NotificationHandler управляет регистрацией FCM-токена, обработкой входящих уведомлений в режимах foreground и background, а также навигацией к соответствующему экрану приложения при нажатии на уведомление. Библиотека Notifee обеспечивает отображение локальных уведомлений с расширенным функционалом: кастомные каналы уведомлений, счётчик непрочитанных сообщений (badge count) и группировка уведомлений по мероприятиям. Помимо push-уведомлений, система реализует email-оповещения через модуль emailHelper с использованием библиотеки Nodemailer и SMTP-протокола, что обеспечивает доставку приглашений и важных уведомлений пользователям, временно не имеющим доступа к мобильному приложению.

Слой монетизации и масштабирования. Система предусматривает три тарифных плана подписки – Basic, Advanced и Premium, – управляемых через сервис RevenueCat с нативной интеграцией в App Store и Google Play. Каждый тарифный план определяет лимиты использования ключевых сущностей системы: количество одновременных мероприятий (от 5 до 100), задач на мероприятие (от 100 до 10 000), гостей (от 50 до 5 000) и членов команды (от 5 до 500). Middleware-компонент checkUserLimits осуществляет двухуровневую проверку лимитов на стороне сервера: первый уровень проверяет соответствие базовому тарифу, второй – премиальному. При превышении лимитов сервер возвращает структурированный ответ с кодом ошибки и информацией о текущем тарифе, позволяя клиенту отобразить пользователю предложение об обновлении подписки. Обработка платежей за разовые услуги выполняется через платёжный шлюз BePaid с поддержкой мультивалютности (USD, BYN, RUB, EUR), логика которого инкапсулирована в модуле paymentHelper. Такой подход позволяет гибко масштабировать функциональные возможности приложения без изменения базовой архитектуры и кодовой базы.

Слой шаблонов и повторного использования. Важной архитектурной особенностью системы является модуль шаблонов, позволяющий пользователям сохранять структуру мероприятия (набор задач, категории гостей, роли команды) в качестве повторно используемого шаблона. При создании нового мероприятия на основе шаблона система автоматически генерирует все связанные сущности, что существенно сокращает время подготовки для организаторов, регулярно проводящих однотипные мероприятия. Данный механизм реализован через серверные маршруты, копирующие структуру шаблона с генерацией новых идентификаторов и привязкой к текущему пользователю.

Техническая реализация. Серверная часть системы реализована на платформе Node.js с применением фреймворка Express.js, обеспечивающего высокую скорость маршрутизации HTTP-запросов и поддержку цепочек middleware-обработчиков. Сервер запускается на порту 3001 с настроенной политикой CORS для обработки кросс-доменных запросов от мобильного клиента. Авторизация реализована через JWT-токены (библиотека jsonwebtoken) с хешированием паролей алгоритмом bcrypt. Для обработки загрузки медиафайлов (аватары пользователей, изображения мероприятий) используется библиотека Multer с настраиваемыми ограничениями по размеру и типу файла, а для последующей оптимизации изображений – библиотека Sharp, выполняющая компрессию и масштабирование без потери качества. Статические файлы загрузок обслуживаются через

Express.static из директории /uploads. Поддержка мультиязычности интерфейса (русский и английский языки) реализована через библиотеку i18n, определяющую язык пользователя по заголовку Accept-Language и подставляющую соответствующие строковые ресурсы в серверные ответы. Развёртывание серверной части осуществляется через CI/CD-пайплайн на основе GitHub Actions с автоматической доставкой по протоколу FTP на хостинг CloudLinux, что обеспечивает непрерывную интеграцию и сокращает время доставки обновлений до минут.

Клиентское приложение реализовано на фреймворке React Native версии 0.72.14, что позволяет использовать единую кодовую базу JavaScript/TypeScript для платформ iOS и Android, обеспечивая при этом нативный пользовательский опыт и доступ к аппаратным средствам устройства. Навигация построена на React Navigation 6.x с комбинацией Stack-навигатора для иерархических экранов и BottomTab-навигатора для основных разделов приложения. Глобальное состояние текущего мероприятия управляется через React Context API (EventContext), обеспечивая доступ к данным события из всех связанных экранов без необходимости передачи параметров через пропсы. Для хранения несущественных данных сессии используется AsyncStorage, а учётные данные (JWT-токены) защищаются через React Native Keychain с аппаратным шифрованием. Сетевой слой клиента реализован через библиотеку Axios с централизованной конфигурацией базового URL и интерцепторами для автоматического добавления токена авторизации к каждому запросу. Для улучшения пользовательского опыта применяются анимированные индикаторы загрузки на основе Lottie, визуализация статистики через react-native-chart-kit, а также интерактивные модальные панели с использованием @gorhom/bottom-sheet. Модуль Urls.js содержит 52 определения API-эндпоинтов, обеспечивая централизованное управление адресами серверных ресурсов и упрощая миграцию между средами.

Результаты и выводы. Предложенный подход к построению системы управления мероприятиями позволяет достичь следующих результатов:

– сокращение времени организации мероприятия за счёт объединения управления задачами, гостями, командой и коммуникациями в едином приложении с общим контекстом события, а также за счёт механизма шаблонов, позволяющего повторно использовать структуру ранее проведённых мероприятий;

– повышение координации между организаторами благодаря ролевой модели доступа с дифференцированными правами, встроенному мессенджеру с push-уведомлениями и системе отслеживания статусов задач в реальном времени, что исключает информационные потери на этапе подготовки;

– обеспечение масштабируемости платформы через тарифную систему подписок с двухуровневой серверной проверкой лимитов, позволяющую обслуживать как единичные мероприятия с десятками гостей, так и масштабные проекты с тысячами участников и сотнями задач без изменения архитектуры системы;

– снижение порога входа для организаторов за счёт кроссплатформенности мобильного приложения (iOS и Android из единой кодовой базы), мультиязычного интерфейса и интуитивной навигации с контекстной привязкой всех действий к выбранному мероприятию.

Таким образом, применение модульной клиент-серверной архитектуры с разделением ответственности между REST API на базе Node.js/Express.js, реляционной базой данных MySQL с ролевой моделью доступа и сервисом push-уведомлений Firebase Cloud Messaging является эффективным решением для создания современных интеллектуальных систем управления мероприятиями.

Разработанная архитектура позволяет автоматизировать процесс планирования и координации мероприятий, снизить нагрузку на организаторов за счёт делегирования задач и автоматического контроля их выполнения, обеспечить безопасность пользовательских данных через JWT-авторизацию и аппаратное шифрование учётных данных, а также повысить вовлечённость команды посредством предоставления актуальной и контекстно-зависимой информации о ходе подготовки события через многоканальную систему уведомлений.

Список использованных источников:

1. Express.js Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://expressjs.com. – Дата доступа: 10.03.2026.

2. React Native Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://reactnative.dev. – Дата доступа: 15.03.2026.

3. Firebase Cloud Messaging [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://firebase.google.com/docs/cloud-messaging. – Дата доступа: 20.03.2026.

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИМИ ПРОЦЕССАМИ СЕТИ РЕСТОРАНОВ

Золотницкий А.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куприянова Д.В. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В работе рассматривается разработка мобильного приложения для автоматизации внутренних процессов сети ресторанов, обеспечивающего взаимодействие между сотрудниками заведения и его посетителями.

В современных условиях ресторанный бизнес предъявляет высокие требования к скорости обслуживания, координации персонала и эффективности управления ресурсами. Качество организации внутренних процессов напрямую влияет на удовлетворенность гостей, производительность сотрудников и финансовые показатели предприятия.

Несмотря на развитие цифровых технологий, во многих заведениях по-прежнему используются разрозненные инструменты учета, такие как бумажные записи, электронные таблицы или несвязанные программные решения [1]. Это приводит к ошибкам при оформлении заказов, усложняет управление сменами, снижает прозрачность складского учета и затрудняет взаимодействие между подразделениями. В связи с этим актуальной задачей является разработка единой информационной системы, обеспечивающей автоматизацию ключевых процессов ресторана.

Разрабатываемое приложение включает две основные подсистемы: пользовательскую и служебную. Пользовательская часть ориентирована на гостей ресторана и предоставляет следующие возможности: просмотр меню, бронирование столиков, оформление заказов не ожидая официанта, запрос счета, оставление отзывов и чаевых. Реализация данного функционала позволяет сократить время ожидания обслуживания и снизить нагрузку на персонал, особенно в периоды высокой загруженности.

Служебная часть предназначена для сотрудников и реализована с учетом их ролей. Официанты используют мобильное приложение для оформления заказов и передачи их на кухню. Кухонный персонал получает заказы в режиме реального времени и отмечает их готовность, после чего система автоматически уведомляет официанта. Это обеспечивает оперативное взаимодействие между подразделениями и снижает вероятность ошибок. Администраторы имеют доступ к расширенному функционалу, включающему управление сменами сотрудников, контроль выручки за различные периоды, формирование табелей учета рабочего времени, управление складскими запасами, настройку системы штрафов.

Одной из особенностей разработанного приложения является наличие встроенного тренажера для персонала. Он реализован в виде системы тестирования и предназначен для изучения меню.

Тренажер позволяет сотрудникам проверять знания состава блюд, их характеристик и особенностей приготовления.

Архитектура приложения основана на использовании React Native [2] в качестве клиентской платформы, что позволяет разрабатывать кроссплатформенное мобильное приложение для операционных систем Android и iOS на основе единой кодовой базы. Применение компонентного подхода обеспечивает модульность системы и упрощает ее масштабирование.

Серверная часть реализована с использованием платформы Firebase [3]. Для хранения данных применяется Firebase Firestore, обеспечивающая работу с данными в режиме реального времени и синхронизацию между клиентами.

Аутентификация пользователей осуществляется с помощью Firebase Authentication, что обеспечивает безопасный доступ к системе.

Для обработки событий используются Firebase Cloud Functions, позволяющие автоматически реагировать на изменения данных. Для доставки уведомлений применяется Firebase Cloud Messaging, обеспечивающий отправку push-уведомлений.

Разработанное мобильное приложение позволяет автоматизировать ключевые процессы ресторанного бизнеса, повысить эффективность взаимодействия между сотрудниками и улучшить качество обслуживания гостей.

Список использованных источников:

1. Л. Л. Закамская Моделирование процессов обслуживания в ресторанах с учетом потребностей гостей // Сборник материалов XII Всерос. научно-практической конференции с международным участием, 21-24 апр. 2020 г., Кемерово. - Кемерово: ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», 2020.

2. Firebase [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://firebase.google.com. – Дата доступа: 15.01.2026.

3. React Native Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://reactnative.dev/docs. – Дата доступа: 05.01.2026.

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ И БЛОКЧЕЙН В УПРАВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНЫМ АВТОМОБИЛЕМ

Селезнёв А.И., аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Вишняков В.А. – д-р техн. наук, профессор

В работе рассматривается применение Интернета вещей, нейронных сетей и блокчейн для управление беспилотным автомобилем. Анализируются особенности каждой из технологий и обсуждаются их недостатки.

Введение. Развитие беспилотных транспортных средств требует комплексного подхода к интеграции различных технологических решений. Беспилотный автомобиль (БА) в общем случае является наземным беспилотным транспортным средством, оснащенным рядом сенсоров(датчики), ИИ для обработки данных и навигационным модулем. Наиболее актуальными интеграционными решениями для БА являются нейронные сети, Интернет вещей (Internet of Things, IoT) и технология блокчейн.

Важным понятием в управлении БА являются интеллектуальные транспортные системы (ИТС) – это системы, использующие различные технологии автоматизации, компьютеры, системы управления и связи для повышения безопасности и эффективности транспорта, а также для повышения энергоэффективности и экологичности. Беспилотные автомобили в свою очередь включают в себя широкий спектр разнообразных технологий, касающихся электроники, динамики транспортных средств, связи, управления, датчиков и правильного понимания инстинктов поведения человека на дороге [1].

Интернет вещей в БА. Экосистема Интернета вещей для беспилотных систем, в которой вычислительные, коммуникационные и управляющие технологии тесно связаны, известна как киберфизическая система (КПС). Решения Интернета вещей, облегчающие связь между транспортными средствами, являются строительными блоками интеллектуальных транспортных систем. Система ИТС–Интернет вещей образует экосистему с сенсорными системами, системами мониторинга и системами отображения. Применительно к БА IoT платформа имеет следующие уровни:

1. Уровень восприятия. Он включает в себя все необходимое оборудование, включая датчики, исполнительные механизмы, процессоры и встроенное программное обеспечение, которые собирают разнообразные данные из физического мира.

2. Сетевой уровень. Включает в себя все беспроводные технологии, такие как Wi-Fi и сотовые технологии, включая 4G, 5G, 6G, а также протоколы связи, такие как MQTT, которые обеспечивают связь между уровнем устройства и облачным уровнем.

3. Уровень обработки. Выступает в качестве промежуточного программного обеспечения, этот уровень отвечает за обработку данных, полученных от предшествующих уровней.

4. Прикладной уровень, также называемый облачным уровнем IoT, это самый верхний уровень, содержащий важные серверы или облака для хранения и анализа данных. Кроме того, для связи и управления устройствами используется программное обеспечение для взаимодействия с людьми, системами и вещами, обеспечивая управление «подключенными устройствами». Он действует как централизованная система управления.

Экосистема Интернета вещей состоит из шести компонентов, взаимодействующих между собой: транспортное средство, человек, персональное устройство, сетевая инфраструктура, датчик и придорожное устройство. В такой обширной экосистеме IoT происходит многоуровневый обмен данными между всеми подключенными устройствами, которые являются ее частью. Шесть типов взаимодействий D2D (device-to-device) [2], включают взаимодействие между транспортными средствами (V2V), взаимодействие между транспортным средством и персональным устройством (V2P) (или взаимодействие между транспортным средством и человеческими устройствами, V2H), взаимодействие между транспортным средством и придорожным устройством (V2R), взаимодействие между транспортным средством и датчиком (V2S), взаимодействие между транспортным средством и инфраструктурой (V2I), взаимодействие между придорожным устройством и персональным устройством (R2P), взаимодействие между придорожными устройствами (R2R) и взаимодействие между датчиками и исполнительными механизмами (S2A).

Internet of Vehicles (IoV) и Internet of Autonomous Vehicles (IoAV) являются ответвлениями IoT для БА. Основные недостатки IoV:

1. Безопасность и конфиденциальность. IoAV предполагает обмен личной информацией пользователя, такой как местоположение и идентификационные данные, для получения точных результатов. Поскольку доступ к IoV осуществляется с множества устройств, он включает в себя различные технологии и сервисы, что делает его уязвимым для DDoS-атак и других вредоносных рисков. Различные части беспилотного автомобиля, такие как камеры, GPS, датчики, тормоза,

сигнализация, рулевое колесо и педаль акселератора, могут быть удаленно доступны, что ставит под угрозу конфиденциальность пользователей и может даже привести к летальному исходу.

2. Реагирование в реальном времени. Одним из важнейших условий бесперебойной работы сети IoAV является получение необходимой информации и принятие соответствующих решений с использованием максимально быстрой доступной связи, что по-прежнему отстает из-за существующих систем безопасности, которые вносят задержки в сеть из-за интенсивного процесса аутентификации.

3. Проверка данных. Огромный объем данных, генерируемых сетью IoAV, необходимо эффективно собирать, обрабатывать и проверять для предотвращения ложных срабатываний.

4. Надежность. Для эффективной связи IoT с автономными транспортными средствами основным условием является стабильное соединение. Таким образом, сетевые узкие места, DoS-атаки и сбои в связи могут значительно затруднить работу инфраструктуры.

5. Глушение сигнала. Сеть IoAV уязвима для атак с использованием помех, таких как подавление данных, подавление сигнала и подавление GPS.

6. Огромные объемы информации для обработки. Подключенные к сети транспортные средства генерируют приблизительно 1 ГБ данных в секунду, и этот объем будет расти по мере того, как все больше инфраструктуры и устройств подключаются к сети и требуют возможности подключения.

Нейронные сети в БА. В беспилотных автомобилях нашли применения сверточные нейронные сети (CNN) для «восприятия» окружения – непрерывного сканирования и отслеживания окружающей среды с помощью различных типов доступных датчиков, включая радар, лидар или камеры. Существующие алгоритмы восприятия разделяются на:

1. Опосредованное восприятие использует сверточные нейронные сети для обнаружения одного или нескольких изображений и использования их для создания подробной карты окружающей среды беспилотного автомобиля путем анализа расстояний до других транспортных средств, деревьев, дорожных знаков и т. д. Например, беспилотные автомобили могут точно распознавать дорожные знаки с помощью глубоких нейронных сетей с высокой точностью. В других областях, таких как обнаружение полос движения и обнаружение светофоров, точность аналогична при использовании различных структур нейронных сетей. Например, YOLO Darknet v2 [3] может обнаруживать более 9000 объектов с помощью модели CNN с частотой 40–70 кадров в секунду (fps) в реальном времени. Точность обнаружения составляет 80% в реальном времени, чего почти достаточно для обнаружения большинства объектов в автономном вождении. В них реализованы такие методы, как обнаружение границ и анализ значимых элементов, для получения изображений высокого разрешения различных обнаруженных объектов.

2. Прямое восприятие обеспечивает интегрированное понимание сцены и принятие решений. БА создают фрагменты карт (включая расстояния до других транспортных средств и разметку полос) вместо подробной локальной карты или записи траектории. Таким образом, прямое восприятие сразу фокусируется на управлении рулевым колесом и скоростью транспортного средства, минуя начальную локализацию и построение карты.

Основные недостатки CNN для БА:

1. Чувствительность к изменениям условий окружающей среды. CNN могут демонстрировать снижение точности при работе в неблагоприятных погодных условиях (дождь, снег, туман, яркое солнце) или при резком изменении освещения.

2. Зависимость от качества и количества обучающих данных. Для эффективного обучения CNN требуется большой объём размеченных данных. Если набор данных недостаточно разнообразен (например, не включает редкие или экстремальные сценарии), сеть может плохо обобщать на новые ситуации.

3. Проблема переобучения. Глубокие CNN склонны к переобучению, когда модель становится слишком специализированной на обучающих данных и плохо работает с новыми, необученными данными. Это может привести к ошибкам в реальных условиях, когда ситуация отличается от тех, что были в обучающем наборе.

4. Высокие вычислительные требования. CNN, особенно глубокие архитектуры, требуют значительных вычислительных ресурсов для обучения и инференса (обработки данных в режиме реального времени). Это может ограничивать их применение в системах с ограниченными ресурсами или требовать использования мощных GPU/TPU, что увеличивает стоимость системы.

5. Уязвимость к атакам adversarial. CNN восприимчивы к adversarial-атакам – специально созданным возмущениям входных данных, которые незаметны для человека, но могут заставить модель ошибаться. Например, небольшие изменения в изображении дорожного знака могут привести к его неправильной классификации. Это создаёт серьёзные риски для безопасности, так как злоумышленники могут использовать такие атаки для нарушения работы беспилотного автомобиля.

6. Ограниченная способность к контекстному пониманию. Нейронные сверточные сети хорошо справляются с распознаванием статичных объектов, но могут испытывать трудности с пониманием контекста сцены.

7. Проблемы с измерением расстояний. CNN эффективны для обнаружения и классификации объектов, но они не всегда хорошо справляются с определением точных расстояний до них. Это критично для задач, требующих оценки дистанции до препятствий или других участников движения.

8. Длительное время обучения Обучение CNN, особенно на больших наборах данных, может занимать значительное время. Это замедляет процесс разработки и внедрения новых моделей, а также усложняет их адаптацию к быстро меняющимся условиям.

Технология блокчейн в БА. Блокчейн [4] может использоваться в беспилотных автомобилях в следующих сценариях:

1. Технология автономного вождения: данные, полученные от датчиков транспортного средства, хранятся в блокчейне, что позволяет всем сторонам отслеживать и обмениваться информацией о безопасности транспортного средства и способах его использования владельцем более строгим образом, повышая прозрачность информации и снижая риск кражи данных.

2. Телематика – использует технологию блокчейна для обеспечения безопасного и надежного распределения данных и взаимодействия между множеством автономных транспортных средств и другими организациями, такими как региональные власти и общественные учреждения.

При применении технологии блокчейна в БА следует учитывать следующие особенности:

1. Безопасность транспортных средств. Датчики на транспортных средствах используются для обнаружения превышения скорости, оповещения или даже управления транспортным средством, а также для обнаружения постоянного отклонения транспортного средства от курса, чтобы предотвратить неосторожное вождение и снизить количество аварий.

2. Управление авариями. Автоматическое позиционирование и оказание экстренной помощи при аварии являются наиболее важными функциями управления авариями. Благодаря бортовому компьютеру, технологиям беспроводной связи и глобальной спутниковой системе позиционирования, можно в первую очередь отправить сигнал о помощи спасательным организациям при возникновении аварии. Блокчейн может предоставить необходимую информацию и помочь определить точное местоположение транспортного средства и тяжесть аварии, что значительно облегчает спасательные работы в условиях жесткой конкуренции.

3. Мониторинг транспортных средств включает в себя глобальную спутниковую систему позиционирования и технологии беспроводной связи. Он объединяет различные дополнительные услуги, такие как диспетчеризация команд, отслеживание целей, аварийная сигнализация и передача информации, в одном блокчейне. Благодаря целостности данных в системе блокчейна, можно отслеживать маршрут, усталость водителя, перегрузку и аварийную сигнализацию, эффективно повышая достоверность информации.

Проблемы применения блокчейна в БА:

1. Из-за анонимности невозможно подтвердить точность источников данных.

2. Невозможно достичь ситуации, в которой одновременно удовлетворяются требования безопасности, масштабируемости и эффективности выполнения.

Данные блокчейна анонимны и нет способа определить, какому транспортному средству принадлежат данные. Отсутствует технологическая основа блокчейна для мобильной среды сетей беспилотных автомобилей [5], спецификация смарт-контрактов не получила широкого распространения. Данные с датчиков в беспилотных автомобилях или в системах автомобильных сетей V2I (система «автомобиль-инфраструктура», «автомобиль-дорога»), V2N (система «автомобиль-сеть»), V2V (система «автомобиль-автомобиль»), V2P (система «автомобиль-пешеход») и V2D (система «автомобиль-устройство») должны регулироваться в виде смарт-контрактов для защиты соответствующих прав, прежде чем они будут добавлены в систему блокчейн. Огромный объем данных, генерируемых различными приложениями, и то, как технология блокчейн работает в инфраструктуре с высокими вычислительными требованиями, также представляют собой проблемы.

Заключение. Таким образом применение каждой из технологий для беспилотного автомобиля позволяет существенно расширить его функционал. Интернет вещей является центральной частью БА, связывая все его сенсоры, бортовые компьютеры и внешнюю среду в единую интеллектуальную сеть. Нейронные сети необходимы для «восприятия» окружения и «осмысления» поступающих данных с сенсоров, так как традиционные алгоритмы обработки не способны справиться с многообразием реальных дорожных ситуаций. Блокчейн нужен для обеспечения надежности и безопасности в беспилотном управлении и взаимодействии с внешней средой.

Список использованных источников:

1. Autonomous Vehicles Enabled by the Integration of IoT, Edge Intelligence, 5G, and Blockchain. Sensors. 2023;23(4):1963.

2. Vermesan, O. Automated driving progressed by internet of things. European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme (2014–2020). 2018.

3. Reddy, P.P. Driverless Car-Design of a Parallel and Self-Organizing System; EasyChair Preprint no. 1248; EasyChair: Manchester, UK, 2019.

4. Bhutta, M.N.M.; Khwaja, A.A.; Nadeem, A.; Ahmad, H.F.; Khan, M.K.; Hanif, M.A.; Song, H.; Alshamari, M.; Cao, Y. A Survey on Blockchain Technology: Evolution, Architecture and Security. IEEE Access 2021, 9, 61048–61073.

5. Jain, S.; Ahuja, N.J.; Srikanth, P.; Bhadane, K.V.; Nagaiah, B.; Kumar, A.; Konstantinou, C. Blockchain and Autonomous Vehicles: Recent Advances and Future Directions. IEEE Access 2021, 9, 130264–130328.

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА ПОИСКА ОБЪЕКТОВ НА ВИДЕО С ПОМОЩЬЮ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД

Мальченко А.Е., Шапутько А.Е., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Перцев Д.Ю. – канд. техн. наук, доцент

В работе рассмотрена архитектура системы детекции объектов в видеопотоке с возможностью голосового выбора целевых классов для обнаружения. Проведён анализ интеграции нейросетевой модели YOLO-World и системы распознавания речи Vosk, реализована многопоточная обработка для обеспечения работы в реальном времени. Представлены результаты тестирования производительности и точности системы.

Детекция объектов в контексте обработки видеопотока – это процесс автоматического выделения и классификации объектов на кадрах видео в реальном времени. Целью работы ставится создание интуитивного интерфейса взаимодействия человека с системой компьютерного зрения, позволяющего динамически менять целевые классы для обнаружения без перезагрузки модели [1].

Для детекции объектов разработан ряд нейросетевых архитектур. Из-за того, что универсального решения для всех сценариев не существует, при разработке системы необходимо проведение анализа методов и понимание специфики выбранной области, на основе чего выбирается архитектура.

Целью данной работы является разработка системы детекции объектов с голосовым управлением на русском языке, проведение сравнительных тестов производительности на реальных данных и последующая оптимизация для работы в реальном времени.

Алгоритм детекции на базе YOLO-World. YOLO-World (You Only Look Once – World) – это архитектура нейросети для детекции объектов с открытым словарём, позволяющая детектировать объекты по текстовому описанию без дообучения модели [2]. В отличие от классических YOLO-моделей, обученных на фиксированном наборе классов, YOLO-World использует механизм сопоставления текстовых эмбеддингов с визуальными признаками, что позволяет динамически менять список детектируемых объектов.

Данный подход позволяет поделить процесс детекции на два этапа:

1. Извлечение признаков: свёрточная сеть извлекает визуальные признаки из входного кадра.
2. Сопоставление с текстом: механизм внимания сопоставляет визуальные признаки с эмбеддингами целевых классов.

Такой подход корректно работает при наличии небольшого количества целевых классов, что подразумевает фокусировку на конкретных объектах. Большое количество классов приводит к снижению точности и производительности. Для решения данной проблемы существуют следующие способы:

1. Применение фильтрации по порогу уверенности для отсечения ложных срабатываний.
2. Использование YOLO-World для ограничения списка детектируемых объектов.

При тестировании метод применялся для решения задачи поиска конкретных объектов по голосовой команде.

Алгоритм распознавания речи на базе Vosk. Vosk – это оффлайн-система распознавания речи с открытым исходным кодом, основанная на архитектуре Kaldi [3]. Данный метод основан на построении статистической модели языка и акустической модели для преобразования аудиосигнала в текст. Аудиосигналы, имеющие близкие спектральные характеристики, объединяются в фонемы, которые затем сопоставляются со словами словаря.

Для упрощения описания процесса распознавания была введена модель декодирования, где максимумы функции вероятности расположены в точках соответствия аудиосегментов слов. Аудиосегменты, которые принадлежат одному слову, объединяются в текстовую строку.

Дополнительно при работе с данным алгоритмом необходимо выбрать языковую модель под конкретную задачу. Если в качестве модели выбирается русскоязычная (vosk-model-small-ru-0.22), система будет корректно распознавать команды на русском языке. Соответственно, при выборе другой модели, точность распознавания на идентичном аудиопотоке изменится.

Недостатком выбора такой модели является то, что алгоритм требует предварительной настройки порога чувствительности для активации распознавания. Преимущество Vosk заключается в том, что он работает оффлайн и обеспечивает задержку менее 200 мс.

Многопоточная архитектура системы. Развертывания всей системы подразумевает разделение ее на независимые потоки выполнения. Для обеспечения работы в реальном времени выбран подход с четырьмя потоками:

1. GUI-поток обработка событий интерфейса PyQt6 [4], отрисовка кадров.
2. Видеопоток захват кадров, детекция YOLO.
3. Аудио-поток: захват аудио, распознавание Vosk, обработка команд.

4. Поток передачи данных по UART на платформу.

В результате формируется система, где каждый компонент выполняет свою задачу без блокировки остальных. Данный подход полезен для минимизации задержек в конвейере обработки. Одним из способов синхронизации потоков является использование `threading.Lock` для доступа к общим данным и `pyqtSignal` для безопасной передачи данных в интерфейс.

При решении задач в контексте обработки видеопотока данный подход позволяет достичь стабильной частоты кадров. Для корректной работы требуется передача кадров между потоками через копирование данных (QPixmap.copy()), что предотвращает гонки данных.

Сравнительный анализ результатов работы методов проводился на аппаратных системах, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Аппаратные системы

Параметр	**Ноутбук 1**	**Ноутбук 2**
Процессор	Intel Core i5	AMD Ryzen 5 4600H
ОЗУ	8 ГБ	16 ГБ
Видеокарта	Интегрированная	NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti (4 ГБ)
Распознавание речи, с.	0.14	0.14
Полный цикл: аудио и детекция	4.20	3.92

Результаты проведенного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анализа

Метрика	**Ноутбук 1**	**Ноутбук 2**
Общий FPS системы (640×480), кадров/с.	4–20	24.27
Время обработки кадра, мс.	30–40	25–35
Обработка аудио-блока, мс.	46.8–74.0	40–65
Распознавание речи, с.	0.14	0.14
Полный цикл: аудио и детекция	4.20	3.92

Метод оптимизации модели удовлетворительным образом решает задачу повышения производительности. Алгоритм перехода на nano-версию модели детекции объектов и распознавания голоса относительно точно сохраняет точность детекции при значительном приросте FPS (было 10 FPS, стало 20-24 FPS).

Алгоритмы YOLO-World и Vosk имеют схожий результат при интеграции с общими слабыми местами: оба метода склонны к снижению точности при высоком уровне шума во входных данных. При работе с обоими алгоритмами необходима качественная предобработка, если техническими требованиями определена высокая точность распознавания.

Метод динамической смены классов при определённых условиях может создавать избыточную нагрузку: частые вызовы `set_classes()` приводят к перезагрузке весов модели, что малозаметно при редких командах, но становится критичным при частом переключении.

Заключение. Таким образом, решение о применении каждого алгоритма необходимо принимать на основе специфики задачи и условий эксплуатации системы. Обработка видеопотока в реальном времени – это процесс с большим количеством нестабильных условий, под которые постоянно необходимо подстраиваться и минимизировать их последствия. Поэтому оптимальным выбором при решении задач по детекции объектов с голосовым управлением является комбинирование всех алгоритмов под определенную задачу.

Список использованных источников:

1. What is object detection [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.ibm.com/think/topics/object-detection – Дата доступа: 25.03.2026.

2. YOLO-World: Real-Time Open-Vocabulary Object Detection [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://github.com/AILab-CVC/YOLO-World – Дата доступа: 25.03.2026.

3. Vosk: Offline speech recognition toolkit [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://alphacephei.com/vosk/ – Дата доступа: 25.03.2026.

4. PyQt6 Documentation [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt6/ – Дата доступа: 25.03.2026.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ DEEPLABV3+

Антоненко А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Перцев Д.Ю. – канд. техн. наук, доцент

Описано программное средство для попиксельной классификации спутниковых снимков. Обсуждается модель DeepLabV3+ с энкодером ResNet-50, анализируются результаты работы модели.

Спутниковые снимки применяются при мониторинге окружающей среды, в сельском хозяйстве и картографии [1]. Ручной анализ таких изображений трудоёмок, поэтому возникает потребность в автоматизации с помощью нейросетевых методов.В данной работе для попиксельной классификации спутниковых снимков используется архитектура DeepLabV3+ [2] с энкодером ResNet-50 [3], предобученным на ImageNet. Модуль ASPP извлекает контекст на нескольких масштабах, а декодер восстанавливает пространственные границы объектов.

Энкодер ResNet-50 состоит из свёрточных остаточных блоков, каждый из которых реализует обходное (skip) соединение, позволяющее градиенту проходить через десятки слоёв без выраженного затухания. Это особенно важно при обучении на спутниковых снимках, где требуется одновременно учитывать локальные детали (границы объектов, тонкие линейные структуры) и крупномасштабный контекст сцены. В архитектуре DeepLabV3+ последние блоки энкодера работают с атрозными свёртками (dilated convolutions) с коэффициентами расширения 6, 12 и 18, что увеличивает рецептивное поле без дополнительного понижения пространственного разрешения.

Ключевым элементом модели выступает модуль ASPP (Atrous Spatial Pyramid Pooling), который параллельно применяет несколько атрозных свёрток с разными коэффициентами расширения и ветвь глобального усредняющего пулинга. После этого признаки объединяются и проходят последующую обработку, благодаря чему сеть одновременно учитывает мелкие текстурные признаки и глобальные пространственные зависимости.

Декодер DeepLabV3+ принимает высокоуровневые признаки из ASPP и низкоуровневые карты из ранних слоёв энкодера, после чего объединяет их через конкатенацию и последовательность свёрток 3×3. Такое объединение позволяет восстанавливать чёткие границы классов и уменьшать ошибки на стыках объектов. На выходе используется поточечная свёртка 1×1, формирующая карту вероятностей для каждого класса земного покрова. Далее применяется операция выбора максимальной вероятности по канальному измерению, что даёт итоговую попиксельную разметку снимка.

Модель обучалась на семи классах земного покрова: фон, город, облака, поля, песок, деревья, вода. Функция потерь состоит из трёх слагаемых: кросс-энтропия ($\alpha = 0{,}3$), индекс Жаккара ($\beta = 0{,}5$) и фокальная потеря ($\gamma = 0{,}2$). Веса классов рассчитаны обратно пропорционально частоте встречаемости, что компенсирует дисбаланс между доминирующими и редкими категориями. Аугментации нарастают постепенно – от простых отражений и поворотов на 90° в начале обучения до масштабирования, яркостных искажений и упругих деформаций к концу.

Обучение выполнялось на GPU NVIDIA GeForce RTX 5060 с 8 ГБ видеопамяти. Установлен эффективный батч 16 (физический 4 × аккумуляция 4), включена смешанная точность (формат bfloat16), выбран планировщик OneCycleLR с начальным значением LR, равным $5 \cdot 10^{-4}$.Всего было запланировано 70 эпох при разрешении 384×384; однако ранняя остановка сработала на 53-й эпохе.

Лучший средний IoU составил 0,8679 на 29-й эпохе, а показатель F-score – 0,9220. Наивысшую точность IoU показал класс «Песок» со значением 0,98, в то время как для классов «Город» и «Облака» этот показатель составил около 0,88. Слабее всего распознается «Фон» со значением 0,46.

Для практического применения создан интерфейс пользователя с использованием PyQt6, в котором реализована загрузка снимков, пакетная обработка, отображение масок, а также статистики по классам. Поддерживается ансамбль нескольких чекпоинтов.

Использование DeepLabV3+ с комбинированной функцией потерь обеспечило высокую точность классификации различных категорий земного покрова. Разработанный интерфейс на PyQt6 оптимизирует анализ спутниковых данных, объединяя обработку и визуализацию статистики, а ансамблирование моделей гарантирует устойчивость системы к искажениям в реальных условиях.

Список использованных источников:

1. Chen, L.-C. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation / L.-C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou // Proceedings of the ECCV. – 2018. – P. 801–818.

2. Iakubovskii, P. Segmentation Models Pytorch [Электронный ресурс] / P. Iakubovskii. – Режим доступа : https://github.com/qubvel/segmentation_models.pytorch. – Дата доступа: 25.03.2026.

3. He, K. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He [et al.] // Proceedings of the CVPR. – 2016. – P. 770–778.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ ДОКУМЕНТАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Демидович Р.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куприянова Д.В. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В работе рассматривается разработка программного средства для автоматизации процессов технического мониторинга и сопровождения документации строительных объектов, обеспечивающего эффективное взаимодействие между инженерами, администраторами и заказчиками.

В современных условиях строительная отрасль предъявляет высокие требования к точности контроля технического состояния объектов, оперативности фиксации дефектов и качеству ведения исполнительной документации. Эффективность организации процессов мониторинга напрямую влияет на безопасность эксплуатации объектов, своевременность ремонтных работ и финансовые показатели эксплуатирующих организаций.

Несмотря на развитие цифровых технологий, во многих профильных компаниях по-прежнему используются разрозненные инструменты контроля, такие как бумажные журналы осмотра, мессенджеры или несвязанные программные решения. Это приводит к потере данных о дефектах, усложняет отслеживание динамики изменений и снижает прозрачность отчетности. В связи с этим актуальной задачей является разработка единого программного средства, обеспечивающего автоматизацию ключевых процессов технического сопровождения объектов.

Разрабатываемое программное средство включает две основные части: мобильный клиент и серверную подсистему. Мобильная часть ориентирована на инженеров, проводящих полевые обследования, и предоставляет следующие возможности: фиксация дефектов с привязкой к конструктивным элементам, работа с планами этажей в режиме реального времени, мультимедийное сопровождение осмотров (фотофиксация и аудиозаметки). Реализация данного функционала позволяет сократить время на проведение обследований и снизить вероятность потери первичных данных при работе на объекте.

Служебная часть (backend) предназначена для управления и синхронизации системы, реализована с учетом ролевой модели доступа. Администраторы используют функционал для управления организациями и пользователями. Инженеры через систему получают доступ к актуальным планам и истории дефектов по конкретным объектам.

Одной из особенностей разработанного программного средства является наличие модуля автоматизированной генерации отчетности. Он реализован в виде системы формирования документов и предназначен для подготовки актов технического осмотра.

Модуль позволяет автоматически преобразовывать накопленные данные о дефектах в структурированные документы форматов DOCX и PDF в соответствии с заданными шаблонами.

Архитектура программного средства основана на использовании языка Kotlin [1] и Android SDK [2] в качестве клиентской платформы, что позволяет разрабатывать производительное мобильное приложение с глубокой интеграцией аппаратных функций устройства. Применение модульного подхода обеспечивает расширяемость системы и упрощает внедрение новых типов аналитических расчетов.

Серверная часть реализована с использованием фреймворка Spring Boot [3]. Для хранения структурированных данных применяется реляционная СУБД PostgreSQL, обеспечивающая целостность информации и высокую скорость выполнения сложных запросов.

Аутентификация пользователей осуществляется с помощью механизмов Spring Security и JWT-токенов, что обеспечивает безопасный и разграниченный доступ к системе.

Для обработки бизнес-логики и работы с медиаконтентом используются сервисы интеграции с S3-хранилищами, позволяющие надежно хранить файлы больших объемов.

Разработанное программное средство позволяет автоматизировать ключевые процессы технического надзора, повысить эффективность взаимодействия между участниками строительства и улучшить качество сопровождения эксплуатационной документации.

Список использованных источников:

1. Kotlin Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kotlinlang.org/docs/home.html. – Дата доступа: 12.01.2026.

2. Android Developers: Build for Android [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developer.android.com/docs. – Дата доступа: 15.01.2026.

3. Spring Boot Reference Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.spring.io/spring-boot/docs/current/reference/htmlsingle/. – Дата доступа: 18.01.2026.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ПОИСКА МЕЛОДИИ ПО НАПЕВУ

Каминский А.В., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Петровский Н.А. – канд. техн. наук, доцент

Рассматривается задача поиска музыкальных произведений по напетому фрагменту мелодии (QBSH). Обсуждаются основные сложности, связанные с вариативностью вокального исполнения и неточностями интонации. Предлагается метод на основе сверточной нейронной сети с контрастивной функцией потерь, использующий хроматические представления аудиосигнала и MIDI-данных. Анализируются результаты экспериментов, демонстрирующие эффективность предложенного подхода для сопоставления напетых мелодий с оригинальными композициями.

Задача поиска мелодии по напеву (Query-by-Singing-Humming, QBSH) является одной из ключевых задач в области музыкального информационного поиска. Пользователь напевает фрагмент мелодии, после чего система должна найти соответствующую композицию в базе данных. Основными трудностями решения задачи являются различия в высоте, а также вариации темпа исполнения.

Основные методы решения задач QBSH состоят в сравнении двух последовательностей признаков. Так, основным способом решения задачи является алгоритм динамического выравнивания по времени (dynamic time warping, DTW). Однако основным недостатком данного подхода является высокая вычислительная сложность ($O(N^2)$).

В данной работе предлагается метод, основанный на сверточной нейронной сети, которая обучается сопоставлять мелодические фрагменты аудио и MIDI в общем пространстве эмбеддингов [1].

Для проведения исследования был взят HumTrans датасет, содержащий midi-представления мелодий, а также соответствующие этим мелодиям напевы пользователей [1].

Для представления мелодии используется хроматическое представление (chroma features), которое отображает энергию сигнала по 12 классам высот, что соответствует количеству нот в одной музыкальной октаве. Хроматическое представление мелодии представлено на рисунке 1.

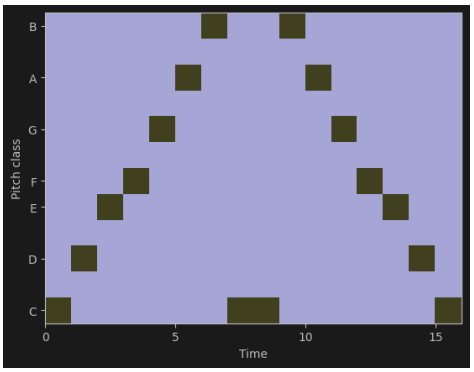


Рисунок 1 – Хроматическое представление мелодии

Поскольку длина мелодий может различаться, применяется разбиение последовательности на перекрывающиеся окна. Размер окна равен 100 с шагом перекрытия 50. Если длина последовательности меньше размера окна, применяется дополнение последовательности нулями (padding).

В предложенной модели для извлечения признаков используется сверточная нейронная сеть ResNet18, являющаяся одной из наиболее известных архитектур глубокого обучения для обработки изображений.

После вычисления эмбеддинга применяется контрастивная функция ошибки (InfoNCE Loss) [2]. Функция потерь используется для обучения сети формировать пространство эмбеддингов, в котором фрагменты одной и той же мелодии располагаются близко друг к другу, а фрагменты различных мелодий - на большем расстоянии. В процессе обучения эмбеддинги группируются по принадлежности к одному и тому же временному окну мелодии: такие эмбеддинги считаются положительными примерами. Одновременно все эмбеддинги, относящиеся к другим мелодиям, рассматриваются как отрицательные примеры. Функция потерь оптимизируется таким образом, чтобы увеличивать сходство между положительными парами и уменьшать сходство между отрицательными:

$$l = -\sum_{k=1}^{K} \sum_{z_k^i, z_k^j \in Z_k} \log \frac{\exp\left(\frac{sim(z_k^i, z_k^j)}{\tau}\right)}{\sum_{z_l \notin Z_k} \exp\left(\frac{sim(z_k^i, z_l)}{\tau}\right)}, \quad (1)$$

где K – количество групп в батче, Z_k – множество эмбеддингов одной группы, z_k^i – эмбеддинг из группы, z_l – эмбеддинг, не принадлежащий группе, $sim(x, y)$ – функция сходства (косинусное сходство), τ – температурный коэффициент, в данной работе равен 0.2.

Обучение производится с использованием оптимизатора Adam. Параметры обучения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры обучения

№ п/п	Параметр	Значение
1	Размер батча	16
2	Размерность выходного эмбеддинга	256
3	Скорость обучения	0.002
4	Количество эпох обучения	100

График обучения нейронной сети представлен на рисунке 3.

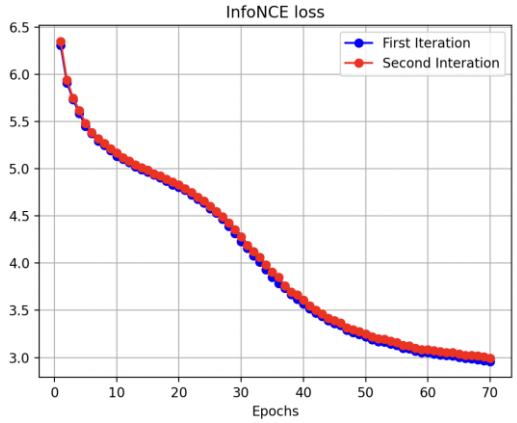


Рисунок 3 – График обучения нейронной сети

Для оценки качества поиска использовались две метрики: точность (accuracy), отражающая долю мелодий из тестовой выборки, которые были корректно распознаны нейронной сетью, и средний обратный ранг (Mean Reciprocal Rank, MRR), характеризующий позицию правильной мелодии в списке всех проранжированных кандидатов. Средний обратный ранг рассчитывается по формуле 2.

$$MRR = \frac{1}{U} \sum_{i=1}^{U} \frac{1}{rank_i}, \quad (2)$$

В результате проведённых экспериментов нейронная сеть продемонстрировала результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты обучения нейронной сети

№ п/п	Параметр	Значение
1	Accuracy	0.82
2	MRR	0.52

Точность 0.82 означает, что 82 % мелодий из тестовой выборки были корректно распознаны системой. Значение среднего обратного ранга 0.52 указывает на то, что правильная мелодия в среднем находится среди первых позиций в ранжированном списке результатов поиска.

Таким образом, в работе предложен метод решения задачи QBSH на основе сверточной нейронной сети. Использование модифицированной архитектуры ResNet18 позволяет извлекать компактные эмбеддинги мелодических фрагментов.

Список использованных источников:

1. A semi-supervised deep learning approach to dataset collection for query-by-humming task / A. Amatov, D. Lamanov, M. Titov, I. Vovk, I. Makarov, M. Kudinov // https://arxiv.org/pdf/2312.01092, 2023.

2. InfoNCE: Identifying the Gap Between Theory and Practice / E. Rusak, P. Reizinger // https://arxiv.org/pdf/2312.01092, 2025.

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ В ЗАДАЧЕ SLAM

Феденков К. К., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Перцев Д.Ю. – канд. техн. наук, доцент

Рассматривается ряд подходов по решению задачи одновременной локализации и построении карты местности. Анализируются их преимущества, ограничения и оптимальные сферы применения.

В настоящее время большинству автономных систем необходимо ориентироваться на местности в том или ином виде, как следствие, возникает потребность в одновременной локализации и построении карты (simultaneous localization and mapping, SLAM). Показательными примерами приложения SLAM являются системы, ориентирующиеся в пространстве с помощью лидаров и RGB камер: роботы-пылесосы, роботы-курьеры, дроны. Классическим решением задачи SLAM является использование фильтра Калмана и его модификаций [1]. Рассмотрим принцип работы данного фильтра, а также принцип работы его усовершенствованных версий.

KF. Фильтр Калмана – БИХ-фильтр, оценивающий вектор состояния динамической системы, используя ряд неполных зашумленных измерений. Фильтр Калмана оперирует двумя фундаментальными векторами: вектором состояния и вектором наблюдений. Вектор состояния есть искомый вектор, оценку которого необходимо определить, а вектор наблюдений есть данные, получаемые с сенсоров (лидары, камеры). Фильтр работает в цикле предсказание-коррекция. Предсказание выполняется на основе модели движения. На данном этапе используется только вектор состояния, ковариационная матрица состояния и управляющие воздействия. На этапе коррекции выполняется уточнение предсказанного состояния с учетом вектора наблюдений. Однако в чистом виде фильтр Калмана не применим для задачи SLAM поскольку он работает только для линейных систем с гауссовыми шумами, а задача SLAM – нелинейная. Нелинейность задачи SLAM обусловлена нелинейностью модели движения (зависимость от угла поворота выражается тригонометрическими функциями), а также нелинейностью наблюдений (лидары также оперируют углами, а в случае с камерами перевод точки в пиксельные координаты через проективную геометрию содержит в себе деление на глубину, что является нелинейной операцией). Простейшим решением данной проблемы является отказ от глобальной линейности в пользу локальной. В этом и заключается суть расширенного фильтра Калмана.

EKF. Расширенный фильтр Калмана решает проблему нелинейности путем линеаризации нелинейной функции в окрестности текущей оценки состояния, используя ряд Тейлора первого порядка. Само предсказание состояния и ожидаемое наблюдение вычисляются по исходным нелинейным функциям, но распространение ковариации и вычисление усиления Калмана выполняются через якобианы – матрицы частных производных. Это позволяет сохранить структуру фильтра Калмана для нелинейных систем. Отбрасывание членов ряда Тейлора выше первого порядка приводит к тому, что математическое ожидание нелинейной функции, вычисленное через линеаризованное приближение, не равно истинному математическому ожиданию этой функции. Однако EKF постулирует равенство, что вносит систематическую ошибку (смещение) в оценку первого момента. Аналогично, распространение ковариации через линеаризованную модель игнорирует вклад членов второго порядка, что приводит к неверному вычислению второго момента распределения. Как следствие, ковариационная матрица состояния оказывается заниженной относительно истинной дисперсии ошибки оценивания. Это явление известно как loss of consistency – фильтр становится оптимистически несостоятельным, что в пределе ведет к расходимости. В задаче SLAM данная проблема приобретает критический характер по нескольким причинам. Модели движения содержат тригонометрические функции, чьи вторые и высшие производные не ограничены, что делает ошибку линеаризации существенной даже при малых изменениях угла. Осложняющим фактором выступает и то, что линеаризация выполняется не в окрестности истинного состояния, а в окрестности текущей оценки, которая сама содержит ошибку. Это порождает эффект накопления: смещение оценки на предыдущем шаге ухудшает качество линеаризации на текущем, что ведет к дальнейшему росту ошибки. Более того, алгоритм обладает полиноминальной сложностью [2].

FastSLAM. FastSLAM решает проблемы EKF за счет фундаментального изменения структуры оценивания, основанного на технике Rao-Blackwellized фильтрации [3]. Суть подхода заключается в декомпозиции задачи SLAM на две независимые подзадачи: оценка траектории робота выполняется с помощью множества частиц, каждая из которых представляет собой гипотезу о пройденном пути, а оценка карты – через набор независимых фильтров Калмана для каждой точки в рамках каждой частицы. Такая декомпозиция позволяет устранить основной недостаток EKF – необходимость

хранения и обновления полной ковариационной матрицы состояния, связывающей робота и все карточные точки, что снижает вычислительную сложность с квадратичной до линейной относительно числа ориентиров. Важным преимуществом является способность FastSLAM работать с многомодальными распределениями: в отличие от EKF, который аппроксимирует апостериорное распределение единственным гауссовым распределением и неизбежно расходится при неоднозначности оценок, FastSLAM сохраняет множество гипотез о траектории через частицы, каждая из которых поддерживает свою карту. Ошибочные гипотезы отбрасываются на этапе ресэмплинга на основе правдоподобия наблюдений, что обеспечивает встроенную робастность к ошибкам ассоциации данных, критическим для EKF. Однако FastSLAM не лишен недостатков. Основной проблемой является деградация частиц: ресэмплинг приводит к потере разнообразия гипотез, и, если правильная траектория на ранних этапах получила недостаточный вес, она может быть безвозвратно утеряна. Кроме того, декомпозиция задачи предполагает условную независимость точек карты при известной траектории, что означает игнорирование корреляций между ориентирами – в сценариях с замыканием петли это может приводить к субоптимальным оценкам. Наконец, выбор числа частиц остается эмпирической задачей: недостаточное количество ведет к потере точности, избыточное – к неоправданным вычислительным затратам.

DP-SLAM. DP-SLAM (Distributed Particle SLAM) представляет собой дальнейшее развитие идей фильтрации частиц в контексте построения метрических карт занятости [4]. В отличие от FastSLAM, который оперирует картой в виде набора точечных ориентиров, DP-SLAM строит карту в виде сетки занятости, что позволяет отказаться от необходимости выделения и ассоциации ориентиров – проблемы, остающейся критической для EKF и требующей отдельного решения в FastSLAM. Основная идея метода заключается в совместной фильтрации траектории робота и конфигурации карты с помощью фильтра частиц, где каждая частица несет полную гипотезу о карте и о положении робота. Ключевым достижением DP-SLAM стало введение специальной структуры данных – так называемого дерева предков (ancestry tree) с распределенными обновлениями карты, что позволяет избежать полного копирования всей карты для каждой частицы при ресэмплинге. Вместо этого каждая частица хранит лишь список изменений, внесенных в карту относительно родительской частицы, что обеспечивает линейную вычислительную сложность по числу частиц и по площади, обозреваемой сенсором. Метод продемонстрировал способность замыкать петли протяженностью до 250 метров без применения специальных процедур коррекции дрейфа, что свидетельствует о высокой состоятельности оценок. Основным недостатком DP-SLAM является необходимость хранения и поддержания дерева обновлений для всех частиц, что требует значительных объемов памяти, особенно при большом количестве частиц и длительной работе алгоритма. Кроме того, работа с сеткой занятости вместо точечных ориентиров ограничивает разрешение карты вычислительными ресурсами, а в трехмерных сценариях применение метода становится проблематичным из-за экспоненциального роста размерности сетки.

Проведенный анализ показывает, что эволюция фильтрационных методов решения задачи SLAM представляет собой последовательное преодоление ограничений, присущих классическому фильтру Калмана. На сегодняшний день в промышленных и исследовательских системах фильтрационные методы уступили доминирующее положение графовой оптимизации (graph-based SLAM). Такие системы, как Cartographer (Google), ORB-SLAM3, VINS-Mono, LIO-SAM и FAST-LIO2, построенные на решении задачи глобальной нелинейной оптимизации методом наименьших квадратов, обеспечивают состоятельность оценок при замыкании петель и эффективно используют разреженность задачи, достигая линейной вычислительной сложности относительно количества ключевых кадров. Графовый подход устраняет фундаментальную проблему фильтрационных методов – накопление ошибок последовательной линеаризации – за счет хранения всех относительных ограничений между позами и наблюдениями с последующим их одновременным пересчетом [5].

Таким образом, фильтрационные методы сохраняют актуальность в определенных нишах. EKF и его модификации применяются в подводной робототехнике, где частота поступления данных сенсоров невысока, а вычислительные ресурсы строго ограничены. FastSLAM и DP-SLAM в современных системах практически не используются из-за проблем деградации частиц и экспоненциального роста требований к памяти, уступая место более эффективным графовым подходам.

Список использованных источников:

1. Kalman, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems / R. E. Kalman // Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45.

2. Julier, S. J. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators / S. J. Julier, J. K. Uhlmann // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2000. – Vol. 45, no. 3. – P. 477–482.

3. Montemerlo, M. FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem / M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, B. Wegbreit // Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence. – 2002. – P. 593–598.

4. Eliazar, A. I. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks / A. I. Eliazar, R. Parr // Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). – 2003. – P. 1135–1142.

5. Grisetti, G. A tutorial on graph-based SLAM / G. Grisetti, R. Kümmerle, C. Stachniss, W. Burgard // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. – 2010. – Vol. 2, no. 4. – P. 31–43.

СИСТЕМА УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА УЗЛОВ СЕТИ

Слинько А.Г., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куприянова Д.В. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В данной работе представлены ключевые архитектурные решения и особенности разработки системы удаленного мониторинга узлов сети.

Деятельность современных предприятий напрямую зависит от стабильности их IT-инфраструктуры, где отказ любого сетевого узла может нарушить бизнес-процессы. Рост количества серверов, рабочих станций и других устройств делает ручной контроль их ресурсов неэффективным. Отсутствие автоматизированного мониторинга приводит к тому, что сбои обнаруживаются слишком поздно, что может вызвать простой систем и, как следствие, финансовые потери. В связи с этим необходима система удаленного наблюдения, способная в реальном времени отслеживать состояние узлов и оперативно информировать пользователей о возникновении различных событий.

Разрабатываемая система построена по модульной архитектуре, включающей три ключевых компонента: агент (Agent), серверную часть (Backend) и клиентскую часть (Frontend). Такое разделение ответственности позволяет масштабировать и поддерживать каждый элемент независимо. Взаимодействие компонентов системы представлено на рисунке 1.

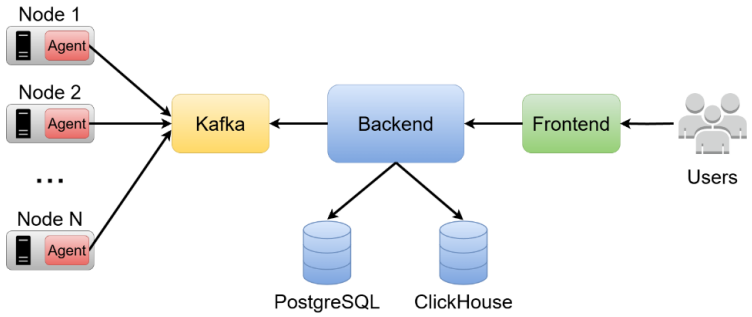


Рисунок 1 – Схема взаимодействия компонентов системы

Агент представляет собой компонент, осуществляющий сбор данных узла, на котором он установлен. Он реализован на языке Go, выбор которого обусловлен кроссплатформенностью, высокой производительностью компилируемого кода, а также стандартной библиотекой, покрывающей множество основных задач, таких как работа с HTTP и JSON. Агент собирает метрики основных ресурсов: центрального процессора, оперативной памяти, дисковой подсистемы и сетевых интерфейсов, передавая их на серверную часть для последующей обработки.

Серверная часть разработана на фреймворке ASP.NET Core, предоставляющем широкий набор средств для разработки масштабируемых и производительных веб-приложений. Данный компонент является центральным элементом системы, предназначенным для приема и обработки данных от агентов, взаимодействия с базами данных, а также предоставления API для управления системой. Для обеспечения дополнительной отказоустойчивости и буферизации передача данных от агентов организована через Apache Kafka [1]. Системная информация хранится в реляционной СУБД PostgreSQL [2], что гарантирует ссылочную и транзакционную целостность данных, в то время как для хранения метрик задействуется колоночная СУБД ClickHouse [3], обеспечивающая высокую скорость вставки и выполнения аналитических запросов по большим объемам данных.

Клиентская часть представляет собой пользовательский интерфейс для работы с системой, взаимодействующий с API серверной части. Данный компонент реализован на фреймворке Vue.js, позволяющем построить модульную архитектуру и достичь высокой отзывчивости за счет реактивного обновления данных. Интерфейс содержит интерактивные инструменты для построения динамических графиков, управления агентами и настройки сценариев оповещения.

Таким образом, была спроектирована и реализована система удаленного мониторинга, предоставляющая возможности непрерывного контроля узлов, своевременного выявления инцидентов и визуализации ключевых показателей в реальном времени.

Список использованных источников:

1. Apache Kafka [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kafka.apache.org/ – Дата доступа: 28.03.2026
2. PostgreSQL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.postgresql.org/ – Дата доступа: 28.03.2026
3. ClickHouse [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://clickhouse.com/ – Дата доступа: 28.03.2026

СОБЫТИЙНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ТУРИСТИЧЕСКИХ ЛОКАЦИЙ НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ И ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Бакунович Н.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куприянова Д.В. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В данной работе рассматривается проектирование и программная реализация интеллектуальной информационной системы, предназначенной для автоматизации процесса формирования персональных рекомендаций в специализированной социальной сети для туристов. Основной акцент сделан на интеграции событийно-ориентированной архитектуры (EDA) и графовых структур данных для анализа пользовательской активности в режиме реального времени.

Традиционные рекомендательные системы на базе SQL не способны оперативно адаптироваться к динамичному контексту пользователя и нагрузкам [1]. Актуальной задачей является создание гибкой архитектуры, преобразующей потоки гео-событий в релевантные персональные рекомендации «на лету». Разрабатываемое решение основано на синтезе распределенного брокера сообщений и графовой базы данных [2, 3], что позволяет разделить процессы сбора данных и их аналитической обработки. Архитектура системы включает следующие ключевые компоненты:

1 Событийный слой (Event Streaming). Центральным узлом обмена данными выступает кластер Apache Kafka [2]. Каждое взаимодействие пользователя с мобильным приложением (гео-позиционирование, создание контента, «лайк», поисковый запрос) инкапсулируется в объект события и направляется в соответствующие топики брокера. Это позволяет реализовать реактивный подход: система не ждет запроса от пользователя, а заранее формирует данные на основе входящего потока событий. Использование механизма разделения данных в Kafka обеспечивает горизонтальное масштабирование системы при росте числа активных узлов до сотен тысяч одновременно.

2 Графовое ядро. Пользователи, интересы и локации представлены в виде узлов графа, а их взаимодействия (подписки, посещения) – в виде динамических ребер. В отличие от реляционных таблиц, графовая модель позволяет выполнять глубокий обход (multi-hop traversal) для поиска сложных ассоциаций, таких как схожие паттерны перемещений разных пользователей [4].

3 Геопространственная фильтрация. Для оптимизации производительности графовые рекомендации проходят через слой пространственной индексации. Использование древовидных структур (например, Quadtree) позволяет мгновенно ограничивать выборку объектов по критерию удаленности от текущих координат пользователя, что критично для мобильных устройств с ограниченными ресурсами [5].

Предложенный подход к построению социальной сети позволяет достичь следующих результатов:

– сокращение времени отклика системы при формировании сложных рекомендаций за счет асинхронной обработки через очереди сообщений;

– повышение точности попадания в интересы пользователя благодаря использованию графовых алгоритмов ранжирования (например, PageRank для локаций);

– обеспечение масштабируемости платформы в периоды пиковой туристической активности.

Таким образом, внедрение событийно-ориентированной архитектуры в сочетании с графовыми структурами данных является эффективным решением для создания современных интеллектуальных туристических сервисов.

Разработанная архитектура позволяет автоматизировать процесс подбора персональных туристических маршрутов, снизить вычислительную нагрузку на серверную часть при масштабировании и повысить вовлеченность пользователей за счет предоставления актуального и контекстно-зависимого контента.

Список использованных источников:

1. Закамская Л. Л. Моделирование процессов обслуживания в условиях цифровизации // Сборник материалов научно-практической конференции. – 2020.

2. Apache Kafka Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kafka.apache.org. – Дата доступа: 10.03.2026.

3. Neo4j Graph Data Platform [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://neo4j.com. – Дата доступа: 20.03.2026.

4. Робинсон, Я. Графовые базы данных: новые возможности для работы со связанными данными / Я. Робинсон, Д. Вебер, Э. Эифрем ; [пер. с англ. А. Слинкина]. – Москва : ДМК Пресс, 2016. – 256 с. (Обоснование графовых моделей).

5. Samet, H. Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures / H. Samet. – San Francisco : Morgan Kaufmann, 2006. – 1024 p. (Обоснование Quadtree и гео-индексов).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ELECTRE I, II И III ПРИ ВЫБОРЕ ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ

Вабищевич А.С., Василёнок М.В., Михайлов К.В., Савич А.С., Якубовская А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Никульшин Б.В. – канд. техн. наук, доцент

В работе выполнен сравнительный анализ методов многокритериального принятия решений ELECTRE I, II и III на примере выбора облачного провайдера. Рассмотрены семь альтернатив и пять критериев с весовыми коэффициентами. Для каждого метода построены графы доминирования, проведён анализ ядра, ранжирования и нечётких отношений достоверности. Показана иерархическая вложенность результатов и обоснованы области применения каждого метода.

При выборе ИТ-инфраструктуры, включая облачных провайдеров и технологические стеки, лицо, принимающее решение, сталкивается с необходимостью одновременного учёта нескольких критериев, часто противоречащих друг другу [1]. В данной работе рассматривается применение семейства методов ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) для анализа семи альтернатив (A1…A7) по пяти критериям: производительность (вес 3), надёжность (вес 4), стоимость (вес 2, минимизация), масштабируемость (вес 3) и простота внедрения (вес 2). Исходная матрица оценок представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица оценок альтернатив по критериям

Альтернатива	C1 (3)	C2 (4)	C3 (2)	C4 (3)	C5 (2)
A1	8	7	4	9	5
A2	9	6	5	8	6
A3	6	9	2	7	4
A4	5	5	8	5	9
A5	7	8	3	7	5
A6	4	4	9	4	8
A7	9	9	1	9	3

Первое поколение (ELECTRE, или ELECTRE I) учитывает только превосходство или эквивалентность в парном покритериальном сравнении [2]. На основе вычисленных индексов согласия и несогласия при порогах P=0,65 и Q=0,30 построен граф доминирования, который приведен на рисунке 1.

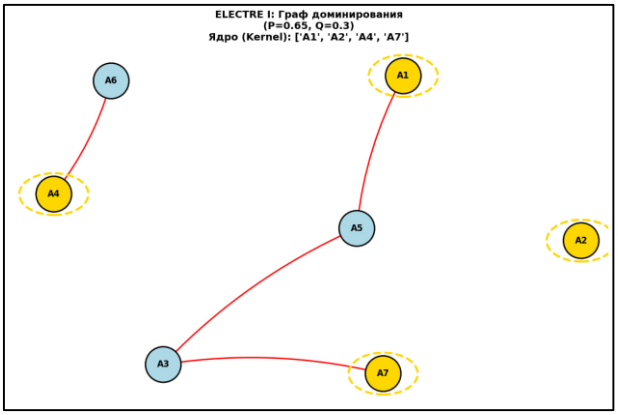


Рисунок 1 – Граф доминирования (ELECTRE I)

На рисунке 1, ядро составили альтернативы A7 и A1. A7 доминирует над всеми остальными, A1 – над A4 и A6. Метод выступает в роли «сита», позволяя сократить число рассматриваемых вариантов.

Методы второго поколения (ELECTRE II) позволяют оценить степень отставания одного критериального показателя от другого при парном сравнении альтернатив [2]. Для построения полного ранжирования применён метод ELECTRE II, в котором вводятся два уровня превосходства: сильное и слабое. В результате процедуры дистилляции получена иерархическая структура, представленная на рисунке 2.

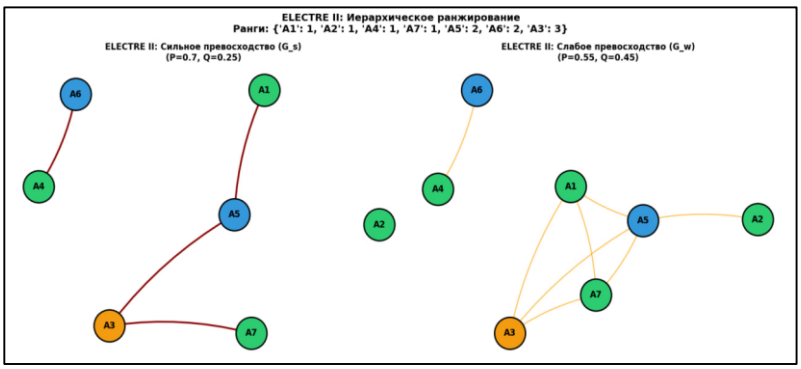


Рисунок 2 – Иерархическое ранжирование (ELECTRE II)

На рисунке 2, ранг 1 присвоен альтернативе A7, ранг 2 – A1, ранг 3 – A2 и A5 (несравнимые между собой), ранг 4 – A3, ранг 5 – A4 и A6. Данный метод обеспечивает наглядное упорядочивание и удобен для презентации результатов.

Наиболее гибким является метод ELECTRE III, учитывающий неопределённость через пороги безразличия q, предпочтения p и вето v. В работе приняты значения: q=1, p=3 для критериев C1, C2, C4, C5 и p=2 для C3, пороги вето v=5 и v=4 соответственно. Построена матрица достоверности превосходства, а на её основе – нечёткий граф, схематичное представление представлено на рисунке 3.

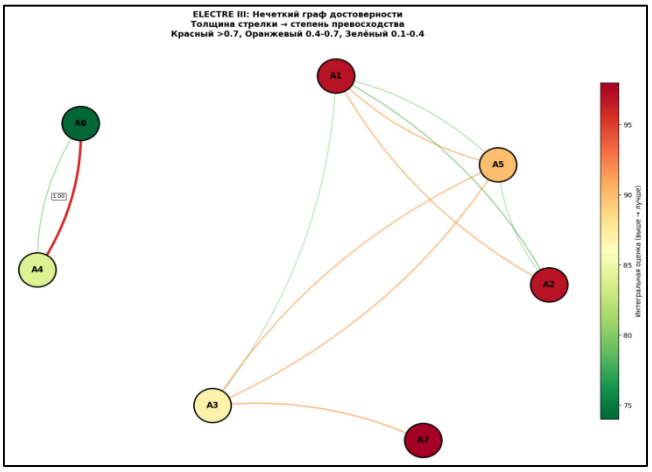


Рисунок 3 – Нечёткий граф достоверности (ELECTRE III)

Достоверность превосходства A7 над другими альтернативами составила от 0,73 до 0,91, что подтверждает её лидерство. Эффект вето в данном наборе данных не проявился.

Сравнительный анализ показал, что результаты методов образуют вложенную структуру: ядро ELECTRE I соответствует верхним уровням ранжирования ELECTRE II, а количественные оценки ELECTRE III подтверждают эти выводы. ELECTRE I целесообразен для первичного отбора, ELECTRE II – для построения иерархии, ELECTRE III – для точного анализа с учётом неопределённости.

Список использованных источников:

1. Figueira, J. ELECTRE Methods: A Survey / J. Figueira, S. Greco, B. Roy // Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. – New York : Springer, 2016. – P. 155–185.

2. Использование методов ELECTRE в задачах принятия решения // CyberLeninka [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-electre-v-zadachah-prinyatiya-resheniya/pdf3. – Дата доступа: 25.03.2026.

СЕКЦИЯ 2

«ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

УДК 616-71:616.728.48:004.42

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ ПЛАТФОРМ И БАЛАНСИРОВОЧНЫХ ДИСКОВ В ДИАГНОСТИКЕ НАРУШЕНИЙ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Глушаченко Н.С., магистрант; Деменковец Д.В., ст. преподаватель

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Бранцевич П.Ю. – д-р техн. наук, профессор

Аннотация. Проведен сравнительный анализ классической стабилометрии на стационарной силовой платформе и инструментальной оценки равновесия с использованием портативного балансировочного диска. Показано, что нестабильная опора эффективнее для выявления скрытых нарушений голеностопного сустава, так как обеспечивает специфическую динамическую нагрузку.

Ключевые слова. Нарушения опорно-двигательного аппарата, голеностопный сустав, стабилометрия, силовая платформа, балансировочный диск, акселерометр, постуральный контроль, реабилитация, биологическая обратная связь.

Современные подходы к диагностике и реабилитации нарушений опорно-двигательного аппарата требуют применения высокоточных методов оценки постурального контроля. Важнейшим биомеханическим звеном, обеспечивающим компенсацию отклонений центра тяжести и удержание равновесия, является голеностопный сустав. Различные патологии данного узла, такие как хроническая нестабильность, последствия перенесенных травм или длительной иммобилизации конечности, приводят к выраженным динамическим ортопедическим нарушениям и сбоям в координации движений.

Для количественной оценки процесса управления позой в клинической практике традиционно применяется метод стабилометрии, фиксирующий колебания центра давления пациента. Тем не менее, классические стабилометрические исследования проводятся в условиях статической стойки на неподвижной опоре. Такой подход информативен для оценки работы вестибулярного аппарата, однако он зачастую не позволяет выявить скрытые функциональные нарушения голеностопа, поскольку сустав не подвергается специфической динамической нагрузке.

Для выявления дефицита подвижности и проблем с управлением голеностопным суставом необходимо создание условий управляемой нестабильности. Эта задача решается путем интеграции в диагностический процесс балансировочных дисков и проведения двигательно-когнитивных тестов с использованием биологической обратной связи, где пациент вынужден целенаправленно изменять углы наклона голеностопа. В связи с развитием портативных акселерометрических систем возникает потребность в четком разграничении диагностического потенциала различного оборудования.

Традиционная силовая платформа представляет собой стационарный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для регистрации положения и колебаний общего центра давления (ЦД) человека, находящегося в статической вертикальной стойке на плоской горизонтальной опоре. Данный метод, известный как классическая стабилометрия, позволяет объективно и количественно оценить стратегии поддержания равновесия, и выявить отклонения в работе постуральной системы.

При проведении исследования высокочувствительные датчики платформы фиксируют координаты смещения ЦД в двумерной системе. На основе полученного массива координат специализированное программное обеспечение вычисляет ряд характеристик позы: общую длину пройденного пути, среднюю скорость перемещения ЦД, площадь доверительного эллипса, а также показатели дисперсии и среднеквадратического отклонения.

Несмотря на статус эталонного инструмента для объективной оценки постурального контроля, стационарные силовые платформы обладают рядом существенных эксплуатационных и клинических ограничений. К числу основных инфраструктурных недостатков относятся высокая стоимость оборудования, его значительные габариты и жесткая привязка к специализированным стационарным медицинским учреждениям [1].

С биомеханической и клинической точек зрения, исследования на статичной жесткой опоре ориентированы преимущественно на оценку вестибулярного аппарата и глобальных механизмов удержания равновесия. При проведении статических проб голеностопный сустав не подвергается выраженной динамической нагрузке и не совершает активных угловых перемещений с большой амплитудой. В результате стационарные силовые платформы оказываются недостаточно чувствительными инструментами для оценки реальной подвижности голеностопа и выявления его скрытой функциональной нестабильности [2].

В качестве современной альтернативы стационарным системам все более широкое применение находят портативные аппаратно-программные комплексы, интегрируемые в балансировочные диски [1]. Ключевым биомеханическим отличием данного подхода является создание условий управляемой нестабильности. При нахождении на качающейся платформе пациент вынужден непрерывно балансировать, что обеспечивает целенаправленную динамическую нагрузку на голеностопный сустав и активно включает в работу локальный мышечно-связочный аппарат [2]. Пример балансировочного диска, используемого в этих целях представлен на рисунке 1.

Рисунок 1 – Балансировочный диск

С технической точки зрения сбор данных на балансировочном диске кардинально отличается от принципов работы силовой платформы. Вместо регистрации пространственных координат центра давления в миллиметрах, диск использует встроенные акселерометры для вычисления углов наклона опоры в градусах [1].

Актуальность и высокая эффективность применения акселерометрических датчиков в постурографии подтверждаются рядом независимых исследований. В работе Dolinay et al. (2014) обоснована возможность создания компактных и экономически доступных диагностических устройств на базе акселерометров. Исследователи продемонстрировали, что портативные модули способны с высокой точностью регистрировать наклоны платформы и транслировать данные в режиме реального времени, выступая полноценной диагностической альтернативой дорогостоящему стационарному оборудованию [1].

Клиническая значимость применения нестабильных платформ именно в ортопедической практике была детально доказана в исследовании Laessoe et al. (2019). Использование инструментального балансировочного диска позволило достоверно дифференцировать здоровых испытуемых и пациентов, страдающих функциональной нестабильностью голеностопа, опираясь на показатели вариативности угла наклона в медиолатеральном направлении. Это подтверждает тот факт, что регистрация угловых отклонений в условиях динамической нестабильности является высокочувствительным методом выявления специфических суставных патологий, которые могут оставаться незамеченными при статических тестах [2].

Сопоставление классических силовых платформ и нестабильных поверхностей выявляет как принципиальные различия в их биомеханическом воздействии, так и существенные сходства в методологии обработки регистрируемых сигналов. Понимание этих особенностей критически важно для выбора оптимального диагностического инструмента [4].

Оба типа оборудования предназначены для количественной оценки процесса управления позой и поддержания равновесия. Несмотря на разную физическую природу получаемых данных, методы их математической обработки имеют высокую степень совместимости. Базовые стабилометрические метрики, изначально разработанные для анализа координат в миллиметрах, математически тождественны при применении к угловым координатам [3]. Кроме того, обе системы могут эффективно интегрироваться с технологиями биологической обратной связи (БОС) для проведения двигательно-когнитивных тестов, где пациент осознанно управляет своим центром тяжести.

Фундаментальная разница между устройствами заключается в типе измеряемой величины и характере создаваемой биомеханической нагрузки.

Сравнение устройств проведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение силовой платформы и балансировочного диска

	Силовая платформа	Балансировочный диск
Измеряемый параметр	ЦД в миллиметрах от центра	Углы наклона от положения равновесия
Характер позы	Статическая	Динамическая (подвижная)
Биомеханический фокус	Вестибулярный аппарат	Голеностопный сустав
Портативность	Высокая	Низкая

Опираясь на выявленные преимущества методов динамической постурографии, был спроектирован и реализован портативный координационно-реабилитационный комплекс. Решение состоит из аппаратного измерительного модуля и специализированного программного обеспечения, функционирующего как система поддержки принятия врачебных решений.

Аппаратная часть комплекса представляет собой компактный встраиваемый блок, который может быть установлен на балансировочный диск произвольной формы и размера. Ключевым сенсором выступает акселерометр, непрерывно регистрирующий углы наклона, отражающие отклонения платформы от горизонтальной плоскости.

Для корректной визуализации движений пациента алгоритм программного средства выполняет математическое преобразование получаемых угловых координат в оконную систему координат устройства отображения. Предварительно проводится обязательная калибровка: программное центрирование осей для нивелирования аппаратных погрешностей датчика и фиксация индивидуальных максимальных углов наклона диска.

Особое внимание при разработке было уделено проблеме низкой мотивации пациентов детского возраста при выполнении рутинных ортопедических упражнений. Для повышения вовлеченности в процесс реабилитации внедрен метод биологической обратной связи (БОС) с элементами геймификации. Пациент, балансируя на нестабильной платформе, управляет на экране монитора визуальным объектом (курсором), стараясь переместить его в заданную мишень и удержать там фиксированное время [5].

Проведенный сравнительный анализ демонстрирует, что традиционная статическая стабилометрия и инструментальная оценка на балансировочных дисках являются не взаимоисключающими, а взаимодополняющими методами количественной оценки постурального контроля.

Силовая платформа остается инструментом выбора для базовой неврологической диагностики, оценки статического равновесия, мониторинга возрастных изменений вестибулярного аппарата и проведения классических стабилометрических проб в условиях лаборатории.

В это же время балансировочный диск наиболее востребован в травматологии, ортопедии и спортивной медицине. Этот метод оптимален для выявления скрытых динамических нарушений голеностопного сустава, реабилитации после травм или длительной иммобилизации. Автономность таких комплексов делает их крайне перспективными для удаленного мониторинга процесса восстановления пациентов на дому, а высокая вариативность движений позволяет использовать их для интерактивных тренировок в педиатрической практике.

Создание управляемой нестабильности позволяет акцентированно воздействовать на голеностопный сустав, выявляя его скрытую функциональную нестабильность и моторный дефицит, которые зачастую не обнаруживаются в статических пробах.

Разработанный аппаратно-программный комплекс успешно интегрирует преимущества нестабильных портативных платформ и современных информационных технологий. Внедрение двигательно-когнитивных тестов с биологической обратной связью в игровой форме решает критическую проблему низкой мотивации у детей при выполнении однотипных реабилитационных упражнений.

Внедрение подобных портативных систем поддержки принятия решений предоставляет врачам-ортопедам объективный оцифрованный инструмент для мониторинга динамики восстановления. Автономность и экономическая доступность комплекса делают его перспективным решением как для стационарного лечения, так и для непрерывного удаленного мониторинга пациентов в амбулаторных условиях.

Список использованных источников:

1. Dolinay J. et al. Posturography device based on accelerometer // Int J Syst Appl Eng Develop. – 2014. – Т. 8. – С. 155-162.

2. Laessoe U. et al. Evaluation of functional ankle instability assessed by an instrumented wobble board // Physical therapy in sport. – 2019. – Т. 35. – С. 133-138.

3. Scoppa F. et al. Clinical stabilometry standardization: basic definitions–acquisition interval–sampling frequency // Gait & posture. – 2013. – Т. 37. – №. 2. – С. 290-292.

4. Гаже П.-М., Вебер Б. Постурология. Регуляция и нарушения положения тела человека. – СПб.: СПбМАПО, 2008. – 316 с.

5. Девялтовская М.Г., Платонов А.В., Козловский Д.А. Биологическая обратная связь с визуальным каналом и стабилометрией: учеб.-метод. пособие. – Минск: БелМАПО, 2021. – 23 с.

UDC 616-71:616.728.48:004.42

A COMPARATIVE ANALYSIS OF FORCE PLATFORMS AND WOBBLE BOARDS IN DIAGNOSING DISORDERS OF THE MUSCULOSKELETAL SYSTEM

Glushachenko N.S., master's student; Demenkovets D.V., senior lecturer

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Brancevich P.J. – Doctor of Technical Sciences, Professor

Annotation. A comparative analysis of classical stabilometry using a stationary force platform and instrumental balance assessment using a portable balance disc was conducted. The results show that an unstable stance is more effective for detecting hidden ankle joint disorders, as it provides a specific dynamic load.

Keywords. Musculoskeletal disorders, ankle joint, stabilometry, force platform, balance disc, accelerometer, postural control, rehabilitation, biofeedback.

УДК 004.9:331.44

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСИРОВКИ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Потёмин И.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Голда О. – канд. экон. наук, доцент

Аннотация. В работе исследуется влияние дисбаланса классов на эффективность алгоритмов машинного обучения. На примере датасета прогнозирования профессионального выгорания проведено сравнение трёх методов балансировки: передискретизации, недодискретизации и взвешивания классов. Экспериментально оценены логистическая регрессия, дерево решений и метод опорных векторов. Установлено, что игнорирование дисбаланса приводит к неспособности моделей выявлять минорный класс при высокой общей точности. Наиболее универсальным решением признано взвешивание классов, обеспечивающее высокую сбалансированную точность и PR-AUC без изменения объёма данных. Результаты формируют рекомендации по выбору стратегии балансировки для задач с неравномерным распределением классов.

Ключевые слова. Машинное обучение, дисбаланс классов, балансировка данных, передискретизация, недодискретизация, взвешивание классов, бинарная классификация, логистическая регрессия, дерево решений, метод опорных векторов, сбалансированная точность, PR-AUC.

В современных задачах машинного обучения дисбаланс классов снижает эффективность моделей, так как стандартные алгоритмы оптимизируют общую функцию потерь, игнорируя минорный класс [1]. Цель работы – оценка методов балансировки данных: передискретизации, недодискретизации и взвешивания классов. Эксперимент проведен на датасете прогнозирования выгорания с использованием логистической регрессии, дерева решений и метода опорных векторов. Оценка качества выполнялась по сбалансированной точности и PR-AUC. Результаты формируют рекомендации по выбору стратегии балансировки для задач, где цена пропуска целевого события превышает стоимость ложной тревоги.

В качестве экспериментальных данных был использован датасет, моделирующий информацию о сотрудниках организации для задачи бинарной классификации наличия профессионального выгорания. Набор данных включает в себя демографические признаки, такие как возраст и пол, профессиональные характеристики, включая должность и стаж работы, а также психофизиологические показатели: уровень стресса, удовлетворенность работой, количество рабочих часов в неделю и долю удаленной работы.

Целевой переменной выступал бинарный признак Burnout, указывающий на наличие или отсутствие выгорания. На этапе предобработки данных первоначально была выполнена проверка на наличие пропущенных значений с помощью визуализации heatmap и были удалены пропуски в датасете.

После проверки из набора данных был удален столбец Name, не несущий смысловой нагрузки для моделирования. Для категориальных признаков Gender и JobRole было применено кодирование методом One-Hot Encoding, что позволило преобразовать текстовые метки в числовой формат, пригодный для обработки алгоритмами машинного обучения. Подготовленная выборка была разделена на обучающую и тестовую части в пропорции 80/20 с фиксацией параметра random_state равного 42. Для сохранения исходного распределения целевого класса в обеих подвыборках и предотвращения ситуации, когда в одной из них может оказаться недостаточное количество объектов минорного класса, разделение проводилось со стратификацией (рисунок 1).

```
# разделение на тестовую и тренировчную выборку
target_col = 'Burnout'

X = df.drop(columns=[target_col])
y = df[target_col]

X = df.drop(columns=[target_col])

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42, stratify = y)
```

Рисунок 1 – Разделение выборки на тренировочную и тестовую со стратификацией

Числовые переменные были подвергнуты стандартизации с использованием StandardScaler. Параметры масштабирования (среднее и стандартное отклонение) вычислялись исключительно на обучающей выборке (fit), после чего полученные трансформации применялись к тестовой выборке

(transform). Это гарантирует, что модель не получает косвенной информации о статистических характеристиках тестовых данных в процессе обучения (рисунок 2).

```
# OHE и стандартизация
df = pd.get_dummies(df, columns=["Gender", "JobRole"])
numerical_cols = ['Age', 'Experience', 'WorkHoursPerWeek', 'RemoteRatio', 'SatisfactionLevel', 'StressLevel']

scaler = StandardScaler()
df[numerical_cols] = scaler.fit_transform(df[numerical_cols])

df.to_csv("_synthetic_employee_burnout.csv")
```

```
df.to_csv("_synthetic_employee_burnout.csv")
df.head()
```

	Age	Experience	WorkHoursPerWeek	RemoteRatio	SatisfactionLevel	StressLevel	Burnout	Gender_Female	Ge
0	-0.770520	-0.773509	0.880175	-0.994132	1.216101	-1.538798	0	False	
1	-0.061548	-0.117483	-0.218776	0.584237	-0.783652	-1.191597	0	True	
2	-0.681899	-0.882847	-0.472380	-1.028445	-0.359462	-0.844395	0	True	
3	-0.504656	-0.445496	-0.472380	0.687174	0.203239	0.891614	0	True	
4	1.622262	-0.226821	-0.979588	-0.136323	1.224758	-1.538798	0	False	

Next steps: New interactive sheet

Рисунок 2 – Пример данных после кодирования и стандартизации

Подготовленная выборка была разделена на обучающую и тестовую части в пропорции восемьдесят к двадцати с фиксацией параметра random_state равного сорока двум для обеспечения воспроизводимости результатов эксперимента. Для решения проблемы дисбаланса классов в обучающей выборке были реализованы три подхода, первый из которых RandomOverSampler, предполагал искусственное увеличение количества объектов меньшего класса путем дублирования существующих примеров, второй метод RandomUnderSampler, заключался в случайном удалении части объектов большего класса до достижения баланса, и третий подход предусматривал использование встроенного механизма взвешивания классов, параметр class_weight равный balanced, который автоматически корректирует функцию потерь алгоритма в зависимости от частоты классов.

В качестве базовых алгоритмов классификации для сравнения эффективности методов балансировки были выбраны три разнородные модели: логистическая регрессия LogisticRegression, выступающая в качестве линейного базового классификатора, дерево решений DecisionTreeClassifier, представляющее нелинейный алгоритм, основанный на правилах, и метод опорных векторов SVC с радиальным базисным ядром RBF, способный строить сложные разделяющие поверхности (таблица 1).

Таблица 1 – Гиперпараметры используемых моделей

Модель	Гиперпараметры
LogisticRegression	C=0.7, max_iter=500, random_state=42
DecisionTreeClassifier	max_depth=3, min_samples_leaf=50, random_state=42
SVC	kernel='rbf', C=0.8, gamma='scale', probability=True

Обучение и оценка моделей проводились с использованием стандартных метрик качества, включая общую точность, сбалансированную точность, матрицу ошибок и площадь под PR кривой, что позволило комплексно оценить влияние методов балансировки на способность моделей выявлять меньший класс.

Для каждой из трех выбранных моделей машинного обучения – логистической регрессии, дерева решений и метода опорных векторов – было проведено обучение в четырех вариантах: базовая модель без коррекции дисбаланса, модель с применением RandomOverSampler меньшего класса, модель с использованием RandomUnderSampler большего класса и модель с назначением сбалансированных весов классов через параметр class_weight='balanced' [2]. Все эксперименты выполнялись на идентичных обучающей и тестовой выборках, сформированных в пропорции восемьдесят к двадцати с фиксацией параметра random_state равного сорока двум для гарантии воспроизводимости результатов (рисунок 3).

```
print("================ БОРЬБА С ДИСБАЛАНСОМ =================")

ros = RandomOverSampler(random_state=42)
X_ros, y_ros = ros.fit_resample(X_train, y_train)
rus = RandomUnderSampler(random_state=42)
X_rus, y_rus = rus.fit_resample(X_train, y_train)

print("Размеры до:", X_train.shape, y_train.shape)
print("Размеры после oversampling:", X_ros.shape, y_ros.shape)
print("Размеры после undersampling:", X_rus.shape, y_rus.shape)
```

```
================ БОРЬБА С ДИСБАЛАНСОМ =================
Размеры до: (1600, 13) (1600,)
Размеры после oversampling: (3006, 13) (3006,)
Размеры после undersampling: (194, 13) (194,)
```

Рисунок 3 – Размеры выборок до и после применения методов балансировки

Оценка качества моделей проводилась с использованием комплекса метрик, позволяющих всесторонне проанализировать эффективность классификации в условиях дисбаланса [3]. Основным критерием сравнения служила сбалансированная точность Balanced Accuracy, учитывающая долю верно классифицированных объектов в каждом классе независимо от их количества. Дополнительно для детального анализа качества предсказаний по каждому классу использовались метрики Precision, Recall и F1-score, представленные в классификационном отчете classification report, что позволяло оценить компромисс между точностью положительных предсказаний и полнотой выявления целевого класса (рисунок 4).

```
=== Logistic Regression (class_weight=balanced) ===
Accuracy: 0.9475
Balanced accuracy: 0.9714673913043479
              precision    recall  f1-score   support

           0       1.00      0.94      0.97       368
           1       0.60      1.00      0.75        32

    accuracy                           0.95       400
   macro avg       0.80      0.97      0.86       400
weighted avg       0.97      0.95      0.95       400

=== Logistic Regression (Oversampling) ===
Accuracy: 0.955
Balanced accuracy: 0.9755434782608696
              precision    recall  f1-score   support

           0       1.00      0.95      0.97       368
           1       0.64      1.00      0.78        32

    accuracy                           0.95       400
   macro avg       0.82      0.98      0.88       400
weighted avg       0.97      0.95      0.96       400

=== Logistic Regression ===
Accuracy: 0.9475
Balanced accuracy: 0.6861413043478262
Classification Report:
              precision    recall  f1-score   support

           0       0.95      1.00      0.97       368
           1       0.92      0.38      0.53        32

    accuracy                           0.95       400
   macro avg       0.94      0.69      0.75       400
weighted avg       0.95      0.95      0.94       400

=== Logistic Regression (Undersampling) ===
Accuracy: 0.93
Balanced accuracy: 0.9619565217391304
              precision    recall  f1-score   support

           0       1.00      0.92      0.96       368
           1       0.53      1.00      0.70        32

    accuracy                           0.93       400
   macro avg       0.77      0.96      0.83       400
weighted avg       0.96      0.93      0.94       400
```

Рисунок 4 – classification_report для логистической регрессии

Для оценки способности модели ранжировать объекты по вероятности принадлежности к минорному классу рассчитывалась площадь под PR-кривой, которая является чувствительной метрикой к качеству классификации целевого класса в условиях дисбаланса и позволяет сравнивать модели на основе компромисса между точностью предсказаний (precision) и полнотой выявления (recall) независимо от выбранного порога классификации (рисунок 5).

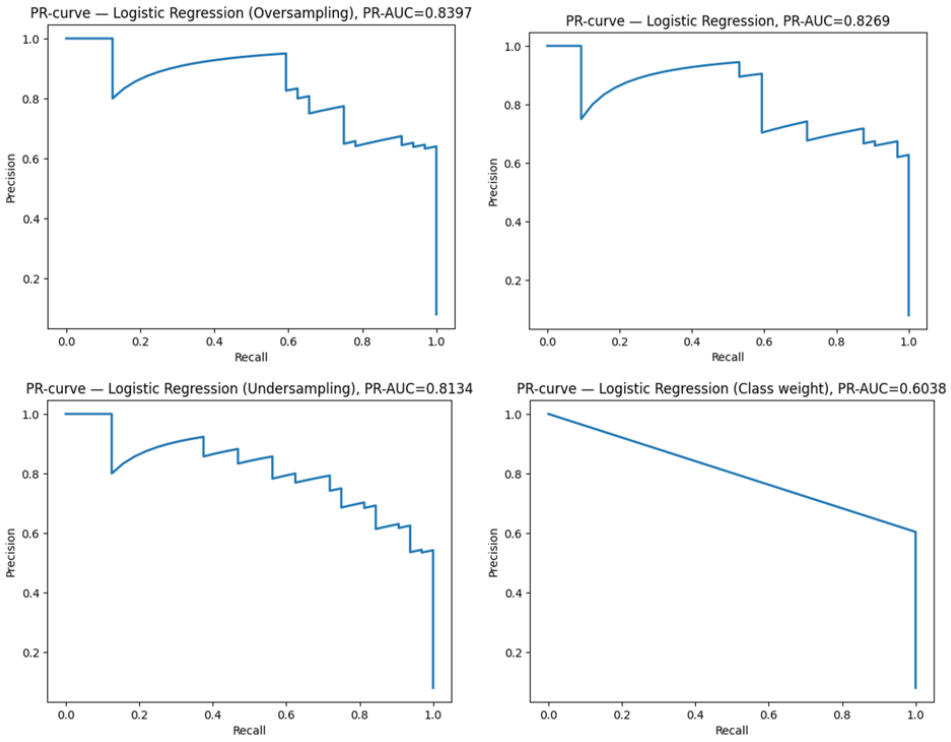


Рисунок 5 – PR-кривые для логистической регрессии

Визуализация результатов включала построение матриц ошибок Confusion Matrix для наглядного представления структуры ошибок модели, в частности соотношения ложноотрицательных и ложноположительных предсказаний, что имеет критическое значение для задач, где цена пропуска целевого события существенно превышает стоимость ложной тревоги (рисунок 6).

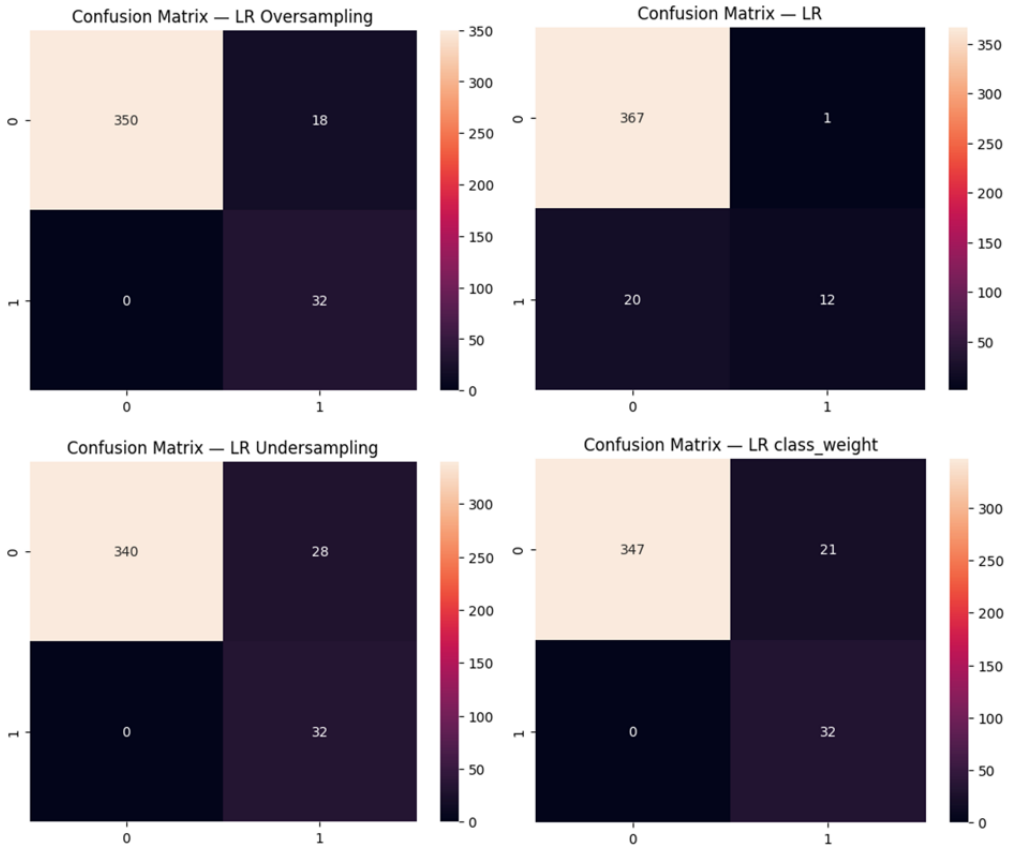


Рисунок 6 – Матрица ошибок для логистической регрессии

Все вычисления выполнялись с использованием библиотеки scikit-learn и импортированных функций balanced_accuracy_score, classification_report, confusion_matrix, pr_curve и auc, а методы ресемплинга реализовывались через модуль imblearn.over_sampling и imblearn.under_sampling. Полученные в ходе экспериментов количественные показатели и графические материалы легли в основу сравнительного анализа эффективности различных стратегий борьбы с дисбалансом данных.

Базовые модели всех трех алгоритмов, обученные на исходных несбалансированных данных, продемонстрировали схожую проблему смещения в сторону большего класса: логистическая регрессия и метод опорных векторов показали идентичную сбалансированную точность 0.686 при общей точности около 0.9475, а дерево решений оказалось наиболее уязвимым к дисбалансу с сбалансированной точностью 0.50 и полной неспособностью выявить случаи выгорания. Эти результаты подтверждают, что игнорирование проблемы дисбаланса делает модели непригодными для практического применения независимо от типа алгоритма, так как все они оптимизируют общую функцию потерь в ущерб выявлению меньшего класса (рисунок 7).

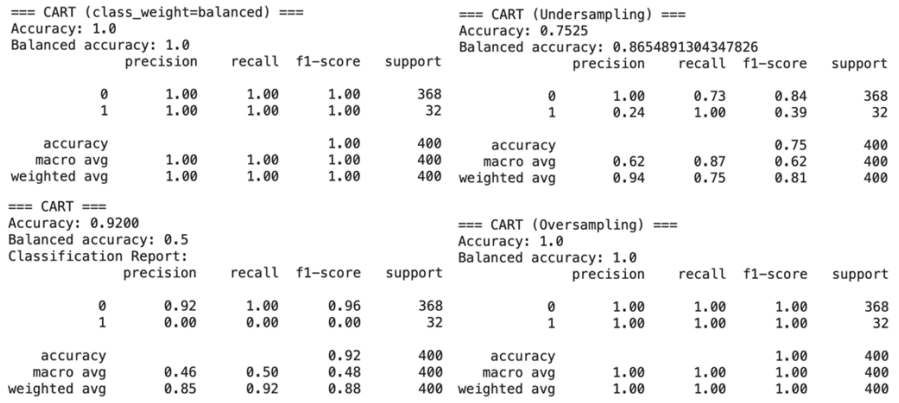


Рисунок 7 – classification_report для CART

Применение методов балансировки кардинально изменило качество всех моделей, однако эффективность конкретных подходов оказалась различной для разных алгоритмов. Метод случайной передискретизации продемонстрировал наилучшие результаты для метода опорных векторов, обеспечив общую точность 0.9825, сбалансированную точность 0.962 и precision предсказаний меньшего класса 0.86 при recall 0.94, что является оптимальным балансом между выявлением случаев выгорания и минимизацией ложных срабатываний.

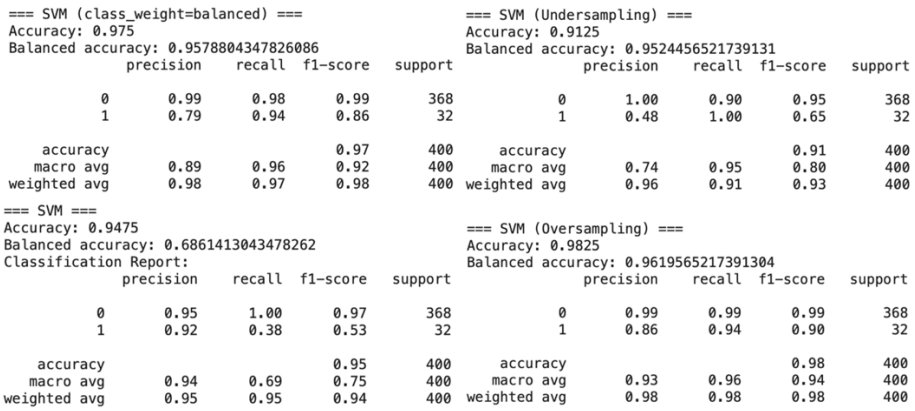


Рисунок 8 – classification_report для SVM

Для дерева решений передискретизация привела к идеальной классификации с метриками 1.00 по всем показателям, однако столь высокие результаты могут свидетельствовать о переобучении модели на датасете, особенно учитывая дублирование объектов меньшего класса. Логистическая регрессия с передискретизацией показала recall 1.00 для класса выгорания при precision 0.64 (таблица 2).

Метод взвешивания классов продемонстрировал устойчивость и эффективность среди всех алгоритмов: для метода опорных векторов он обеспечил точность 0.975, сбалансированную точность 0.958 и precision меньшего класса 0.79 при recall 0.94, что лишь незначительно уступает передискретизации, но не требует изменения объема данных. Для дерева решений взвешивание

классов также привело к идеальной классификации с метриками 1.00, а для логистической регрессии обеспечило показатели, сопоставимые с передискретизацией (recall 1.00, precision 0.60). Это делает метод взвешивания классов наиболее универсальным и вычислительно эффективным подходом, особенно для больших датасетов, где изменение объема данных может быть критичным.

Таблица 2 – Сравнение метрик качества моделей при различных методах балансировки

Модель	Метод	Balanced accuracy	Precision	Recall	PR-AUC
Логистическая регрессия	Oversampling	0.9755	0.64	1	0.8397
	Undersampling	0.9620	0.53	1	0.8134
	Без балансировки	0.6891	0.92	0.38	0.8269
	Class weight	0.9715	0.60	1	0.6038
CART	Oversampling	1	1	1	1
	Undersampling	0.8655	0.24	1	0.3148
	Без балансировки	0.5	0	0	0.5161
	Class weight	1	1	1	1
SVM	Oversampling	0.9620	0.86	0.94	0.8086
	Undersampling	0.9524	0.48	1	0.4776
	Без балансировки	0.6861	0.92	0.38	0.3962
	Class weight	0.9579	0.79	0.94	0.7451

Метод случайной недодискретизации показал наименее стабильные результаты: для метода опорных векторов он обеспечил recall 1.00 при precision меньшего класса 0.48 и общей точности 0.9125, для дерева решений precision упала до 0.24 при общей точности 0.7525, а для логистической регрессии составила 0.53 при recall 1.00. Это подтверждает гипотезу о том, что удаление части данных большего класса приводит к потере информативных закономерностей и ухудшению обобщающей способности моделей, особенно для сложных нелинейных алгоритмов.

Сравнение алгоритмов выявило, что метод опорных векторов с радиальным базисным ядром продемонстрировал наилучшую устойчивость к дисбалансу и наиболее сбалансированные результаты при применении техник балансировки, обеспечивая высокую precision предсказаний меньшего класса без чрезмерного количества ложных срабатываний. Дерево решений показало наибольшую чувствительность к методам балансировки с переходом от полного провала (balanced accuracy 0.50) до идеальной классификации (balanced accuracy 1.00), что указывает на его высокую гибкость, но также и на риск переобучения. Логистическая регрессия продемонстрировала стабильные предсказуемые результаты с recall 1.00 для выявления выгорания при всех методах балансировки.

С практической точки зрения, для задач прогнозирования профессионального выгорания, где цена пропуска сотрудника в группе риска существенно превышает стоимость ложной тревоги, приоритетными являются конфигурации, обеспечивающие максимальный recall выявления меньшего класса. Метод опорных векторов с передискретизацией или взвешиванием классов представляет собой оптимальный выбор, так как обеспечивает recall 0.94 при высокой precision 0.86 и 0.79 соответственно, минимизируя количество ложных срабатываний, которые могут привести к неэффективному расходованию ресурсов отдела кадров. Для логистической регрессии предпочтительным является использование взвешивания классов как вычислительно эффективного метода, обеспечивающего recall 1.00. Дерево решений с методами передискретизации или взвешивания классов может быть использовано для интерпретируемого анализа факторов выгорания, однако требует дополнительной валидации на независимых выборках для исключения переобучения.

В ходе исследования подтверждена критическая важность применения методов балансировки данных при решении задач классификации с дисбалансом классов. Базовые модели всех алгоритмов без коррекции показали низкую способность выявлять меньший класс: сбалансированная точность

составила 0.686 для логистической регрессии и SVM, и 0.50 для дерева решений, при recall класса выгорания 0.00 для CART.

Наилучшей конфигурацией для задачи прогнозирования выгорания признан метод опорных векторов с передискретизацией (accuracy 0.9825, balanced accuracy 0.962, precision 0.86, recall 0.94). Метод взвешивания классов показал сопоставимые результаты при меньших вычислительных затратах, что делает его универсальным решением. Дерево решений с балансировкой продемонстрировало идеальные метрики 1.00, однако требует валидации на независимых данных из-за риска переобучения. Недодискретизация показала наименее стабильные результаты со значительным снижением precision.

Практическая рекомендация: для задач HR-аналитики, где цена пропуска целевого события высока, следует использовать модели с максимальным recall меньшего класса и оценивать качество по сбалансированной точности и PR-AUC, а не по общей точности. Оптимальной конфигурацией для внедрения является SVM с class_weight='balanced'.

Список использованных источников:

1. Вьюгин, В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования / В. Вьюгин. – Москва : МЦНМО, 2014. – 218 с.

2. Флах, П. Машинное обучение : наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / П. Флах. – Москва : ДМК-Пресс, 2012. – 412 с.

3. Силен, Д. Основы Data Science и Big Data. Python и наука о данных / Д. Силен, А. Мейсман, М. Али. – Санкт-Петербург : Питер, 2017. – 336 с.

4. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль. – 2-е изд., испр. – Москва : ДМК-Пресс, 2018. – 652 с.

5. Флах, П. Машинное обучение : наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / П. Флах. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 400 с.

6. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология : учебное пособие / Е. С. Вентцель. – Москва : Высшая школа, 2007. – 208 с.

7. Жерон, О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow : концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем / О. Жерон. – Санкт-Петербург : Диалектика, 2018. – 688 с.

UDC 004.9:331.44

RESEARCH OF BALANCING ON REAL DATA

Potyomin I.V., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Golda O. – PhD in Economics, associate professor

Annotation. The paper examines the influence of class imbalance on the efficiency of machine learning algorithms. Using the example of a dataset of professional burnout forecasting, three balancing methods are compared: oversampling, undersampling and weighing classes. Logistic regression, decision tree and reference vector method were experimentally evaluated. It has been established that ignoring the imbalance leads to the inability of models to identify a minor class with high overall accuracy. Class weighing is recognised as the most versatile solution, providing high balanced accuracy and PR-AUC without changing the amount of data. The results form recommendations for choosing a balancing strategy for tasks with an uneven distribution of classes.

Keywords. Machine learning, class imbalance, data balancing, oversampling, undersampling, class weighing, binary classification, logistic regression, decision tree, reference vector method, balanced accuracy, PR-AUC.

УДК 004.65:004.056.2

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ В МНОГОПОТОЧНОМ TCP-СЕРВЕРЕ НА JAVA ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ HIBERNATE

Толстик А.С., Герасимович А.Ю., Скворец И.С., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Сидоров С.В. – старший преподаватель

Аннотация. В статье исследуется проблема обеспечения целостности данных в многопоточных серверных системах при конкурентном доступе. Предложен многоуровневый подход к защите данных для Java-сервера, принимающего TCP-запросы и использующего Hibernate. Рассмотрена послойная архитектура, включающая инфраструктурную маршрутизацию, сервисную валидацию, механизм логического удаления, транзакционное управление сессиями и оптимистическую блокировку. Результаты нагрузочного стресс-тестирования подтверждают высокую эффективность предложенной модели: система успешно предотвращает потерю обновлений и нарушение согласованности объектного графа, надежно преобразуя конкурентные транзакционные конфликты в контролируемые диагностические отказы без скрытого повреждения базы данных.

Ключевые слова. Многопоточный сервер, целостность данных, конкурентный доступ, ORM, Hibernate, управление транзакциями, оптимистическая блокировка, логическое удаление, потеря обновлений, послойная архитектура, стресс-тестирование, Java.

Многопользовательские серверные системы функционируют в условиях параллельного доступа к общим данным. При одновременной обработке запросов к одним и тем же записям или к связанным сущностям возникают потеря обновлений, конфликтные изменения и нарушение согласованности объектного графа. Для backend-разработки эта проблема носит прикладной характер, поскольку ошибка проявляется не только в таблицах базы данных, но и в поведении маршрутизации, проверке входных данных, правилах предметной области и в работе слоя сохранения. Поэтому обеспечение целостности целесообразно рассматривать как согласованную работу нескольких контуров защиты: от приема и нормализации запроса до транзакционной фиксации изменений в объектно-реляционном отображении (далее – ORM) и базе данных [1]. Практической основой исследования выступает многопоточный Java-сервер, принимающий клиентские запросы по Transmission Control Protocol (далее – TCP) и использующий Hibernate для работы с разработанными сущностями отделов, сотрудников, проектов и связей участия [2].

Рассматриваемый сервер построен по послойной схеме обработки запроса [3]. Клиентская команда принимается TCP-сервером, далее проходит инфраструктурный слой маршрутизации, контроллерный и сервисный контуры, после чего изменения фиксируются через Hibernate в реляционной базе данных. На рисунке 1 представлена макро-схема прохождения клиентского запроса.

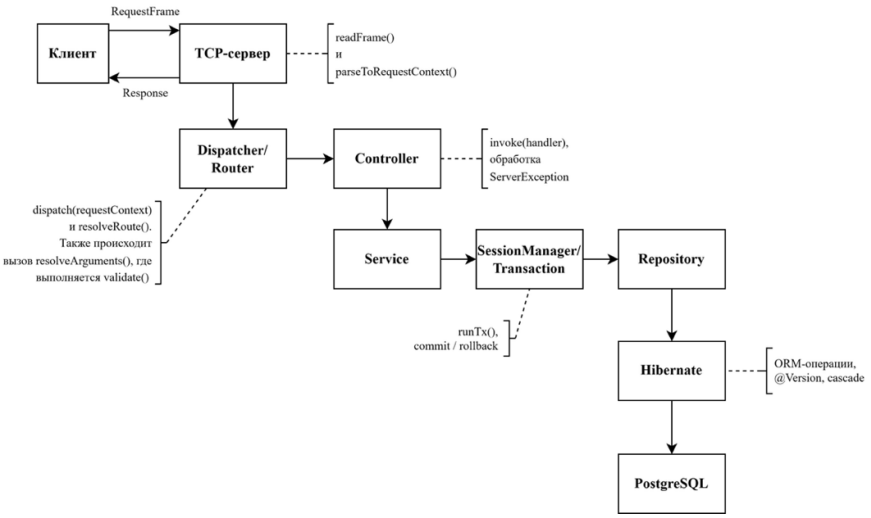


Рисунок 1 – Макро-схема обработки клиентского запроса

Представленная схема отражает не только порядок прохождения запроса, но и распределение ответственности между слоями.

Первая линия защиты формируется еще до обращения к бизнес-логике. Запрос поступает в сервер в унифицированном формате, после чего нормализуется, сопоставляется с зарегистрированным маршрутом и подготавливается к вызову конкретного обработчика. На этом этапе

исключаются обращения к несуществующим маршрутам, а аргументы контроллерного метода извлекаются централизованно из пути и тела запроса. Такой подход важен с позиции целостности, поскольку сервисный слой получает уже структурированные и типизированные данные, а не произвольный набор пользовательских значений.

Практический смысл этого уровня заключается в раннем отсечении некорректных состояний. Если путь не соответствует шаблону, тело запроса отсутствует либо идентификатор не приводится к требуемому типу, выполнение прекращается до начала предметной операции. В результате ошибка не маскируется под сбой ORM или базы данных, а локализуется в точке фактического возникновения. Для многопоточного сервера это принципиально, поскольку чем раньше отклонен некорректный запрос, тем меньше вероятность вовлечения в работу уже управляемых сущностей и транзакционных ресурсов.

После прохождения маршрутизации управление передается контроллерам и сервисам. Здесь обеспечивается прикладная согласованность данных. Сервисные методы проверяют существование и активность связанных сущностей, не допускают создания объектов по неполному или противоречивому набору идентификаторов и применяют правила предметной области до фиксации изменений. По этой причине целостность на сервисном уровне выражается не только в формальной валидности полей, но и в корректности самого сценария изменения данных.

В текущем сервере это проявляется в нескольких типовых механизмах. При создании или изменении сущностей выполняется проверка ссылок на связанные объекты, а логическое удаление реализуется через soft delete, при котором запись исключается из активного набора без физического удаления строки. Для связи сотрудника и проекта предусмотрена отдельная обработка: активная дублирующая связь запрещается, а ранее удаленная может быть восстановлена вместо повторного создания новой записи. Аналогично, при удалении сотрудника или проекта предварительно деактивируются связанные записи участия. Тем самым сервер предотвращает появление активных связей, ведущих к логически удаленным объектам. С прикладной точки зрения это означает, что система поддерживает не просто корректность отдельных строк, а согласованность всего связанного набора данных.

Следующий контур защиты связан с транзакционным выполнением операций. Все изменяющие действия должны выполняться атомарно, то есть либо завершаться полностью, либо не оставлять после себя частично зафиксированного результата. Именно для этого используется централизованный менеджер сессий, который открывает Hibernate Session, начинает транзакцию, выполняет прикладную операцию и в зависимости от результата либо подтверждает изменения, либо выполняет rollback. С точки зрения надежности многопоточного сервера это исключает ситуацию, когда одна часть связанного изменения уже записана, а другая не завершилась из-за исключения.

Hibernate рассматривает Session как контекст персистентности, внутри которого сущности находятся в состояниях transient, managed, detached или removed, а flush синхронизирует накопленные изменения с базой данных [4]. Такая модель важна для понимания того, почему целостность нельзя сводить только к изоляции на стороне СУБД. Между чтением данных, построением объектного графа и фиксацией изменений существует промежуток, внутри которого и возникает значительная часть конкурентных конфликтов. Именно в этом промежутке становятся критичными оптимистическая блокировка и корректное управление состояниями сущностей.

Ключевым механизмом предотвращения потерянных обновлений в рассматриваемом сервере выступает поле версии, помеченное аннотацией @Version. Такое поле используется поставщиком персистентности для оптимистической блокировки, а при записи сущности в базу данных версия в памяти должна сравниваться с версией в хранилище [5]. @Version позволяет обнаруживать конфликтующие обновления и предотвращать потерю изменений, которая возникала бы при стратегии last commit wins [6]. Механизм таков, что version-столбец включается в условие обновления, благодаря чему устаревший снимок строки не может незаметно перезаписать более новую версию.

Роль базы данных в этой архитектуре остается страхующей и одновременно завершающей. На уровне схемы поддерживаются обязательность критичных полей, обязательность ссылок в сущности связи и уникальность пары сотрудник-проект. Это означает, что даже при ошибке на верхних слоях система хранения не позволит зафиксировать ряд структурно противоречивых состояний. Дополнительно значим режим изоляции транзакций PostgreSQL. Уровень Read Committed используется по умолчанию, а Repeatable Read обеспечивает более сильные гарантии видимости данных в рамках транзакции [7].

Однако для прикладного сервера одного уровня изоляции недостаточно, когда чтение и последующая модификация разделены во времени и сопровождаются логикой ORM. По этой причине надежная защита целостности достигается только сочетанием транзакций, оптимистической блокировки, сервисных правил и ограничений схемы.

Работоспособность предложенного подхода проверялась стресс-тестом многопоточного TCP-сервера при 15 одновременных клиентах, каждый из которых последовательно отправлял по 250 запросов. Нагрузочный сценарий включал чтение коллекций и отдельных записей, создание, частичное обновление и логическое удаление сущностей, а также получение связанных данных по маршрутам сотрудник-проекты и проект-сотрудники. Результаты стресс-теста представлены на рисунке 2.

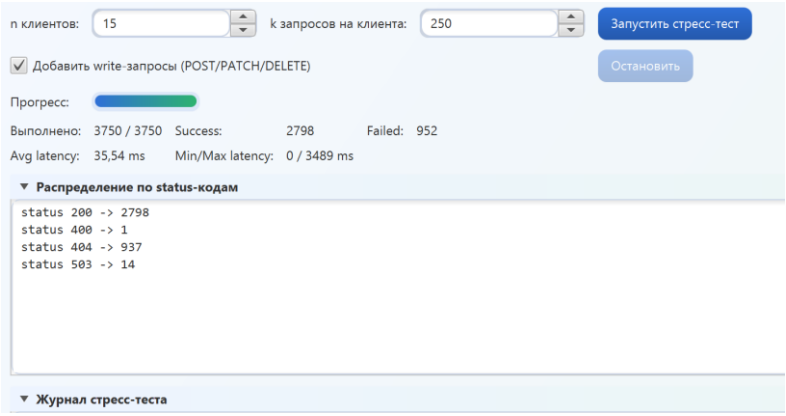


Рисунок 2 – Результаты стресс-теста

В ходе эксперимента выполнено 3750 тестовых запросов. Успешно завершились 2798 операций, неуспешно – 952. Средняя задержка составила 35,54 мс, максимальная – 3489 мс. Распределение ответов показало 2798 ответов с кодом 200, 937 ответов с кодом 404, 14 ответов с кодом 503 и 1 ответ с кодом 400. Принципиально важно, что в журнале не зафиксированы внутренние ошибки уровня 500. Следовательно, под конкурентной нагрузкой сервер не переходил в аварийное состояние, а возвращал диагностируемые ответы, отражающие конкретный тип конфликта.

Ответы 404 не рассматривались как признак нарушения целостности. Их природа связана не с повреждением данных в базе, а с обращением к сущностям, которые к моменту повторного чтения или изменения уже были логически удалены другим потоком. Следовательно, в данном случае сервер возвращал ожидаемый результат конкурентного доступа к уже неактуальному объекту.

Ключевое значение для оценки защиты целостности имеют ответы 400 и 503. Единственный ответ 400 возник при повторной попытке создать уже существующую связь между сотрудником и проектом. Это показывает, что сервер не допускает дублирования логически одинаковых связей и прерывает конфликтную операцию до фиксации некорректного состояния.

Ответы 503 отражают более сложные конфликты конкурентной записи. Такие ошибки возникали в тех случаях, когда один поток успевал изменить или удалить сущность раньше, чем другой поток завершал обновление той же записи. В результате устаревшая операция не применялась к данным, а отклонялась сервером как конфликт конкурентного доступа. Практически это означает, что при одновременной работе нескольких потоков более позднее состояние не перезаписывалось устаревшим значением.

Полученные результаты подтверждают, что под нагрузкой сервер не переводит конфликтные ситуации в скрытое повреждение данных. Напротив, попытки повторного создания уже существующей связи и попытки записи по устаревшему состоянию завершаются явным отказом. Следовательно, стресс-тест подтвердил работоспособность примененных средств защиты целостности данных при конкурентной обработке запросов.

Проведенное исследование показало, что целостность данных в многопоточном TCP-сервере на Java обеспечивается наиболее надежно при совместной работе нескольких уровней защиты. Сочетание маршрутизации запроса, сервисной валидации, логики soft delete, транзакционного выполнения операций, optimistic locking и ограничений базы данных снижает риск конфликтных изменений и повышает устойчивость серверной обработки. Результаты теста подтверждают, что при конкурентной нагрузке сервер переводит конфликтные ситуации в контролируемые ответы приложения, а не в скрытое повреждение данных. Это позволяет сделать вывод об эффективности предложенного подхода для защиты согласованности данных и предотвращения потери обновлений.

Список использованных источников:

1. Keith, M. Pro JPA 2 in Java EE 8 : an in-depth guide to Java Persistence APIs / M. Keith, M. Schincariol. – Berkeley : Apress, 2018. – 535 p.

2. Bauer, C. Java Persistence with Hibernate : a definitive guide / C. Bauer, G. King, G. Gregory. – Shelter Island : Manning Publications, 2015. – 608 p.

3. Fowler, M. Patterns of Enterprise Application Architecture : definitive guide / M. Fowler. – Boston : Addison-Wesley, 2002. – 533 p.

4. Mihalcea, V. High-Performance Java Persistence : a comprehensive guide / V. Mihalcea. – Bukarest : Vlad Mihalcea, 2016. – 486 p.

5. Гонсалвес, Э. Изучаем Java EE 7 : пер. с англ. / Э. Гонсалвес. – СПб. : Питер, 2014. – 640 с.

6. Дейт, К.Дж. Введение в системы баз данных : пер. с англ. / К.Дж. Дейт. – М. : Вильямс, 2005. – 1328 с.

7. Моргунов, Е.П. PostgreSQL. Основы языка SQL : учеб. пособие / Е.П. Моргунов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 336 с.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ «СОЦИАЛЬНАЯ СЕТЬ»

Алесина А.Е., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куликов С.С. – канд. техн. наук, доцент

В работе рассматривается создание веб-приложения социальной сети, предоставляющего пользователям возможность публикации коротких сообщений, взаимодействия с контентом и другими пользователями, а также формирования персонализированной ленты новостей.

Сегодня социальные сети являются одним из основных инструментов обмена информацией. Они используются для общения, публикации новостей, создания сообществ по интересам и распространения контента. По мере роста числа пользователей и объема информации возрастает и потребность в удобных веб-приложениях, обеспечивающих эффективное взаимодействие пользователей друг с другом. Микроблоги – это социальные сети, ориентированные на публикацию коротких сообщений и быстрое распространение информации. В отличие от других видов социальных сетей, микроблог отдает приоритет лаконичному контенту, скорости создания и потребления, а также актуальности публикуемой информации [1].

Основной задачей приложения является предоставление пользователю удобной среды для создания коротких текстовых публикаций и взаимодействия с другими пользователями через подписки и реакции. Многие современные социальные сети предлагают следующие функции:

1) публикация текстовых публикаций с ограничением длины (270-500 символов);
2) возможность комментирования или создания веток ответов на публикации;
3) алгоритмическая лента новостей;
4) возможность подписываться на профили других пользователей.

Однако многие популярные платформы обладают такими недостатками, как перегруженный функционал, сложный пользовательский интерфейс, отсутствие гибких инструментов для кастомизации публикуемого контента, профиля пользователя и ленты новостей.

После анализа существующих решений было принято, что приложение должно давать пользователю возможность:

1) публиковать текстовые посты длиной до 1000 символов;
2) прикреплять к постам медиафайлы;
3) взаимодействовать с другими пользователями с помощью механизма подписки, отметок «Нравится», комментариев и репостов.
4) переключать режим ленты новостей между хронологическим (посты людей, на которых подписан пользователь), и алгоритмическим (популярные новые посты).

Пользователь так же должен иметь возможность настроить внешний вид своей страницы профиля. Это включает в себя загрузку изображения аватара и фонового изображения страницы, а также указания личной информации и ссылок на внешние ресурсы, например, аккаунты пользователя в других социальных сетях.

В качестве технологической основы для разработки полноценных веб-приложений на JavaScript был выбран стек MERN (MongoDB, Express.js, React, Node.js). Архитектура системы построена по принципу разделения на клиентскую и серверную части. Клиентская часть реализована с использованием React и Tailwind CSS, что позволяет эффективно управлять состоянием приложения и реализовать динамический пользовательский интерфейс, адаптированный под различные устройства. Серверная часть основана на Node.js и использует фреймворк Express.js, который обрабатывает HTTP-запросы и реализует REST API. Для хранения данных используется MongoDB, обеспечивающая гибкую схему хранения и простое управление данными в формате документов.

Также одной из особенностей приложения является его интеграция с облачным сервисом Cloudinary для хранения и обработки мультимедийных файлов. Это повышает производительность и масштабируемость системы за счет снижения нагрузки на основной сервер при выполнении ресурсоемких операций по хранению и обработке изображений и видео.

Таким образом, разработанное веб-приложение позволяет решить задачу быстрого обмена информацией между пользователями в формате микроблогов.

Список использованных источников:

1. EBSCO Information Services [Электронный ресурс]. Дата обращения: 03.04.2026. URL: https://www.ebsco.com/research-starters/social-sciences-and-humanities/microblogging

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПРОФИЛЕЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ МЕЖДУ ПРОВАЙДЕРОМ KEYCLOAK IAM И РЕЛЯЦИОННОЙ БАЗОЙ ДАННЫХ В SPRING-ПРИЛОЖЕНИИ

Войтов А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Нестеренков С.Н. – канд. техн. наук, доцент

В работе предложен метод JIT-синхронизации профилей между Keycloak и реляционной БД в Spring-приложении. Извлечение данных из JWT-токена «на лету» позволяет транзакционно создавать и обновлять локальные записи без прямых запросов к IAM, снижая сетевую нагрузку и сохраняя stateless-архитектуру.

В современных системах обучения аутентификацию и авторизацию всё чаще выносят в специализированные решения класса Identity and Access Management (IAM). В рамках разработки программного средства автоматизации процесса повышения квалификации сотрудников IT-компании роль такого IAM-провайдера выполняет Keycloak [1]. Серверная логика приложения при этом реализована на базе популярного фреймворка Spring Boot [2].

Keycloak надежно хранит учетные данные и поддерживает сквозную авторизацию (Single Sign-On). Однако из-за этого возникает классическая проблема распределенных систем: необходимость связывания идентификатора пользователя из Keycloak с его локальным профилем в реляционной базе PostgreSQL [3], где хранятся оценки и прогресс по курсам. Для корпоративной среды критически важно сохранять строгую целостность этих данных. Если сотрудник перейдет в другой отдел, история его обучения ни в коем случае не должна потеряться.

Существует возможность выполнения синхронных REST-запросов к Admin API Keycloak при каждом действии пользователя для получения профиля. Но это серьезно замедлит работу приложения и создаст слишком жесткую связь между сервисами. Хранить все оценки и прогресс прямо в атрибутах Keycloak также нецелесообразно: его структура совершенно не рассчитана на сложные реляционные связи и запросы.

Для эффективного решения этой проблемы был внедрен паттерн Just-In-Time (JIT) инициализации профилей. Данный механизм работает следующим образом: система перехватывает и разбирает токен доступа (JWT), передаваемый клиентским React-приложением в заголовках каждого запроса. Вся логика синхронизации встроена непосредственно в цепочку фильтров Spring Security. Для этого был разработан специальный компонент JwtAuthenticationConverter. Он обрабатывает входящий HTTP-запрос еще до попадания в слой контроллеров и собирает готовый объект авторизации для контекста безопасности. Параллельно конвертер преобразует роли пользователя: извлекается массив realm_access.roles из токена и преобразуется в список прав GrantedAuthority, чтобы аннотации безопасности на уровне сервисов работали корректно.

При успешной проверке подписи токена из него извлекаются базовые поля: уникальный UUID, почта, ФИО, а также дополнительные данные о корпоративной должности. Сразу после этого приложение обращается к локальной базе данных. Если записи с таким UUID еще нет, открывается новая транзакция, и в таблице создается свежий профиль сотрудника. Для предотвращения состояний гонки (race condition) и дублирования записей при одновременном поступлении нескольких запросов от нового пользователя, сохранение выполняется через строгую транзакцию, а колонка UUID в базе защищена ограничением уникальности. Если же профиль уже существует, осуществляется сверка его полей с данными из токена. В случае изменения ФИО или должности локальная база немедленно обновляется, что позволяет поддерживать согласованность данных в конечном счете (eventual consistency).

В итоге данный подход позволяет эффективно работать с бизнес-данными внутри монолита. Снижается сетевая нагрузка на Keycloak и исключается необходимость настройки очередей сообщений. Значительно повышается отказоустойчивость: даже при временном сбое сервера авторизации платформа продолжит обслуживать пользователей с действующими токенами. Важным преимуществом является сохранение архитектуры stateless (сервер не хранит локальные сессии в памяти). Следовательно, при увеличении числа пользователей обеспечивается простое и быстрое горизонтальное масштабирование узлов приложения.

Список использованных источников:

1. Keycloak Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.keycloak.org/documentation (дата обращения: 29.03.2026).

2. Walls, C. Spring in Action, Sixth Edition / C. Walls. – Manning, 2022. – 536 p.

3. PostgreSQL Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.postgresql.org/docs/ (дата обращения: 29.03.2026).

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ СРЕДСТВО МИКРОПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕСТИРОВАНИЕМ ПАМЯТИ

Головин Е.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Иванюк А.А. – д-р техн. наук, профессор

Тестирование – это ключевой этап в любой разработке Систем на Кристалле (СнК). Особенно важным делает этот этап то, что в аппаратных средствах отсутствует возможность динамического реконфигурирования, потому каждая ошибка, совершенная проектировщиками, может привести к непригодности целой партии чипов. Однако на сегодняшний день тестирование СнК производится и после того, как устройство передаётся конечному потребителю. Достигается это за счёт различных средств встроенного самотестирования, которые проверяют ключевые для работы блоки на исправность. В данной работе представлено устройство встроенного самотестирования памяти с микропрограммным управлением, которое поддерживает режимы разрушающего и неразрушающего тестирования памяти.

В области тестирования памяти маршевые тесты стали стандартом индустрии в силу их максимального быстродействия и возможности обнаруживать все неисправности класса Stuck-at Fault, а также частичное обнаружение неисправностей взаимного влияния современными алгоритмами [1]. Маршевые тесты можно представить как набор маршевых элементов. Маршевым элементом называется набор операций чтения и записи данных, которые последовательно выполняются над одной ячейкой памяти. Операции, относящиеся к одному маршевому элементу, имеют одинаковое направление изменения адресов ОЗУ, за счёт чего и возможно выполнение всех операций на одной ячейке последовательно.

Маршевые тесты стали часто применяться в Memory Built-In Self-Test (MBIST) схемах, которые использовались для проверки ячеек ОЗУ на наличие неисправностей уже после того, как устройство попадало к конечным пользователям. Эти схемы выполняли один заданный алгоритм проверки памяти и строились на жёсткой логике. Однако у таких схем имеется один недостаток – полное отсутствие гибкости. Из-за этого качество проверок памяти напрямую зависело от обнаруживающих способностей выбранного за основу маршевого теста и никак не могло быть улучшено новыми алгоритмами, способными обнаруживать различные классы неисправностей.

Для решения проблемы с гибкостью стали использоваться Programmable MBIST схемы. Их основным отличием является программируемая логика, с помощью которой задаётся по некоторому коду произвольный маршевый тест. Это позволяет использовать разные алгоритмы тестирования для обнаружения большего количества потенциальных неисправностей ячеек ОЗУ, а также спасает устройство самотестирования от морального устаревания, которое может происходить с классическими MBIST в силу непригодности по современным стандартам выбранного за основу построения схемы маршевого теста.

При создании кода, по которому маршевые тесты будут записываться в проектируемый Programmable MBIST, учитывались следующие два критерия:

1. Компактность кода. Это необходимо для минимизации итогового размера схемы тестирования и используемой для хранения маршевого теста памяти.

2. Простота кода. Необходима для минимизации вероятности ошибки в кодировании маршевого теста и упрощения отладки.

Было принято решение использовать код операций, состоящий из трёх бит. Во втором бите кодируется признак последней операции в маршевом тесте. В первом бите кодируется направление изменения адресов: если поле равно 1, то адрес изменяется от младшего к старшему, иначе – от старшего к младшему. Нулевой бит отвечает за тип операции: если поле равно 0, то выполняется операция записи, в обратном случае выполняется операция чтения. В предложенном коде отсутствует отдельный бит для кодирования данных. Их значение вычисляется в зависимости от следующей операции в маршевом тесте: если это запись, текущее значение данных инвертируется, если чтение, то значение данных остаётся неизменным с предыдущей операции [2].

В устройстве реализован алгоритм валидации хранящегося во внутренней памяти схемы самотестирования маршевого теста. Необходимость его обусловлена тем, что маршевые тесты имеют произвольную длину и признаком окончания теста в предложенном коде служит выставленный Last Operation бит в последней операции. Перед началом проведения тестирования памяти происходит проверка записанного алгоритма. В случае отсутствия операции с Last Operation битом тест считается не валидным и устройство не выполняет проверку памяти по заданному алгоритму.

Тесты памяти по их воздействию на хранящиеся данные принято разделять на разрушающие и неразрушающие. Разрушающим называется тест, который не гарантирует сохранность данных, хранящихся перед проверкой в тестируемой области памяти. Неразрушающим называется такой тест

памяти, который гарантирует сохранность хранящихся в памяти данных в случае его успешного завершения.

Маршевые тесты в той форме, в которой они строятся, являются разрушающими тестами, так как они проверяют работоспособность памяти, но никак не сохраняют ранее имевшиеся в тестируемой области памяти данные. Потому их использование в момент активной работы устройства становится нетривиальной задачей, требующей либо копирования данных в резервные области, либо же тестирование можно проводить лишь при гарантии отсутствия осмысленных данных, хранимых в памяти, например, в момент подачи питания устройства или при инициализации памяти.

В реализованном устройстве поддержаны режимы разрушающей и неразрушающей проверки памяти. При выборе режима неразрушающего тестирования на основе хранимого в устройстве маршевого теста выполняется функционально эквивалентный неразрушающий тест [3]. При проведении неразрушающего тестирования нельзя точно знать, какие данные хранятся в памяти и насколько они корректные, потому для валидации используется сигнатурный анализатор. Принято решение использовать сигнатурный анализатор на основе регистра сдвига с линейной обратной связью. Вычисление результата теста осуществляется за счёт сравнения эталонной и рабочей сигнатур. Эталонная сигнатура вычисляется перед проведением процедуры тестирования памяти, Рабочая сигнатура вычисляется во время проведения неразрушающего тестирования. В случае их несовпадения делается вывод о том, что в ходе проведения тестирования была обнаружена неисправность в ячейках ОЗУ.

Итоговая схема Programmable MBIST устройства представлена на Рисунке 1.

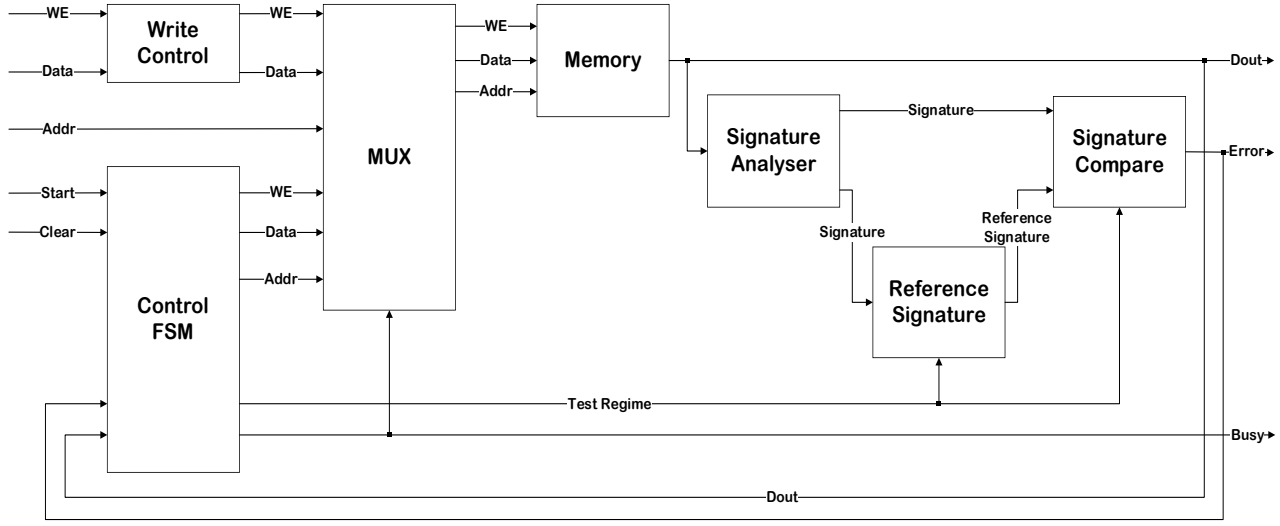


Рисунок 1 – Схема спроектированного устройства самотестирования памяти

В результате проектирования было создано программно-аппаратное средство встроенного самотестирования памяти с микропрограммным управлением. Разработан алгоритм кодирования маршевых тестов, в котором каждая операция с ячейкой ОЗУ кодируется тремя битами. В устройстве реализованы режимы разрушающего и неразрушающего тестирования. Неразрушающее тестирование производится функционально эквивалентным заданному маршевому тесту алгоритмом с использованием сигнатурного анализатора для подсчёта эталонной сигнатуры хранящихся в памяти данных и рабочей сигнатуры теста.

Список использованных источников:

1. Abadir M. S., Reghbati H. K. Functional Testing of Semiconductor Random Access Memories // ACM Computing Surveys. – 1983. – Vol. 15, Issue 3. – P. 175–198.

2. Ivaniuk A. A. Optimal Memory Tests Coding for Programmable BIST Architecture. – 2008 – R&I, No. 4. – P. 32–37.

3. Van de Goor A. J. Testing Semiconductor Memories: Theory and Practice. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1991 – P. 195–207.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА АУДИО-ВИДЕО КОНФЕРЕНЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ GOLANG

Гридюшко Б.О., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шамына А.Ю. – старший преподаватель

Современный этап развития информационных технологий характеризуется глубокой интеграцией систем видеоконференцсвязи (ВКС) в повседневные бизнес-процессы и образовательную деятельность. Удаленная работа и распределенные команды стали стандартом, что предъявляет повышенные требования к качеству, задержке и стабильности мультимедийного взаимодействия в реальном времени. В данной работе рассматриваются аспекты проектирования и реализации системы ВКС, использующей инновационные транспортные механизмы для оптимизации передачи потоковых данных.

Актуальность исследования обусловлена архитектурными и эксплуатационными ограничениями классического стека технологий WebRTC. Несмотря на свою повсеместную поддержку в браузерах, WebRTC, ориентированный изначально на одноранговые соединения (Peer-to-Peer), создает значительную инфраструктурную нагрузку при построении крупномасштабных кластерных решений. Необходимость терминации множества сессий DTLS и SCTP, а также сложность механизмов обхода NAT (STUN/TURN) на стороне сервера приводят к избыточному потреблению ресурсов CPU и ограничивают возможности горизонтального масштабирования. Альтернативным и более эффективным решением выступает протокол WebTransport, функционирующий поверх транспортного протокола QUIC (RFC 9000) [1]. Технология QUIC объединяет транспортный и защищенный уровни в единое рукопожатие (TLS 1.3), а также решает фундаментальную проблему протокола TCP – блокировку начала очереди (Head-of-Line Blocking) за счет мультиплексирования независимых потоков данных в рамках одной сессии. Применение WebTransport позволяет реализовать передачу медиаданных через ненадежные датаграммы, что минимизирует задержки в условиях сетевого джиттера и потери пакетов, неизбежных в беспроводных и мобильных сетях [2].

В рамках реализации транспортного уровня системы используется разделение данных на два типа каналов WebTransport: Streams (потоки) и Datagrams (датаграммы). Надежные двунаправленные потоки применяются для передачи управляющих сигналов, сообщений чата и метаданных конференции, где важна гарантированная доставка. В свою очередь, механизм датаграмм задействован для трансляции аудио- и видеофреймов. Поскольку датаграммы в QUIC не требуют подтверждения получения и повторной отправки при потере, это позволяет избежать «замирания» видео при кратковременных сетевых сбоях, обеспечивая минимально возможный RTT.

Одной из ключевых инноваций системы является использование архитектуры Selective Forwarding Unit (SFU) в сочетании с низкоуровневым кодированием на стороне клиента. В отличие от традиционных MCU-систем (Multipoint Control Unit), которые выполняют декодирование, микширование и повторное кодирование всех входящих потоков в один результирующий поток, SFU-сервер выполняет роль интеллектуального маршрутизатора пакетов. Это позволяет радикально снизить задержку обработки данных на стороне сервера и обеспечить возможность индивидуальной адаптации битрейта для каждого получателя без дополнительных вычислительных затрат. Использование языка Go для реализации SFU-движка позволяет эффективно управлять памятью и сетевыми буферами, минимизируя влияние циклов сборки мусора на стабильность потока.

Проектируемая система ВКС представляет собой распределенный программный комплекс. Архитектурное решение базируется на строгом разделении управляющей логики и контура высоконагруженной обработки трафика. Взаимодействие компонентов организовано через микросервисную топологию, включающую следующие функциональные узлы:

1 REST API Server (Golang): реализует бизнес-логику управления виртуальными комнатами, авторизацию и координацию доступа. Выбор языка программирования Go обоснован его эффективностью в задачах конкурентной обработки сетевых запросов благодаря легковесным потокам и оптимизированному планировщику задач. Сервер отвечает за создание уникальных идентификаторов конференций и генерацию асимметрично подписанных токенов доступа.

2 Media Server Cluster: группа независимых узлов, работающих по принципу Selective Forwarding Unit (SFU). Основной задачей узла является интеллектуальная маршрутизация бинарных пакетов между участниками сессии. Реализация SFU-движка на языке Go позволяет достичь максимальной пропускной способности при минимальном времени обработки пакета, так как сервер выполняет лишь селективную пересылку данных без ресурсоемкого транскодирования видеопотока. Применение SFU-архитектуры позволяет серверу динамически адаптировать количество пересылаемых потоков в зависимости от пропускной способности канала конкретного клиента.

3 Распределенная шина данных NATS: используется в качестве высокопроизводительного транспорта для межсерверной синхронизации состояний. Использование модели «Издатель-

Подписчик» (Pub/Sub) позволяет реализовать паттерн распределенной маршрутизации трафика. Когда участник отправляет медиапакет на локальный узел, сервер инкапсулирует его и публикует в соответствующий топик NATS. Остальные узлы кластера, обслуживающие других участников этой же комнаты, мгновенно получают пакет и пересылают его конечным клиентам. Каждый медиа-сервер кластера подписывается на топики активных комнат, что обеспечивает бесшовное взаимодействие пользователей, даже если они физически подключены к разным вычислительным узлам в различных регионах.

Для обеспечения персистентности данных в системе используется СУБД PostgreSQL, отвечающая за хранение метаданных пользователей, настроек виртуальных комнат и прав доступа. Взаимодействие с базой данных оптимизировано для обеспечения минимального времени отклика при авторизации. Помимо оперативного обмена данными, в системе реализован узел хранения, работающий с S3-совместимыми объектными хранилищами. После завершения конференции архивные файлы видеозаписей в формате MP4 автоматически выгружаются в хранилище, а соответствующие метаданные (длительность, список участников, ссылка на файл) становятся доступными пользователям через REST API, что позволяет организовать полноценный доступ к архивам встреч.

Особое внимание в работе уделено механизмам информационной безопасности. В отличие от традиционного использования JWT-токенов, подверженных рискам атак типа algorithm agility, в системе внедрен современный стандарт PASETO версии v4.public [3]. Данный подход позволил реализовать полноценную концепцию Stateless-авторизации: каждый медиа-сервер кластера проводит автономную криптографическую верификацию подписи токена с использованием открытого ключа (алгоритм Ed25519). Это исключает необходимость выполнения gRPC-запросов к центральной базе данных или серверу авторизации при установлении каждого нового соединения, что снижает задержку входа в комнату и общую нагрузку на сетевой контур.

На стороне клиентского веб-приложения применяется технология WebCodecs API, предоставляющая прямой низкоуровневый доступ к аппаратным видеокодекам абонентского устройства (H.264, VP9, AV1). Процесс кодирования и декодирования кадров выносится в отдельные фоновые потоки, что позволяет минимизировать нагрузку на основной поток интерфейса и обеспечить плавность воспроизведения видео в разрешении Full HD и выше. Для сериализации данных используется формат Protocol Buffers (Protobuf), который обеспечивает минимальный размер бинарных заголовков по сравнению с текстовыми форматами (JSON, XML), что критически важно для экономии трафика в WebTransport датаграммах. Строгая типизация Protobuf в связке с языком Go исключает ошибки интерпретации структуры пакета на разных концах соединения, а скорость десериализации бинарного потока происходит быстрее парсинга JSON-строк.

Для повышения надежности системы в условиях нестабильного сетевого окружения разработан алгоритм ускоренного переподключения, использующий возможности 0-RTT протокола QUIC. В случае кратковременного обрыва связи или переключения между сетями, клиентское приложение восстанавливает сессию связи практически мгновенно, без повторного прохождения полной процедуры аутентификации и согласования параметров шифрования.

Перспективы дальнейшего развития системы связаны с внедрением алгоритмов глубокого обучения для интеллектуального подавления эха и фоновых шумов непосредственно в браузере клиента, а также исследованием возможности использования кодека AV1 для еще более эффективного сжатия данных без потери качества визуального восприятия.

Таким образом, разработка программного средства ВКС на базе синергии технологий Go, WebTransport и NATS является перспективным направлением. Предложенные архитектурные решения позволяют создавать отечественные коммуникационные платформы, способные эффективно функционировать в условиях экстремально высоких нагрузок, обеспечивая при этом высокий уровень безопасности и качества обслуживания пользователей.

Список использованных источников:

1. RFC 9000. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9000.

2. WebTransport Over HTTP/3. W3C Working Draft. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.w3.org/TR/webtransport/.

3. PASETO (Platform-Agnostic SEcurity TOkens) Specification. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://paseto.io/.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО УЧЁТА И АНАЛИЗА МУЗЕЙНЫХ КОЛЛЕКЦИЙ ПРЕДМЕТОВ АРХЕОЛОГИИ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ .NET

Гуща А.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Можей Н.П. – канд. физ.- мат. наук, доцент

В работе рассматриваются проблемы, с которыми сталкиваются современные музеи, специализирующиеся на экспонировании предметов истории и археологии, в частности вопросы их учёта и сохранения максимального информационного потенциала коллекций. Обосновывается применение новых методов и форматов описания артефактов в цифровой среде. В заключении приводятся примеры позитивных результатов от внедрения нового программного решения для научно-фондовой работы музея Института истории НАН Беларуси.

Артефакт – основной носитель информации о прошлом. Знания о культуре, политике, быте древнего мира, которые учёные извлекают из археологических находок, и тот опыт предков, который люди перенимают из этих знаний, бесценны. Однако любым физическим объектам свойственно разрушаться со временем. Даже сохранение в музее и тщательное соблюдение протоколов обращения с экспонатами не могут препятствовать нанесению им микроповреждений во время реставрации или перемещения на выставки. Не редки случаи краж, утери артефактов, что полностью «стирает» их для истории. Поэтому критически важно зафиксировать как можно больше информации о находке, пока она доступна для исследователей, а внешнее воздействие на неё минимально.

Описания музейных экспонатов создаются уже более 150 лет и хранятся на носителях различных видов: в бумажных картотеках, на фотоплёнках, микрофильмах и т.п. В конце XX – начале XXI века эти материалы стали переводится в цифровую среду, появились первые компьютерные программы по учёту и хранению данных о коллекциях предметов археологии, истории и искусства, способные оперировать текстовыми и примитивными графическими форматами файлов [1]. К сожалению, Республика Беларусь до сих пор остаётся на этом этапе. Используемые в отечественном музееведении программные средства, например «АМС-5» или веб-портал «ГКМФ РБ», не поддерживают современные формы представления данных такие, как 3D-модели, гигапиксельные изображения, результаты рентгеновского и спектроскопического анализа. Также они не рассчитаны на столь большие объемы коллекций, которыми обладают музеи страны сегодня, из-за чего с каждым годом скорость проведения операций с массивами объектов в их виртуальном хранилище неуклонно падает.

Для преодоления технологического разрыва было принято решение о разработке в сотрудничестве с Институтом истории НАН Беларуси, имеющим самые крупные в стране фонды археологических находок, программного средства, ориентированного на комплексную автоматизацию музейной деятельности. Новая система должна была не только выполнять учёт и хранение данных в современных форматах (текст, PNG/GPEG, PDF, OBJ, TIFF) но и позволять составлять необходимую документацию (акты сдачи-приемки, инвентарные книги, отчеты), а также проводить статистический анализ массовых археологических материалов.

При проектировании и программной реализации проекта использовался передовой опыт «Центра исследований и реставрации музеев Франции» в области визуализации и обработки данных об экспонатах. Ниже подробнее рассмотрены методы, ранее не применявшиеся в отечественных учётно-фондовых системах.

Графические материалы в сфере музееведения являются самыми информативными, так как дают более наглядное представление об экспонате, чем текстовое описание. И чем качественнее изображение, тем полнее представление о предмете. Поэтому одним из ключевых технических решений стала реализация механизма работы с гигапиксельными изображениями на основе метода пирамидальных плиточных структур (pyramidal tiled images) [2]. Исходный снимок преобразуется в набор копий разной детализации, которые разбиваются на плитки. При работе загружается только видимая в области экрана часть снимка с соответствующим уровнем детализации, что позволяет просматривать изображения в сверхвысоком разрешении без перерасхода ресурсов оперативной памяти. Схематичное представление пирамидально-плиточной структуры приведено на рисунке 1.

Для демонстрации 3D-моделей использована схожая по идее технология под названием GigaVoxcels, которая представляет данные в виде воксельной пирамиды (Octree) и подгружает только те детали, которые видны камере и находятся на нужном расстоянии.

Ещё одним уникальным решением является интеграция с веб-порталом «Археологическая карта Республики Беларусь», что позволяет связать пространственные данные о месте находки с информацией об артефакте. Таким образом исследователи получают более комплексное видение

исторических процессов. Например, можно отследить территориальное распространение во времени ремесленных методов или элементов культа по характерным материальным источникам.

Также была внедрена возможность проведения статистических исследований массовых находок таких, как остеологические материалы, осколки керамики и плинфы, металлические изделия, печные изразцы др. Всего программа позволяет проводить пять видов подобных исследований:

– анализ временных рядов – применяется для прослеживания изменения техник и материалов, используемых при изготовлении определенных предметов на протяжении веков;

– дескриптивный анализ – с его помощью описываются количественные характеристики коллекций. Например, отношение процентного содержания костей диких животных к домашним может показать, какой род занятий (животноводство или охотничий промысел) был предпочтителен для людей определённой зоны расселения;

– кластерный анализ – позволяет определить количество уникальных групп в выборке артефактов по отобранным признакам. Например, для наконечников стрел – по их размерам, металлу изготовления и т. д.;

– дисперсионный и корреляционный анализы – необходимы для определения степени различия предметов в одной группе и схожести предметов разных групп между собой соответственно.

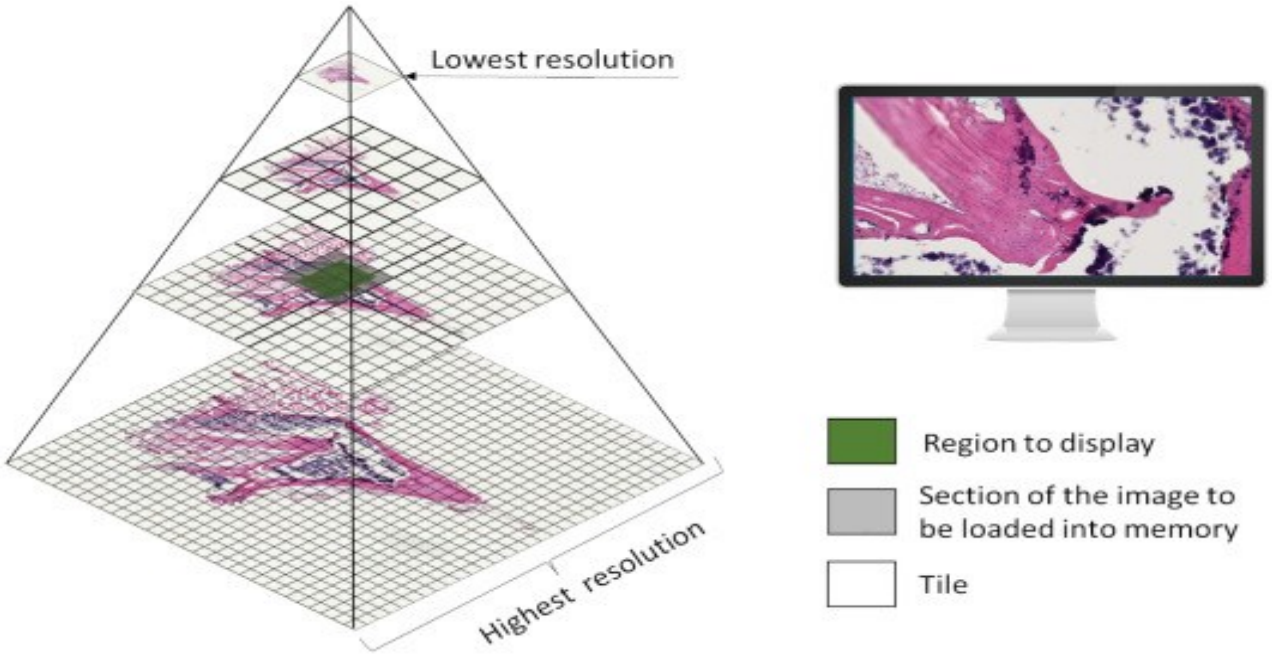


Рисунок 1 – Визуализация пирамидально-плиточной структуры гигапиксельного изображения [3]

В результате удалось добиться значительных позитивных результатов от внедрения разрабатываемого программного решения для научно-фондовой работы музея Института истории НАН Беларуси. Они включают:

– повышение эффективности труда сотрудников за счёт автоматизации учёта и формирования отчётной документации;

– сохранение большего информационного потенциала коллекций благодаря поддержке современных форматов данных;

– ускорение научных исследований за счёт встроенных инструментов статистического анализа, позволяющих обрабатывать большие объёмы массовых находок;

– расширение возможностей для популяризации археологии среди населения благодаря интеграции с общедоступной геоинформационной системой «Археологическая карта Республики Беларусь».

Список использованных источников:

1. Юмашева, Ю. Ю. Информационные технологии в научно-исследовательской деятельности музеев: от электронных каталогов к методам искусственного интеллекта / Ю. Ю. Юмашева, Д. Ю. Гук // Историческая информатика. – 2022. – № 3 (41). – С. 114-155. – DOI 10.7256/2585-7797.2022.3.38813. – EDN CJBDOV.

2. Williams, Lance. Pyramidal parametrics / Lance Williams // Proceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '83, Detroit, USA, 1983. – New York: ACM, 1983. – P. 1–11. – DOI: 10.1145/800059.801126.

3. Rodrigo Escobar Díaz Guerrero, Lina Carvalho, Thomas Bocklitz, Juergen Popp, José Luis Oliveira. Software tools and platforms in Digital Pathology: a review for clinicians and computer scientists // Journal of Pathology Informatics. – 2022. – Vol. 13. – DOI: 10.1016/j.jpi.2022.100103.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА В КАЧЕСТВЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО МОНИТОРА

Дадуш М.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ярмолик В.Н. – д-р техн. наук, профессор

В работе рассмотрены факторы, повлиявшие на идею создания программного комплекса, обоснование технических решений, а также проблемы, с которыми пришлось столкнуться во время разработки. Описаны принципы взаимодействия серверного компонента с операционной системой и передачи изображения с виртуального графического вывода на удаленное устройство.

Использование мобильного устройства в качестве дополнительного компьютерного монитора имеет ряд преимуществ перед физическими специализированными аналогами. Во-первых, финансовая сторона вопроса. С помощью специального программного обеспечения пользователь может использовать планшетный компьютер либо смартфон в роли как физического монитора, так и графического планшета, избавляясь от необходимости приобретения дорогостоящего оборудования. Во-вторых, мобильность. Использование мобильных устройств в роли компьютерного монитора избавляет от привязки к конкретному местоположению.

На сегодняшний день представлено множество программных средств для дублирования основного экрана и передачи изображения на удаленное устройство. Однако количество решений для расширения рабочего стола за счет экрана мобильного устройства минимально, при этом доступность их использования ограничивается операционными системами Windows и MacOS. Разработка подобного программного комплекса с поддержкой операционных систем семейства GNU/Linux является перспективной и позволит занять нишу рынка на фоне их растущей популярности.

Отличительная характеристика программного комплекса заключается в достижении единообразия предоставляемого функционала среди операционных систем GNU/Linux, так как системы данного класса характеризуются гетерогенностью компонентного состава. На сегодняшний день существует более сотни дистрибутивов с различными системными библиотеками, стандартными программами, графическим окружением и драйверами устройств. Некоторые дистрибутивы поставляются в разных версиях и отличаются предустановленными графическим окружением и набором прикладных приложений. Современные графические оболочки характеризуются существенными различиями в функциональных возможностях и механизмах взаимодействия с системными компонентами. Единственным унифицированным уровнем различных дистрибутивов остается ядро Linux. Отсюда вытекает необходимость использования библиотек, полагающихся только на функционал ядра, и разработки собственных драйверов.

Существующие для дистрибутивов GNU/Linux аналоги полностью полагаются на возможности графического сервера, из-за чего разработчики сталкиваются с необходимостью написания значительных объемов платформозависимого кода. Так, большинство программного обеспечения данного класса поддерживает X11, но не поддерживает или ограниченно поддерживает Wayland, что особенно критично, так как разработчики популярных дистрибутивов отказываются от X11 в пользу Wayland. Использование драйвера виртуального графического адаптера – единственный на данный момент способ нивелировать различия между графическими подсистемами.

С учетом поддержки нескольких операционных систем требуется разработать драйвер виртуального графического адаптера для каждой платформы. Обобщить кодовую базу для драйверов невозможно, так как имеются существенные различия не только в API ядра каждой операционной системы, но и в парадигме взаимодействия с его компонентами. Вне зависимости от платформы драйвер выполняет следующие функции:

1) инициализация виртуального графического адаптера;

2) управление виртуальными графическими выводами;

3) управление видеорежимами для каждого графического вывода;

4) захват изображения с вывода и передача буфера процессам пользовательского пространства (серверу).

Особенность этапа инициализации виртуального графического адаптера состоит в невозможности определить путь устройства. API Windows WDF (Windows Driver Frameworks) предоставляет функцию, благодаря которой разрешается назначить известное серверу имя устройства. Для доступа по присвоенному имени нужно открыть устройство по пути с префиксом \\.\GLOBALROOT\ [1]. В API ядра Linux аналогичная возможность отсутствует, из-за чего в процессе инициализации сервер вынужден перебирать устройства cardX, где X – целое неотрицательное число, из каталога /drv/dri, чтобы определить верный графический адаптер и отличить его от физической видеокарты.

При установлении соединения с клиентом сервер обращается к драйверу адаптера для создания виртуального графического вывода посредством отправки IOCTL (Input/Output Control) кода. Чтобы перевести вывод в активное состояние, необходимо идентифицировать монитор с помощью блока данных EDID (Extended Display Identification Data) [2], предварительно отредактировав информацию о мониторе и поддерживаемые видеорежимы.

В общем случае для полной поддержки операционной системой виртуального адаптера графики нужно разработать два драйвера: пользовательского режима (в Linux вместо драйвера пользовательского режима используется библиотека API), который содержит реализацию графического API, (DirectX в Windows, Vulkan и OpenGL в Linux), и режима ядра, занимающийся управлением памяти и взаимодействием с оборудованием (см. рис. 1). Создание библиотеки графического API требует огромных временных и человеческих ресурсов, поэтому целесообразно использовать уже имеющуюся в компьютере видеокарту для отрисовки и обойтись разработкой только драйвера режима ядра, с помощью которого производить управление виртуальными выводами и запрашивать кадры из памяти видеокарты. В Windows и Linux [4] описанная возможность уже реализована, следовательно, остается только вручную управлять переключением кадров на виртуальном выводе посредством отправки событий vblank.

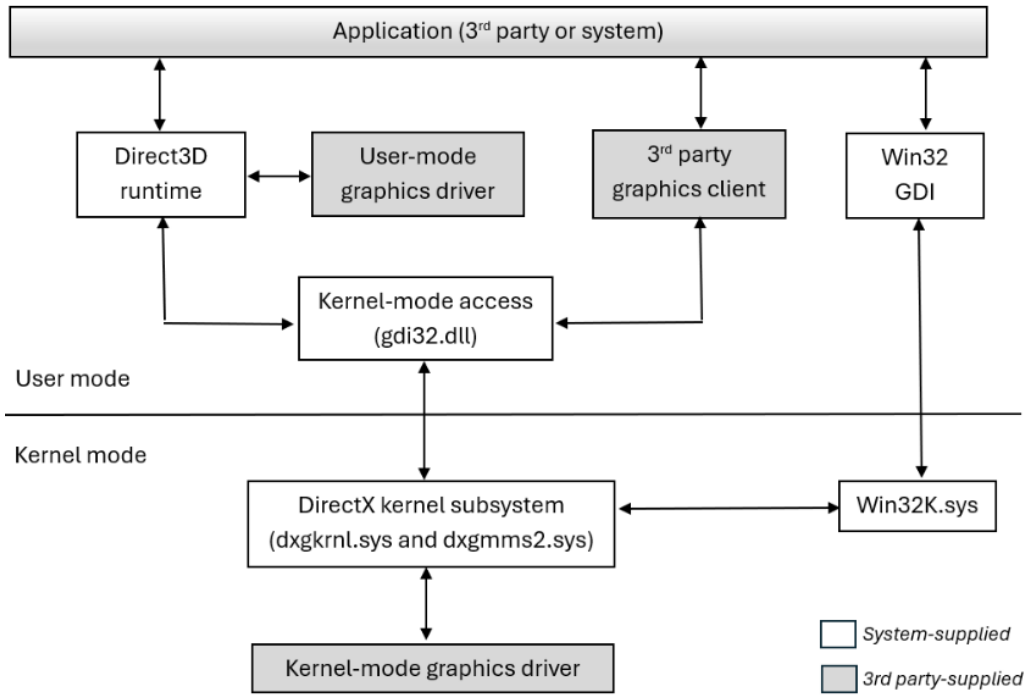


Рисунок 1 – Архитектура графического стека Windows [3]

Захват кадра осуществляется также посредством отправки IOCTL кода. Результат вызова – дескриптор буфера пикселей кадра экрана в формате ARGB. При передаче изображения по Wi-Fi критически важно использовать потоковое сжатие, так как трансляция экрана в разрешении FullHD с частотой обновления экрана 60 Гц путем отправки несжатых кадров в формате 32 бит на пиксель приводит к избыточным нагрузкам на сеть, так как средний объем передаваемых данных – 5 Гбит/с.

Таким образом, реализация графических драйверов – необходимость при реализации кроссплатформенного паритета. В отличие от существующих решений, данная разработка обеспечивает унифицированный алгоритм взаимодействия клиента и сервера: установление соединения, подключение монитора, трансляция изображения, отключение монитора – в рамках единой кодовой базы вне зависимости от используемой операционной системы и графической, подсистемы.

Список использованных источников:

1. Naming Files, Paths and Namespaces – Win32 apps : Microsoft Learn. – URL: https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/fileio/naming-a-file (дата обращения: 15.03.2026).

2. VESA Enhanced EDID Standard Version 1.4 : Release A, Revision 2. – Video Electronics Standards Association, 2006. – URL: https://vesa.org/vesa-standards (дата обращения: 15.03.2026).

3. WDDM Architecture – Windows Drivers : Microsoft Learn. – URL: https://learn.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/display/windows-vista-and-later-display-driver-model-architecture (дата обращения 16.03.2026).

4. Chapter 35. PRIME Render Offload : Nvidia. – URL: https://download.nvidia.com/XFree86/Linux-x86_64/435.17/README/primerenderoffload.html (дата обращения: 16.03.2026).

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАНЯТОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ ПО ДАННЫМ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

Жук Я.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Иванюк А.А. – д-р техн. наук, профессор

Рассматривается разработка программной модели определения занятости помещения по временным рядам температуры и влажности в среде Home Assistant. Постановка задачи основана на практической ситуации, когда в системе «умного дома» доступен ограниченный набор датчиков и требуется принимать решение о занятости помещения дополнительным аналитическим модулем без применения датчиков движения и камер. Предлагается событийно-ориентированная архитектура с передачей телеметрии по MQTT, выделением этапа предобработки, нейросетевой оценкой вероятности занятости и последующей логической стабилизацией решения. Практическая значимость заключается в повышении достоверности оценки занятости без использования датчиков движения и камер, а также в возможности применения результатов в сценариях управления отоплением и вентиляцией.

Актуальность исследования определяется распространением локальных платформ автоматизации и потребностью в интеллектуальном управлении помещениями при ограниченной сенсорной инфраструктуре. На практике чаще всего доступны только датчики температуры и влажности, тогда как значительная часть известных подходов к определению присутствия опирается на расширенный набор сенсоров, включая контроль CO2, датчики движения и видеонаблюдение [1, 2]. Это увеличивает стоимость внедрения и усложняет сопровождение, поэтому косвенное определение занятости по уже имеющейся телеметрии является обоснованной научно-технической задачей.

В рамках предлагаемого подхода архитектуру целесообразно строить как событийно-ориентированную. Предполагается, что Home Assistant (HA) обеспечивает интеграционный контур и взаимодействие с BLE-датчиком, а обмен данными между компонентами выполняется по протоколу MQTT в модели «издатель–подписчик» [3, 4]. На рисунке 1 изображена общая архитектура предлагаемого взаимодействия ML-сервиса с HA.

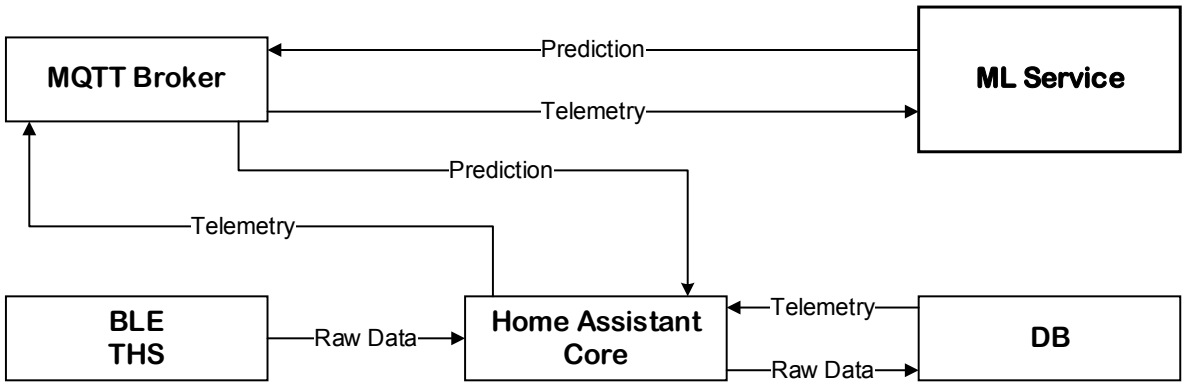


Рисунок 1 – Архитектура взаимодействия HA, MQTT-брокера и ML-сервиса

На текущем этапе уже сформирован исторический массив телеметрии длительностью около двух лет для четырех каналов измерений (температура и влажность в двух помещениях). После приведения временной оси к единому шагу получены агрегированные ряды для двух режимов: анализ на шаге 30 минут и обучение на более детальной сетке 5 минут. Двухлетний горизонт наблюдений позволяет учитывать сезонные и недельные вариации микроклимата, а также различия между рабочими и нерабочими режимами эксплуатации помещения, снижая риск привязки к частным кратковременным сценариям. Одновременно большой объём примеров с шагом 5 минут обеспечивает статистическую устойчивость оценки весов и формирование обучающих окон достаточной длины без потери динамики сигнала. Выборка также служит основой корректной проверки качества за счёт временного разделения на обучающую, проверочную и контрольную части: это позволяет оценивать модель на будущих интервалах, настраивать рабочий порог классификации и параметры логической стабилизации сопоставлять версии модели в единых условиях и выстраивать управляемый жизненный цикл переобучения.

Проектируемая логика программной модели опирается на переход от анализа одиночных измерений к оконной обработке временного ряда. Планируется использовать скользящее окно фиксированной длины, для которого рассчитываются статистические признаки, динамические

признаки, а также показатели устойчивости сигнала. Такой выбор мотивирован тем, что занятость проявляется преимущественно в характере изменения параметров во времени.

Этап предобработки предлагается выделить в самостоятельный вычислительный контур. На данном этапе выполнять нормализацию временной оси, фильтрацию выбросов, обработку пропусков и формирование признаков качества входных данных. Для исключения утечки информации обучение и проверку качества целесообразно проводить с временным разделением выборок, то есть проверять модель на будущих интервалах относительно обучающей части.

Для основной задачи определения занятости предлагается использовать нейросетевую модель классификации типа «многослойный персептрон», обучаемую на оконных признаках. Базовая конфигурация модели предполагает входной слой размерности, равной числу сформированных признаков окна, два–три скрытых слоя с нелинейными функциями активации, механизм регуляризации и выходной слой с сигмоидальной функцией, возвращающий вероятность принадлежности к классу «занято». Обучение планируется проводить по функции бинарной кросс-энтропии с учетом весов классов, что необходимо при неравномерном распределении состояний «занято/свободно».

Система будет дополнена вспомогательной моделью прогноза температуры на заданном горизонте, которая может строиться на том же признаковом пространстве, но решать регрессионную задачу. Такой подход позволит унифицировать этапы предобработки, упростить сопровождение программного средства и одновременно получить два практически значимых результата: оценку занятости и прогноз параметра микроклимата для упреждающих автоматизаций.

Обучение предлагается организовать как воспроизводимый вычислительный конвейер. Из непрерывного потока телеметрии будут формироваться обучающие примеры по принципу «одно окно наблюдений – одна метка состояния». На этапе обучения планируется учитывать дисбаланс классов «занято/свободно» за счет взвешивания классов и настройки рабочего порога по проверочной выборке. Качество классификатора предполагается оценивать метриками точности и полноты; для эксплуатационной устойчивости дополнительно целесообразно анализировать частоту переключений статуса и долю времени с низким коэффициентом уверенности. Для прогноза температуры планируется использовать регрессионные показатели ошибки, отражающие практическую полезность прогноза в задачах управления отоплением и вентиляцией.

В рабочем режиме аналитический сервис предполагается реализовать как непрерывный вычислительный контур. После получения нового MQTT-сообщения будут выполняться проверка структуры и диапазонов входных данных, обновление буфера окна, пересчет признаков, нормализация, вычисление результата по модели, логическая стабилизация и публикация результата в MQTT-топики HA. При обнаружении деградации качества предусматривается контур переобучения: накопление актуальной истории, повторная проверка, версионирование и безопасная замена модели в рабочем сервисе только при подтвержденном неухудшении целевых метрик.

Существенным элементом качества предлагается сделать пользовательскую обратную связь в HA. При ошибочном определении занятости пользователь может фиксировать корректировку, которая будет сохраняться как дополнительная разметка. Эти отметки не предполагается применять для мгновенного изменения весов в рабочем режиме; их целесообразно включать в очередной цикл дообучения после пакетной проверки и валидации новой версии. Такой механизм должен обеспечить устойчивость контура и снизить риск дестабилизации из-за единичных ошибочных коррекций.

Для практической реализации планируется использовать следующий инструментальный стек: Python 3.11; библиотеки обработки данных и математического анализа; средства машинного обучения и оценки качества; обмен сообщениями по MQTT; интеграционную платформу HA для публикации расчетных сущностей и сценариев автоматизации. Результаты вычислений предполагается передавать в HA как отдельные сущности: бинарный датчик занятости, датчик вероятности и коэффициента уверенности, а также датчик прогноза температуры.

Итогом проектирования программной модели должно стать программное средство, которое на основе существующей двухлетней телеметрии и последующей потоковой обработки обеспечивает устойчивое определение занятости помещения при ограниченном наборе сенсоров и поддерживает прогноз температуры для упреждающего управления микроклиматом. По завершении разработки планируется получить воспроизводимый обучающий контур, версионируемый рабочий модуль вычисления, а также подтвержденную метриками и практической интеграцией применимость решения в среде HA.

Список использованных источников:

1. Candanedo L.M., Feldheim V. Accurate occupancy detection of an office room from light, temperature, humidity and CO2 measurements using statistical learning models // Energy and Buildings. – 2016. Vol. 112. C. 28–39.

2. Mena C., Ceballos A. Measuring Indoor Occupancy through Environmental Sensors: A Systematic Review on Sensor Deployment // Sensors. – 2022. Vol. 22, No. 10. Art. 3770.

3. Home Assistant Architecture [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developers.home-assistant.io/docs/architecture_index/. – Дата доступа: 26.02.2026.

4. HiveMQ. MQTT – The Standard for IoT Messaging [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hivemq.com/mqtt/. – Дата доступа: 14.03.2026.

УПРАВЛЕНИЕ ПУЛОМ СОЕДИНЕНИЙ И МАРШРУТИЗАЦИЯ ЗАПРОСОВ В POSTGRESQL

Киселёв А.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Можей Н.П. – канд. физ.- мат. наук, доцент

Рассмотрена проблема высокой концентрации подключений к PostgreSQL и связанного с этим снижения производительности и усложнения эксплуатации. Проанализированы типовые подходы и их ограничения с точки зрения наблюдаемости и административного управления. Предложено программное средство PgPooler, объединяющее управление пулом соединений (connection pooling), маршрутизацию соединений по правилам конфигурации, сбор аналитики и интерфейсы мониторинга и управления.

PostgreSQL широко применяется в корпоративных и облачных системах [1, 2]. При росте числа одновременных соединений накладные расходы на их установление и обслуживание большого количества активных сессий становятся фактором, ограничивающим масштабирование, особенно при коротких запросах и высокой конкуренции за ресурсы БД [2]. Типовой способ снижения нагрузки – применение внешнего пуллера: ограничение числа подключений к серверу БД и их переиспользование для множества клиентских сессий.

Существующие пуллеры эффективно решают задачу ограничения числа подключений к серверу БД, однако в типовом сценарии эксплуатации часто требуют дополнительной инфраструктуры: централизованного мониторинга, хранения истории соединений и запросов, а также удобных средств оперативного управления (завершение сессий, блокировка пользователей, управление конфигурацией) [3, 4]. Это повышает трудоёмкость сопровождения и увеличивает время реакции на инциденты.

PgPooler реализован как прокси-сервер уровня соединений между клиентами PostgreSQL и серверами БД. Ядро написано на C++ (стандарт C++17) и построено на событийной модели неблокирующего ввода‑вывода (библиотека libevent), что позволяет обслуживать множество клиентских подключений при предсказуемом потреблении ресурсов.

Поддерживается два варианта развёртывания ядра: с единственным процессом (Listener) и с многопроцессной схемой «диспетчер – воркеры». В варианте с диспетчером один процесс (Dispatcher) принимает входящие TCP-соединения на заданном порту и при необходимости читает первый пакет от клиента (стартовое сообщение или SSL-запрос). По правилам маршрутизации диспетчер определяет целевой бэкенд; затем дескриптор соединения и буфер передаются одному из N воркеров через Unix domain socket (handoff). Воркер получает уже прочитанные данные и продолжает обработку сессии: аутентификация с выбранным сервером БД, работа с пулом соединений и проксирование трафика. Таким образом, приём новых соединений и их распределение по воркерам выполняет диспетчер, а каждая клиентская сессия обрабатывается одним воркером до отключения; это позволяет масштабировать нагрузку по ядрам процессора и снижать конкуренцию за общий цикл событий. Число воркеров задаётся в конфигурации.

Конфигурация задаётся в формате YAML отдельными файлами: pgpooler.yaml (адрес и порт прослушивания, пути к файлам бэкендов и правил маршрутизации, настройки воркеров, логирования и аналитики), backends.yaml (список серверов БД – хост, порт, параметры пулов по умолчанию), routing.yaml (правила маршрутизации по полям user и database – точное совпадение, список значений, префикс, регулярное выражение, правило по умолчанию). Ключевое решение – маршрутизация по параметрам стартового сообщения протокола PostgreSQL до установления полного подключения к серверу БД; выбор целевого бэкенда и пула выполняется до фазы аутентификации.

Общая схема взаимодействия приведена на рисунке 1.

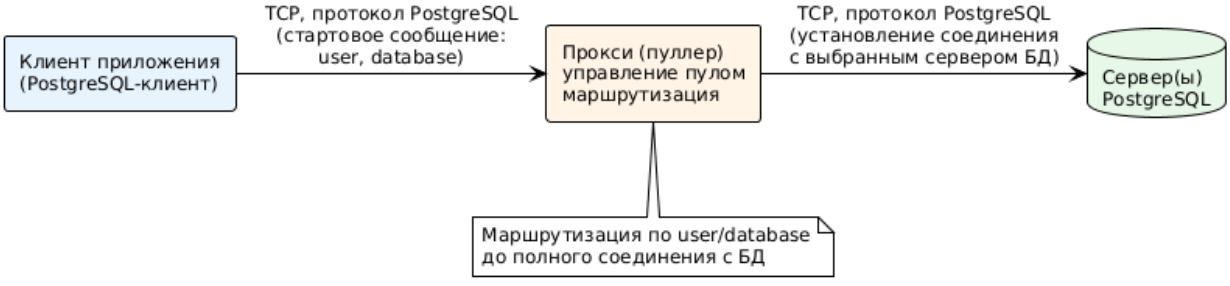


Рисунок 1 – Схема взаимодействия клиента, прокси-сервера и сервера PostgreSQL

Управление пулом настраивается режимами работы («сеанс», «транзакция», «оператор») и параметрами пулов (размеры, тайм‑ауты) [2–4]. В режиме «сеанс» выданное клиенту соединение закреплено за ним до отключения; в режиме «транзакция» соединение возвращается в пул после завершения транзакции (по сообщению ReadyForQuery с состоянием idle); в режиме «оператор» – после каждого выполненного запроса. При выдаче ранее использованного соединения на сервер БД отправляется команда сброса состояния (DISCARD ALL). При отсутствии свободного соединения в пуле клиентская сессия ставится в очередь ожидания с настраиваемым тайм‑аутом; при его истечении клиенту возвращается ошибка.

Каждому клиентскому подключению соответствует один экземпляр ClientSession в ядре: приём первого сообщения, установление соединения с бэкендом, проксирование обмена при аутентификации с кэшированием ответа до ReadyForQuery, обращение к пулу (take – получение соединения или постановка в очередь ожидания; put – возврат соединения в пул с сохранением кэша стартового ответа), определение момента возврата соединения в пул по режиму и прозрачная передача сообщений между клиентом и сервером БД. Пул соединений (BackendConnectionPool) привязан к ключу (бэкенд, пользователь, база данных); для каждого ключа хранятся свободные соединения к серверу БД и очередь сессий, ожидающих выдачи соединения (ConnectionWaitQueue). При появлении свободного соединения или по тайм-ауту ожидающие сессии уведомляются. Маршрутизатор (Router) по паре (user, database) возвращает выбранный бэкенд и параметры пула (размер, режим, тайм-ауты).

Обмен с клиентом и бэкендом осуществляется через бинарные сообщения протокола PostgreSQL (тип, длина, тело); прокси не разбирает SQL и пересылает сообщения без изменений, сохраняя совместимость с клиентами и версиями протокола. В режимах «транзакция» и «оператор» момент возврата соединения в пул задаётся ReadyForQuery ('Z') и байтом состояния транзакции I, T, E (idle / в транзакции / ошибка): в режиме «транзакция» – при переходе в idle после COMMIT/ROLLBACK, в режиме «оператор» – при каждом Z. Сессия чередует состояния Forwarding (прокси запроса и ответа) и WaitingForBackend; при данных от клиента из WaitingForBackend выполняется повторный take у пула.

Предусмотрены тайм-ауты ожидания выдачи соединения из пула (ошибка клиенту при превышении), простоя в пуле и при необходимости ограничение времени жизни соединения по возрасту. При недоступности сервера БД зависящие клиентские соединения закрываются корректно; событие фиксируется в логе и при включённой аналитике – в таблице events. Список blocked_users проверяется при подключении; блокировка и разблокировка – через REST или веб-интерфейс, хранение в базе аналитики. Конфигурация перезагружается без перезапуска процесса. Развёртывание: исполняемый файл ядра и YAML на диске; при необходимости – Docker Compose с контейнерами pgpooler, PostgreSQL, базы аналитики и веб-интерфейса в единой сети.

База аналитики (PostgreSQL, схема pgpooler) накапливает историю: connection_sessions (сессия, воркер, адрес клиента, пользователь, база, бэкенд, режим пула, время подключения и отключения), query_fingerprints и queries (отпечаток, хеш, текст запроса, длительность, тип команды), pool_snapshots (размер пула, число свободных, занятых и ожидающих соединений) – для отчётности и визуализации. Запись из ядра прокси при включённой настройке. Администрирование – отдельный сервис: REST API (HTTP, JSON) – статус, активные сессии, завершение сессии, блокировка пользователя, перезагрузка конфигурации; веб‑панель – нагрузка по пулам и серверам БД, сессии, блокировки, графики аналитики. REST и веб не входят в ядро и обращаются к базе аналитики и при необходимости к ядру.

Разработанное программное средство может применяться в организациях, где PostgreSQL – основная или вспомогательная СУБД (дата-центры, облачные провайдеры, корпоративные информационные системы). Типичные сценарии: централизованный пул соединений для множества приложений с визуализацией нагрузки и возможностью завершать долгие запросы и блокировать пользователей без консоли сервера; аналитика по подключениям и запросам для отчётности и аудита; развёртывание в Docker вместе с кластером PostgreSQL и веб-интерфейсом в едином сценарии.

Таким образом, PgPooler предлагает интегрированный подход к эксплуатации PostgreSQL: сочетание управления пулом соединений и маршрутизации по правилам конфигурации с наблюдаемостью и административным управлением в единой системе, что снижает трудозатраты сопровождения и ускоряет реакцию на эксплуатационные ситуации. Многопроцессная схема с диспетчером и воркерами позволяет масштабировать ядро прокси по ядрам процессора при росте числа одновременных соединений.

Список использованных источников:

1. Моргунов, Е. П. PostgreSQL. Основы языка SQL : учеб.-практ. пособие / Е. П. Моргунов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 336 с.

2. Obe, R. PostgreSQL : Up and Running / R. Obe, L. Hsu. – 3rd ed. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2017. – 314 p.

3. Schönig, H.-J. Mastering PostgreSQL 15 : Advanced techniques to build and manage scalable, reliable, and fault-tolerant database applications / H.-J. Schönig. – Birmingham : Packt Publishing, 2023. – 522 p. – ISBN 978-1-80324-834-9.

4. Riggs, S. PostgreSQL 14 Administration Cookbook : Over 175 proven recipes for database administrators to manage enterprise databases effectively / S. Riggs, G. Ciolli. – Birmingham : Packt Publishing, 2022. – 608 p. – ISBN 978-1-80324-897-4.

СПОСОБЫ ДОСТАВКИ КОРПОРАТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Клезович О.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Прохорчик Р.В. – старший преподаватель

Трудно недооценить степень внедрения цифровых технологий в образ жизни людей: оплата проезда в общественном транспорте, получение скидки и оплата покупок в супермаркете, бронирование зарядных станций для электромобилей. Пример можно найти практически в любой сфере человеческой деятельности. Электронные сервисы упрощают повседневные задачи, повышают доступность услуг и создают новые пути взаимодействия между человеком и бизнесом, становясь не просто технологическим трендом, а фактором развития общества и государства.

Одной из проблем, которая ставит компании перед выбором технологий разработки собственных программных продуктов, является выбор способа доставки контента конечному потребителю – пользователю – для чего, в первую очередь, нужно определить доли рынка операционных систем.

Рассмотрим доли рынка операционных систем персональных компьютеров и мобильных устройств по Республике Беларусь в период с февраля 2022 по февраль 2026 [1]. Согласно статистике, общая доля устройств на базе Android и iOS составляет около 50,76 %, что может косвенно говорить о растущем тренде на использование веб-трафика посредством мобильных устройств.

Следовательно, целесообразным может являться не только создание сайтов, но и мобильных приложений, для которых традиционно выделяют два направления: нативная разработка (создание приложения под конкретную операционную систему с использованием «родных» языков) и кроссплатформенная разработка (создание приложения для нескольких операционных систем из единой кодовой базы). Каждый из перечисленных подходов обладает своими преимуществами и недостатками, связанными со стоимостью разработки, удобством использования и сопровождения.

Компании, обладающие достаточными ресурсами, чаще прибегают к разработке нативных мобильных приложений, а в качестве агентов доставки конечному потребителю используют верифицированные магазины приложений, в числе которых:

– AppStore для устройств на базе iOS;

– Google Play, Huawei AppGallery, RuStore для устройств на базе Android.

В случае распространения программных средств посредством магазинов приложений, компания собственноручно попадает в зависимость от их владельцев, что выражается в следующем:

– перед публикацией мобильного приложения необходимо пройти обязательную модерацию на предмет соответствия правилам магазина;

– каждое обновление мобильного приложения сопровождается автоматизированной или ручной модерацией на предмет соответствия правилам магазина;

– мобильное приложение и сама учетная запись разработчика могут быть удалены при обнаружении нарушений правил магазина.

В недавнее время компании, в отношении которых были применены экспортные ограничения, обнаружили, что некоторые из верифицированных магазинов приложений удалили как сами мобильные приложения, так и учетные записи, через которые эти приложения распространялись, что привело к панике как среди пользователей, так и среди разработчиков.

Результатом острой необходимости поиска альтернативных подходов к размещению ранее удаленных программных средств стал в том числе метод маскирования [2], нарушающий правила магазинов приложений, однако и его можно избежать, прибегнув к ориентации на разработку прогрессивных веб-приложений (от англ. – Progressive Web Applications, PWA) – технологии разработки веб-приложений, которая функционально и визуально трансформирует сайт в приложение (так называемое «мобильное приложение в браузере») – представляющих собой промежуточное решение между веб-приложением и нативным приложением, сохраняющим возможность получения push-уведомлений, работы в оффлайн-режиме, установки ярлыка на рабочий стол, и доступного для мобильных устройств и персональных компьютеров [3].

Список использованных источников:

1. Desktop, Mobile & Tablet Operating System Market Share Belarus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gs.statcounter.com/os-market-share/desktop-mobile-tablet/belarus/#monthly-202302-202602-bar. – Дата доступа: 24.03.2026.

2. Кейс «Учёт надоя»: креативное обновление мобильного приложения РСХБ «Свои финансы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/rshb/articles/971984/. – Дата доступа: 24.03.2026.

3. What are Progressive Web Apps? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://web.dev/articles/what-are-pwas. – Дата доступа: 24.03.2026.

АРХИТЕКТУРНЫЕ ПОДХОДЫ К ОБРАБОТКЕ АСИНХРОННЫХ ОПЕРАЦИЙ В СРЕДАХ ВЫПОЛНЕНИЯ NODE.JS И BUN

Короткая М.Д., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Мелких Е.Г. – старший преподаватель

В работе рассматриваются архитектурные особенности обработки асинхронных операций в средах выполнения Node.js и Bun. Выполнен сравнительный анализ моделей событийного цикла, механизмов работы с промисами и низкоуровневых оптимизаций. Показаны различия в реализации системного ввода-вывода, планирования задач и управления памятью. Полученные результаты позволяют выявить преимущества Bun в контексте производительности и Node.js – в зрелости экосистемы и стабильности.

Современные серверные среды выполнения JavaScript широко используют асинхронные модели для обеспечения высокой производительности и масштабируемости. Ключевыми представителями являются Node.js и Bun, каждая из которых характеризуется собственными архитектурными подходами к обработке асинхронных операций.

Node.js базируется на движке V8 и библиотеке libuv, обеспечивающей кроссплатформенную реализацию неблокирующего ввода-вывода. Центральным элементом архитектуры является событийный цикл, который последовательно обрабатывает очереди задач и функций обратного вызова, разделенных на фазы (таймеры, обработка ввода-вывода, ожидание событий, завершающие операции и др.). Такая модель обеспечивает высокую масштабируемость, однако наличие промежуточного слоя в виде libuv приводит к дополнительным накладным расходам при выполнении системных операций [1].

Более детальное рассмотрение внутреннего устройства Node.js показывает, что ключевую роль в обеспечении асинхронности играет библиотека libuv, реализующая неблокирующий ввод-вывод и управление пулом потоков. Несмотря на однопоточную модель выполнения JavaScript-кода, Node.js использует пул рабочих потоков для выполнения потенциально блокирующих операций, таких как доступ к файловой системе, криптографические вычисления и сетевые запросы. Это позволяет избежать блокировки основного потока выполнения.

Существенной особенностью архитектуры является разделение задач на макрозадачи и микрозадачи. Макрозадачи (например, обработка событий ввода-вывода) выполняются в рамках фаз событийного цикла, тогда как микрозадачи (например, обработка обещаний) выполняются с более высоким приоритетом между итерациями цикла. Однако такая модель требует дополнительных проверок очереди микрозадач после каждой фазы, что может приводить к увеличению накладных расходов при большом количестве коротких асинхронных операций.

Кроме того, взаимодействие между движком V8 и библиотекой libuv осуществляется через слой привязок на языке C++, что добавляет дополнительный уровень абстракции. При интенсивной нагрузке это может приводить к увеличению времени выполнения операций за счет дополнительных переходов между уровнями системы.

Схема архитектуры Node.js представлена на рисунке 1.

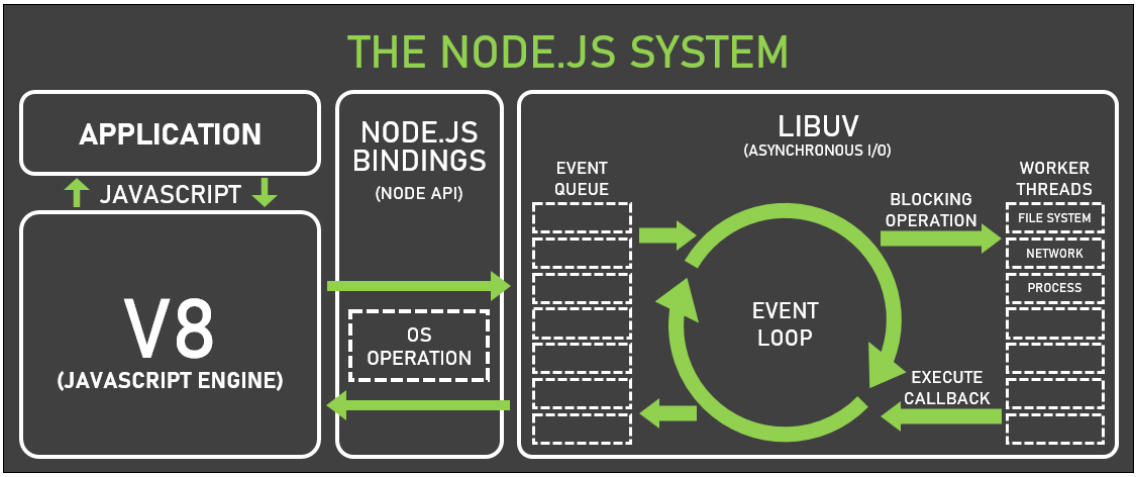


Рисунок 1 – Архитектура Node.js

В отличие от Node.js, среда Bun ориентирована на минимизацию накладных расходов и повышение производительности. Она построена на базе движка JavaScriptCore и реализует

значительную часть функциональности на уровне среды выполнения, включая обработку HTTP-запросов и работу с файловой системой. Это позволяет сократить количество переходов между уровнями абстракции и уменьшить задержки при выполнении операций.

Дополнительным фактором высокой производительности Bun является использование движка JavaScriptCore, который отличается иной архитектурой оптимизации выполнения кода и управления памятью по сравнению с V8. В частности, применяются более агрессивные методы оптимизации часто выполняемых участков кода, что позволяет сократить время выполнения повторяющихся операций.

Важной особенностью Bun является встроенная реализация ряда стандартных механизмов, которые в Node.js предоставляются внешними модулями. Например, средства работы с HTTP и файловой системой интегрированы непосредственно в среду выполнения. Это позволяет избежать дополнительных затрат на загрузку модулей и взаимодействие между уровнями абстракции.

Также Bun использует оптимизированные механизмы работы с сетевыми соединениями, позволяющие эффективнее обрабатывать большое количество одновременных запросов. За счет сокращения количества промежуточных структур данных и более эффективного управления буферами снижается нагрузка на систему памяти и уменьшаются задержки при передаче данных.

Дополнительной особенностью является оптимизация запуска приложений. В отличие от Node.js, где запуск может сопровождаться загрузкой значительного числа зависимостей, Bun использует более быстрые механизмы инициализации модулей и кэширования, что сокращает время старта.

Сравнительный анализ сред выполнения Node.js и Bun выявил принципиальные различия, обусловленные особенностями их архитектурной реализации. Среда Node.js отличается высокой степенью совместимости и стабильности, что связано с её зрелой экосистемой, широким распространением и наличием большого количества проверенных библиотек.

В то же время более высокая производительность Bun обусловлена рядом архитектурных оптимизаций на уровне среды выполнения. В отличие от Node.js, где значительная часть асинхронных операций проходит через слой libuv, Bun реализует многие механизмы напрямую с использованием системных программных интерфейсов. Например, обработка HTTP-запросов в Bun встроена в среду выполнения и не требует использования внешних модулей, что уменьшает количество промежуточных вызовов и снижает накладные расходы. Аналогично, операции чтения файлов выполняются с меньшим количеством уровней абстракции, что сокращает время выполнения системных вызовов.

Дополнительным фактором является уменьшение числа переключений контекста между JavaScript-движком и нативным уровнем. В Node.js выполнение асинхронной операции включает последовательность переходов: JavaScript, V8, C++ bindings, libuv, ОС и обратно. В Bun эта цепочка короче за счет более тесной интеграции с JavaScriptCore, что снижает задержки при интенсивных операциях ввода-вывода.

Оптимизация обработки асинхронных задач в Bun также достигается за счет эффективного управления очередями макрозадач и микрозадач. В Node.js после каждой фазы событийного цикла выполняется проверка очереди микрозадач, тогда как в Bun используется стратегия пакетной обработки, позволяющая выполнять несколько микрозадач подряд без возврата в основной цикл. Это снижает задержки при выполнении длинных цепочек асинхронных операций.

Повышенная эффективность обработки обещаний в Bun связана с особенностями реализации микрозадач в JavaScriptCore. Используется более легковесная модель управления, при которой операции создания и завершения обещаний требуют меньшего количества внутренних выделений памяти.

Дополнительно следует отметить различия в подходах к масштабированию приложений. В Node.js горизонтальное масштабирование, как правило, достигается за счёт использования кластеризации и запуска нескольких экземпляров процесса, что требует дополнительной настройки и управления взаимодействием между ними. В Bun данный аспект упрощается за счёт более высокой производительности одного процесса, что позволяет обрабатывать большее количество запросов без необходимости масштабирования на уровне приложения.

Наконец, важную роль играет управление памятью. В сценариях с большим количеством короткоживущих промисов Node.js создает значительное давление на сборщика мусора V8. Bun, благодаря особенностям JavaScriptCore, использует более эффективные механизмы аллокации и повторного использования объектов, что уменьшает частоту срабатывания сборщика мусора и повышает пропускную способность системы. Таким образом, выбор среды выполнения определяется требованиями к системе. Node.js является более универсальным и стабильным решением благодаря зрелой экосистеме, тогда как Bun представляет собой перспективную платформу для высоконагруженных приложений, где критична производительность обработки асинхронных операций.

Список использованных источников:

1. Libuv Documentation : [сайт]. – 2025. – URL: https://docs.libuv.org/en/v1.x/ (дата обращения: 25.03.2026).
2. Bun Runtime Documentation : [сайт]. – 2025. – URL: https://bun.sh/ (дата обращения: 25.03.2026).

ПРИМЕНЕНИЕ ПАТТЕРНОВ «ЧИСТОЙ» АРХИТЕКТУРЫ И РЕАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯМИ В РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ АГРЕГАТОРОВ ДАННЫХ

Крутько А.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Хмелева А.В. – канд. техн. наук, доцент

В работе рассматриваются архитектурные решения для проектирования отказоустойчивых веб-приложений агрегации высокочастотных данных. На примере статистики Dota 2 исследуется эффективность «чистой» архитектуры в интеграции с паттерном CQRS. Проведен анализ механизмов управления состояниями в клиентских приложениях и алгоритмов сетевой отказоустойчивости.

Эпоха повсеместной цифровизации характеризуется беспрецедентным ростом объемов машинных данных. Одной из наиболее показательных областей, генерирующих колоссальные массивы высокочастотной телеметрии, выступает индустрия соревновательных видеоигр. В рамках стандартной игровой сессии в современных киберспортивных дисциплинах (на примере Dota 2) серверы фиксируют сотни тысяч дискретных событий: векторы перемещения сущностей, применение способностей, математические расчеты распределения урона и изменения баланса игры.

Рост объемов машинных данных характерен для индустрии соревновательных видеоигр. В рамках сессии в Dota 2 серверы фиксируют сотни тысяч событий: векторы перемещения, применение способностей, расчет урона. Необработанные логи в формате JSON недоступны для когнитивного анализа. Возникает потребность в агрегаторах, трансформирующих данные в визуальные метрики: тепловые карты, графики преимущества и матрицы сражений [1].

Целью данной работы является исследование архитектурных концепций проектирования подобных клиент-серверных веб-приложений для обработки подобной телеметрии.

Фундаментом для реализации серверной части агрегатора служит высокопроизводительный кроссплатформенный фреймворк ASP.NET Core. Для обеспечения модульности и масштабируемости кодовой базы применяется парадигма «чистой» архитектуры [2]. Это гарантирует, что центральная бизнес-логика обработки телеметрии полностью изолирована от внешних библиотек интеграции баз данных и сторонних поставщиков информации. Схематическое представление данной архитектуры приведено на рисунке 1.

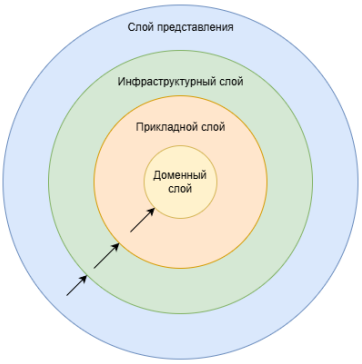


Рисунок 1 – Схема слоев «чистой» архитектуры

Недавние эмпирические исследования подтверждают, что рефакторинг сложных серверных систем с применением «чистой» архитектуры приводит к улучшению индекса сопровождаемости и снижению метрик Холстеда на 21–61% за счет радикального уменьшения цикломатической сложности ядра системы [3].

Для оптимизации процессов обработки потоков информации на прикладном уровне внедряется паттерн разделения ответственности за команды и запросы (CQRS). Его использование позволяет разделить логику чтения агрегированных метрик и логику изменения состояния системы на независимые потоки. В качестве инструмента маршрутизации применяется поведенческий паттерн «Посредник».

Согласно исследованиям производительности архитектурных паттернов, внедрение CQRS в системах с преобладанием операций чтения обеспечивает улучшение производительности запросов до 167% [4]. Для телеметрических агрегаторов характерно соотношение операций чтения к записи примерно 20:1, что делает данный паттерн оптимальным выбором.

Использование механизма конвейерной обработки позволяет элегантно централизовать сквозной функционал: каждый входящий HTTP-запрос до попадания в слой бизнес-логики автоматически проходит этапы строгой валидации структуры и проверку наличия актуального ответа в системе распределенного кэширования. Подобная архитектурная декомпозиция значительно снижает вычислительную нагрузку на доменное ядро.

Поскольку функциональность агрегатора напрямую зависит от непрерывного соединения со сторонними интерфейсами, критической задачей становится обеспечение сетевой отказоустойчивости. Для решения данной проблемы реализуется паттерн «предохранитель» в комбинации с алгоритмом экспоненциальной задержки повторных попыток [5].

Оценить математическую эффективность внедрения данных паттернов при проектировании масштабируемых агрегаторов можно через интегральную вероятность успешного обслуживания входящего запроса. В условиях высоких асинхронных нагрузок надежность отклика сервера $P_{success}$ описывается следующим вероятностным выражением:

$$P_{success} = H_{cache} + (1 - H_{cache}) \cdot P_{api} \cdot (1 - P_{cb}), \quad (1)$$

где $P_{success}$ – итоговая вероятность безотказного формирования ответа клиенту; H_{cache} – коэффициент попадания метрик в слой распределенного кэширования; P_{api} – математическое ожидание штатной работы удаленного интерфейса поставщика данных; P_{cb} – вероятность разомкнутого (блокирующего сеть) состояния предохранителя при перегрузках.

Выражение (1) теоретически доказывает, что максимизация коэффициента H_{cache} посредством алгоритмов кэширования ресурсоемких метрик практически полностью нивелирует зависимость стабильности всей системы от нестабильности внешних факторов P_{api} . При достижении коэффициента попадания выше 80% общая надёжность системы превышает 99,5% даже при нестабильности внешних интерфейсов на уровне 10–15%.

Архитектура клиентской части базируется на создании одностраничного веб-приложения. Для решения фундаментальной проблемы современных сложных интерфейсов – чрезмерной связанности и сложности управления асинхронными потоками данных – применяется строгое разделение состояний, что отражается в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ подходов к управлению состояниями в одностраничном приложении

Параметр сравнения	Монолитное (Redux/Flux)	Раздельное (Zustand + TanStack)
Изоляция данных	Серверные и клиентские данные смешаны	Строгое семантическое разделение
Объем шаблонного кода	Высокий (Actions, Reducers)	Минимальный (атомарные функции)
Жизненный цикл вызовов	Ручное кэширование	Автоматическая фоновая ревалидация
Перерисовка интерфейса	Риск избыточной отрисовки	Точечная реактивность компонентов
Использование памяти	Стандартное	Оптимизированное кэшированием

Как видно из таблицы 1, отказ от тяжеловесных решений архитектуры Flux в пользу делегирования управления серверным состоянием специализированной библиотеке TanStack Query обеспечивает автоматическую дедупликацию идентичных параллельных запросов и кэширование ответов на стороне браузера. Для управления исключительно локальным интерфейсным состоянием применяется легковесный однонаправленный менеджер Zustand.

Комплексное использование «чистой» архитектуры, CQRS, механизмов отказоустойчивости и реактивного управления состояниями позволяет проектировать высокопроизводительные аналитические системы. Решения гарантируют мгновенный отклик интерфейса при визуализации сотен тысяч метрик и масштабируемость вне зависимости от нестабильности внешних узлов.

Список использованных источников:

1. Wallner, G. Visualization-based analysis of gameplay data – A review of literature / G. Wallner, S. Kriglstein // Entertainment Computing. – 2013. – Vol. 4, № 3. – P. 143-155.

2. Clean Architecture with.NET and.NET Core / ASP.NET Core: Overview, Introduction, Getting Started [Электронный ресурс] / Medium. – Режим доступа: https://medium.com/dotnet-hub/clean-architecture-with-dotnet-and-dotnet-core-aspnetcore-overview-introduction-getting-started-ec922e53bb97. – Дата доступа: 12.03.2026

3. Nugroho, A., Kusumo, H. Clean Architecture Implementation Impacts on Maintainability [Электронный ресурс] // IEEE Xplore. – 2022. – Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/9914890/. – Дата доступа: 12.03.2026.

4. Performance Analysis of CQRS Pattern in High-Throughput Data Systems [Электронный ресурс] // International Journal of Scientific and Advanced Technology. – 2025. – № 1. – Режим доступа: https://www.ijsat.org/papers/2025/1/2273.pdf. – Дата доступа: 12.03.2026.

5. Jovanovic, M. Building Resilient Cloud Applications With.NET [Электронный ресурс] / Milan Jovanovic. – 2024. – Режим доступа: https://www.milanjovanovic.tech/blog/building-resilient-cloud-applications-with-dotnet. – Дата доступа: 12.03.2026.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ

Кулик М.И., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ярмолик В.Н. – д-р техн. наук, профессор

Показана актуальность контроля параметров микроклимата в помещениях. Проанализированы существующие системы мониторинга, выявлены их недостатки. Разработано устройство для измерения параметров микроклимата. Создано мобильное приложение для удаленного взаимодействия с устройством.

В современном мире значительная часть жизнедеятельности человека проходит в закрытых помещениях, таких как жилые дома, офисные пространства, учебные аудитории и производственные объекты. В этих условиях параметры микроклимата становятся одним из ключевых факторов, определяющих уровень комфорта, работоспособности и общего состояния здоровья человека. Отклонение таких параметров, как температура воздуха, относительная влажность и концентрация углекислого газа, от нормативных значений может оказывать негативное воздействие на физиологические и когнитивные функции организма [1]. При этом без специальных средств такие отклонения не всегда своевременно обнаруживаются, в связи с чем их мониторинг, совместно с системой предупреждения о превышении безопасных порогов, является важной задачей.

Существующие системы мониторинга микроклимата либо имеют высокую стоимость и требуют большого количества дополнительных вложений, либо являются узкоспециализированными устройствами. С учетом повышения доступности систем на кристалле и их возможностей становится возможной разработка недорогого устройства для мониторинга окружающей среды.

Структурная схема устройства представлена на рисунке 1. В качестве основы устройства используется микроконтроллер ESP32 [2]. В ходе работы устройство с заданной периодичностью выполняет считывание значений температуры, влажности и концентрации углекислого газа, отображает их на экране и сохраняет на SD-карту. При превышении заданных порогов концентрации углекислого газа устройство автоматически включает звуковую индикацию, информируя пользователя. Одновременно с этим может быть включен внешний выход, который позволяет управлять подключёнными исполнительными устройствами, такими как система вентиляции или увлажнитель воздуха, через реле. Для взаимодействия пользователя с устройством были добавлены две кнопки. Короткое нажатие первой кнопки переключает единицы отображения температуры (градусы Цельсия или Фаренгейта); короткое нажатие второй – циклически изменяет яркость подсветки дисплея с сохранением выбранного уровня во Flash-памяти. Длительное нажатие первой кнопки включает или отключает звуковую сигнализацию; длительное нажатие второй переводит устройство в режим ручной установки текущего времени, в котором пользователь поочерёдно редактирует часы и минуты.

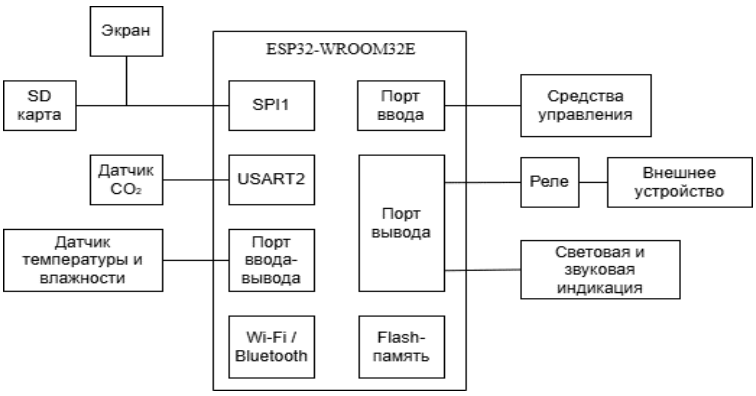


Рисунок 1 – Структурная схема устройства

В качестве датчика углекислого газа используется модуль MH-Z19C (недисперсионный инфракрасный анализатор). Измеренная концентрация выдаётся в виде цифрового значения по последовательному интерфейсу UART. Отличительной особенностью этого датчика является требование к входному напряжению – 5 В с максимальным отклонением 0.1 В, а также необходимость калибровки нулевого уровня [3]. Для температуры и относительной влажности применяется цифровой совмещённый датчик DHT22 (AM2302). После инициирующего сигнала с линии данных он передаёт кадр из 40 бит, содержащий влажность, температуру и контрольную сумму. Связь с микроконтроллером

реализована по однопроводной шине с временным кодированием логических уровней, что накладывает требования к точности обработки устройством полученных импульсов.

Для удобства использования было разработано мобильное приложение. Передача данных между физическим устройством и мобильным приложением осуществляется по беспроводному каналу связи с использованием встроенного модуля Wi-Fi микроконтроллера. После первого включения устройства на экране отображается информация для подключения к его точке доступа: название сети, пароль, адрес локальной страницы конфигурации. Пользователю необходимо подключиться к сети и в открытой странице конфигурации ввести данные целевой Wi-Fi сети для подключения. После этого устройство подключается к указанной сети и запоминает ее в качестве основной во Flash-памяти. Для установки соединения с устройством пользователю необходимо вручную указать сетевой адрес устройства в приложении. Он сохраняется в памяти приложения и используется для автоматического подключения при последующих запусках. В приложении пользователю доступен просмотр статистики изменения выбранных показателей за указанный период, конфигурация устройства (включая настройку порогов срабатывания индикации, частоты измерений и параметров внешнего выхода). Переданные настройки после обработки микроконтроллером сохраняются во Flash-памяти. Пример визуализации статистики изменения измеряемых параметров в мобильном приложении представлен на рисунке 2. Сразу после начала работы устройства была проведена калибровка на свежем воздухе, чем объясняются высокая влажность, низкая температура и уровень углекислого газа около 400 ppm.

Рисунок 2 – Внешний вид раздела статистики приложения

Таким образом, разработанное программно-аппаратное средство обеспечивает непрерывный мониторинг параметров микроклимата, позволяет своевременно выявлять отклонения показателей от нормативных значений и тем самым способствует повышению комфорта и безопасности пребывания людей в помещениях при относительно невысокой стоимости аппаратной и программной реализации. Устройство применимо в жилых, офисных и производственных зонах.

Список использованных источников:

1. Indoor Environment: Health Aspects of Air Quality, Thermal Environment, Light and Noise / World Health Organization, United Nations Environment Programme. – Geneva : WHO/UNEP, 1990. – 128 p.

2. ESP32 Modules and Boards [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.2.5/esp32/hw-reference/modules-and-boards.html – Дата доступа: 18.03.2026.

3. Winsen. MH-Z19C Infrared Gas Sensor (CO_2) Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19c-pins-type-co2-manual-ver1_0.pdf – Дата доступа: 20.03.2026.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ПРОВЕДЕНИЯ И ЖЕРЕБЬЕВКИ СПОРТИВНЫХ ТУРНИРОВ

Лапусь В.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Петюкевич Н.С. – старший преподаватель

В работе рассматривается разработка кроссплатформенного программного средства для автоматизации проведения и жеребьёвки спортивных турниров. Предложен подход к поддержке нескольких систем проведения соревнований с возможностью работы в онлайн и офлайн режиме. Реализованы алгоритмы расчёта дополнительных коэффициентов для определения итоговых мест участников. Проведён сравнительный анализ существующих программных аналогов.

Современные спортивные турниры – шахматные, шашечные, теннисные, футбольные – требуют оперативной обработки значительных объёмов данных: регистрации участников, формирования расписания матчей, фиксации результатов и расчёта рейтинговых показателей. Традиционные методы, основанные на ручной обработке информации или использовании разрозненных инструментов, характеризуются высокой трудоёмкостью и вероятностью возникновения ошибок [1].

Анализ существующих программных решений – ChessManager, Swiss-Manager и Brakto – выявил ряд общих ограничений. Ни одно из рассмотренных решений не сочетает одновременно универсальность (поддержку разных видов спорта), гибкость настройки собственных дополнительных показателей, кроссплатформенность и возможность автономной работы без подключения к сети Интернет. Помимо этого, все рассматриваемые системы предоставляют расширенный функционал лишь в платных версиях.

Разрабатываемое программное средство будет лишено выявленных недостатков. Архитектура системы предусматривает разделение на серверную и настольную части, реализованные на языке Java с использованием JavaFX и системы управления базами данных PostgreSQL. Настольная часть способна функционировать в автономном режиме без подключения к сети с последующей синхронизацией данных с сервером.

Система поддерживает несколько форматов проведения соревнований: круговую систему, олимпийскую (с выбыванием), швейцарскую и смешанную. Ключевой особенностью является реализованный механизм расчёта дополнительных коэффициентов – Бухгольца, Бергера, прогрессивного счёта, результатов личных встреч и коя-системы, – применяемых для определения мест при равенстве основных показателей [2]. В соответствии с регламентами спортивных федераций показатели применяются последовательно в порядке убывания приоритета [3].

Коэффициент Бухгольца вычисляется как сумма очков всех соперников участника и отражает сложность пройденного турнирного пути. Коэффициент Бергера учитывает не только силу соперников, но и качество побед: суммируются очки побеждённых соперников и половина очков соперников, с которыми сыграна ничья. Прогрессивный счёт даёт преимущество участникам, стабильно выступавшим с начала турнира [4].

Принципиальным отличием от аналогов является возможность создания пользовательских коэффициентов: организатор может задать собственное правило подсчёта показателя и установить его приоритет в цепочке тай-брейка. Это обеспечивает адаптацию системы к нестандартным регламентам соревнований без изменения исходного кода.

Взаимодействие клиентских приложений с серверной частью реализовано посредством REST API, обеспечивающего стандартизированный обмен данными. Реляционная модель данных PostgreSQL гарантирует целостность и согласованность информации при одновременной работе нескольких пользователей. Предусмотрен экспорт турнирных данных в форматы CSV и PGN.

Разработанное программное средство обеспечивает автоматизацию ключевых процессов проведения соревнований, повышает точность расчётов и упрощает работу организаторов. Система может применяться для проведения турниров различного уровня по широкому спектру видов спорта в условиях как стабильного, так и нестабильного интернет-соединения.

Список использованных источников:

1. Организация и проведение спортивных соревнований : учебное пособие / А.Г. Горшков, М.В. Еремин, А.Л. Волобуев [и др.] – Москва : КНОРУС, 2024. – 304 с. – (Бакалавриат).

2. Sziklai, Balázs & Biró, Péter & Csato, Laszlo. (2022). The efficacy of tournament designs. Computers & Operations Research. 144. 105821. 10.1016/j.cor.2022.105821.

3. FIDE Handbook. C. General Rules and Technical Recommendations for Tournaments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://handbook.fide.com.

4. Csato, Laszlo. (2012). Ranking by pairwise comparisons for Swiss-system tournaments. Central European Journal of Operations Research. 21. 10.1007/s10100-012-0261-8.

API ДЛЯ РАБОТЫ С ПОДКАСТАМИ

Лысяков И.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куликов С.С. – канд. техн. наук, доцент

В современную эпоху развития цифровых технологий появились различные способы получения информации. Пользователи всё чаще выбирают цифровые платформы для потребления образовательного, развлекательного и новостного контента. Одним из активно развивающихся форматов являются подкасты, позволяющие получать различную информацию в удобной аудиоформе и сочетать её с повседневной деятельностью. Сам рынок подкастинга демонстрирует устойчивый рост [1]. Потому была поставлена цель создать веб-приложение для работы с подкастами, где можно будет настраивать всё под себя, удобно управлять контентом и использовать новые технологии.

Основной задачей приложения является создание качественного сервиса, охватывающего как можно большее количество пользователей, от рядовых слушателей до меломанов и людей с ограничениями слуха. Основной функционал, обеспечивающий успех приложения, представляет следующее:

1) поиск и открытие новых шоу;

2) поиск по названиям; возможность подписки на обновления (автоматическая загрузка новых эпизодов);

3) управление скоростью воспроизведения и таймер сна;

4) создание плейлистов и очереди воспроизведения;

5) синхронизация прогресса прослушивания между устройствами.

Однако в условиях высокой конкуренции и наличия достаточно большого количества готовых решений, этот функционал является необходимым минимумом для вхождения на рынок. Для того, чтобы приложение выделялось на фоне конкурентов и предоставляло уникальный опыт взаимодействия с ним, нужно разработать новые и уникальные решения.

В связи с вышеописанным, было принято решение, что приложение должно:

1) проводить транскрибацию эпизодов (перевод из аудио в текстовый формат);

2) формировать краткий пересказ сути эпизодов;

3) перевод содержимого эпизодов на иностранные языки.

Все три пункта подразумевают собой использование современных технологий – искусственного интеллекта. Этот подход полностью соответствует глобальным трендам развития аудиоформатов, где искусственный интеллект и мультиязычность становятся ключевыми драйверами [2].

Транскрибация осуществляется следующим образом: исходный аудиофрагмент разбивается на короткие сегменты продолжительностью 5–10 секунд с перекрытием. Каждый сегмент подвергается обработке моделью распознавания речи. На следующем этапе проводится постобработка, включающая удаление слов-паразитов, корректировку терминологии с использованием специализированного словаря и сегментацию текста на предложения по паузам. В случае участия нескольких спикеров применяется диаризация, которая позволяет отделять голоса по кластерам. В результате получается структурированный текст с таймкодами и отметками о говорящих.

Формирование краткого пересказа происходит путем исключения из транскрибированного текста стандартных служебных фрагментов, таких как приветствия и рекламные вставки. Оставшийся материал делится на смысловые блоки, после чего модель экстрактивной суммаризации оценивает предложения на основе частоты ключевых слов, их позиции и семантической релевантности к описанию выпуска. Отобранные предложения передаются генеративной модели, которая создаёт связный реферат с логическими переходами. Перевод на иностранные языки реализуется через разбиение транскрибированного текста на предложения с сохранением таймкодирования. Имена, названия и сленговые выражения помещаются в особый словарь исключений. Основной текст переводится с помощью нейросетевой модели, после чего выполняется постредактирование: унификация терминов, адаптация идиоматических выражений и перестановка фраз в соответствии с синтаксисом целевого языка. Итоговый перевод выводится синхронно с аудио в формате субтитров и доступен для экспорта.Таким образом, разрабатываемое веб-приложение для работы с подкастами объединяет базовый функционал с тремя инновационными AI-решениями. Это позволяет не только удовлетворить потребности широкой аудитории слушателей, но и обеспечить доступность для людей с нарушениями слуха, а также предложить уникальный опыт взаимодействия, выделяющий сервис среди аналогичных продуктов на рынке.

Список использованных источников:

1. Fortune Business Insights. Podcasting Market Size, Share & Industry Analysis, 2026-2034. – URL: https://www.fortunebusinessinsights.com/podcasting-market-107055

2. Шумилова К. Тренды подкастов: что ждет аудиоформаты в ближайший год // РБК Тренды. – 2025. – 30 сент. – URL: https://trends.rbc.ru/trends/social/6842b1ac9a79478e09233558

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Марковский И.М., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Кулага В.В. – канд. техн. наук, доцент

В работе рассматриваются актуальные проблемы обнаружения и сопровождения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с использованием распределенных сетей акустических пеленгаторов. Проанализированы физические ограничения акустического метода локации и предложены алгоритмы фильтрации шумовых выбросов на основе консенсусной выборки. Описана архитектура специализированного программного средства, реализующего автоматизированное построение траекторий целей. Обоснована эффективность применения предложенных программных решений для повышения достоверности мониторинга и защиты объектов критической инфраструктуры.

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) самолётного типа с двигателем внутреннего сгорания стали одним из ключевых средств поражения объектов критической инфраструктуры в современных вооружённых конфликтах. Доступность компонентной базы привела к кратному снижению их стоимости и сделала возможным массовое применение, тогда как существующие средства обнаружения создавались под иные классы воздушных целей. Радиолокационные станции уверенно обнаруживают крупные воздушные суда, однако эффективная площадь рассеяния малоразмерного БЛА составляет лишь 0,01–0,1 м² – на пределе возможностей большинства применяемых сегодня РЛС, – а плотное развёртывание высокоточных станций вблизи каждого охраняемого объекта экономически нецелесообразно [1]. Радиотехническая разведка эффективна против аппаратов, непрерывно поддерживающих связь с оператором, но полностью бессильна, когда БЛА летит в автономном режиме по заранее заложенному маршруту [2]. Оптико-электронные системы зависят от погодных условий и не способны эффективно перекрывать воздушное пространство без предварительного целеуказания [3]. На этом фоне акустический метод обнаружения приобретает принципиальные преимущества: он пассивен, не демаскирует наблюдателя, а акустическая сигнатура двигателя внутреннего сгорания неотделима от самого факта полёта и не может быть скрыта переходом в режим радиомолчания [4].

Вместе с тем акустический метод имеет физическое ограничение: дальность уверенного обнаружения БЛА с двигателем внутреннего сгорания не превышает 2–4 км, что делает невозможным контроль протяжённого периметра с помощью одного датчика и диктует необходимость развёртывания пространственно-распределённой сети пеленгаторов [5]. Однако каждый из них фиксирует лишь направление на источник звука, и для получения координат цели необходимо пересечение пеленгов от нескольких узлов одновременно – задача, которая при непрерывном потоке данных в реальном времени не может быть решена вручную и требует автоматизации. В работе с акустической пеленгацией возникает следующая сложность: скорость звука в атмосфере составляет около 343 м/с, тогда как ударный БЛА движется со скоростью 150–200 км/ч, поэтому разнесённые датчики слышат одну и ту же точку траектории в разные моменты времени – и классическая триангуляция синхронных пеленгов неизбежно даёт пространственную ошибку [6].

Анализ кинематики ударных БЛА показывает, что на маршевых участках между поворотными точками маршрута аппарат движется прямолинейно с постоянной скоростью – бортовой автопилот на основе ПИД-регуляторов непрерывно корректирует курс, сводя отклонение от заданного вектора к нулю [7]. Это делает линейную аппроксимацию естественным инструментом для обработки массива сырых точек пересечения пеленгов, однако применять метод наименьших квадратов напрямую нельзя – первичные отметки неизбежно содержат выбросы, к которым он крайне чувствителен. Поэтому сначала, используя алгоритм консенсусной выборки, итеративно отсеиваются аномальные точки, оставляя лишь те, что укладываются на одну прямую в пределах допустимой погрешности. Только после этого, к очищенному массиву применяется МНК для получения уравнения траектории и расчёта курса и скорости объекта [8, 9].

Дополнительную сложность создаёт схожесть акустических сигнатур двигателей внутреннего сгорания БЛА со спектрами наземного моторного транспорта – в результате система может формировать достоверные прямолинейные треки от мотоциклов, грузовиков или моторных лодок. Для решения этой проблемы сформированная траектория должна сопоставляться с полигонами автомобильных дорог и водных артерий. Если траектория объекта совпадает с существующей дорожной сетью или руслом реки, цель классифицируется как ложная, что позволяет повысить достоверность обнаружения воздушных угроз без привлечения дорогостоящих видеодатчиков или радиолокаторов.

Для реализации обозначенных методов и алгоритмов было разработано программное средство, представляющее собой распределённый комплекс, функционирующий по клиент-серверной модели.

Серверная часть, разработанная на языке Rust, выступает ядром вычислительной системы, реализующим строгую ролевую модель доступа. Доступ пользователей к функциям управления и мониторинга разграничен ролями «Командир» и «Оператор» с использованием JWT-токенов, в то время как устройства обнаружения звука (УОЗ) проходят процедуру авторизации в сети по уникальным идентификаторам при инициировании WebSocket-соединения, обеспечивая изоляцию данных и защиту от несанкционированного подключения стороннего оборудования к распределенной сети мониторинга.

Центральный сервер осуществляет агрегацию данных и управление полным жизненным циклом формируемых траекторий, который включает этапы первичной фиксации акустических событий, ассоциацию новых точек обнаружения с существующими целями и расчет прогнозных координат. В процессе сопровождения система динамически управляет состояниями объектов: от «активного отслеживания» до «аппроксимации» при входе цели в «мертвые зоны» или временной потере сигнала.

Функциональная структура разработанного программного средства включает следующие логические модули. Модуль «Планирование» предназначен для конфигурации объектов охраны, средств поражения и расстановки акустических пеленгаторов на карте местности с учетом их технических характеристик и углов обзора. Модуль «Работа» обеспечивает интерактивный мониторинг воздушной обстановки, выполняя в реальном времени кластеризацию датчиков на основе графа смежности и визуализацию треков. Для анализа зафиксированных событий и ведения журналов инцидентов предназначен модуль «Контроль», реализующий сегментированный доступ к данным (по сменам для операторов и полную историю для командиров) с поддержкой экспорта отчетов в формат CSV. Важной частью системы является модуль «Конфигурация», который предоставляет командиру прямой доступ к параметрам математического ядра. В данном режиме осуществляется ручная настройка коэффициентов фильтрации, допусков частотного расхождения пеленгов, минимального количества точек для начала аппроксимации и порогов классификации ложных целей по ГИС-данным. Такая возможность параметризации позволяет адаптировать систему под специфику конкретного рельефа и застройки, исключая эффект «черного ящика».

Клиентская часть программного комплекса реализована в виде одностраничного веб-приложения (SPA) на базе фреймворка Angular. Визуализация данных осуществляется на интерактивной цифровой карте местности (ЦКМ), отрисовка которой выполняется с использованием TileServer GL. Оператор в режиме реального времени получает уведомления об обнаруженных угрозах, видит направление движения целей и их удаленность от защищаемых объектов.

Автоматизация процессов акустического мониторинга в рамках разработанного комплекса позволяет создать эффективный и масштабируемый рубеж защиты. Сочетание методов многопозиционной пеленгации с алгоритмами пространственной фильтрации обеспечивает необходимую достоверность данных без привлечения активных радиолокационных средств. Система позволяет автоматизировать сопровождение целей: роль оператора сводится к принятию решений на основе готовой картины воздушной обстановки и автоматически рассчитанных параметров (курс, скорость, время подлета).

Список использованных источников:

1. Кузьмин, С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – Москва : Радио и связь, 1986. – 352 с.

2. Кондратьев, В. С. Многопозиционные радиотехнические системы / В. С. Кондратьев, А. Ф. Котов, Л. Н. Марков. – Москва : Радио и связь, 1986. – 264 с.

3. Liu Y., Zhang H., Wang L., Chen X. Vision-Based Drone Detection in Complex Environments: A Survey // Drones. – 2024. – Vol. 8, № 11. – P. 643.

4. Макаренко, С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография / С. И. Макаренко. – Санкт-Петербург : Наукоемкие технологии, 2020. – 206 с.

5. Скучик, Е. Основы акустики / Е. Скучик. – Москва : Мир, 1976. – Т. 1. – 520 с.

6. Sedunov A., Sutin A., Sedunov N., Salloum H., Yakubovskiy A., Masters D. Passive acoustic system for tracking low-flying aircraft // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2016. – Vol. 10, № 9. – P. 1561–1568. – DOI: 10.1049/iet-rsn.2016.0159.

7. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Москва : Профессия, 2003. – 752 с.

8. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 8-е изд. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 636 с.

9. Fischler, M. A. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography / M. A. Fischler, R. C. Bolles // Communications of the ACM. – 1981. – Vol. 24, № 6. – P. 381–395.

РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЧАСТНОЙ СЕТИ УДАЛЕННОГО ДОСТУПА

Мисюль В.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ярмолик В.Н. – д-р техн. наук, профессор

В работе рассматривается реализация VPN удаленного доступа на базе WireGuard для корпоративной среды. Предлагается расширить протокол механизмом crypto agility, позволяющим заменять криптографические алгоритмы через плагины без изменения основной логики туннеля. Дополнительно исследуются способы повышения пропускной способности, включая распараллеливание обработки трафика и распределение входящих UDP-пакетов между несколькими сокетами с использованием. Цель работы – создать защищенный, производительный VPN, который можно адаптировать под требования конкретной организации.

Удаленный доступ в корпоративной сети требует одновременно высокой скорости, устойчивой криптографической защиты и гибкости в выборе используемых алгоритмов. WireGuard хорошо подходит для такой задачи благодаря простой модели peer-to-peer, работе на уровне сетевого слоя и небольшой поверхности атаки.

Для работы WireGuard создается виртуальный сетевой интерфейс, на который настраивается маршрутизация трафика: пакеты, адресованные определённым IP-префиксам, направляются в этот интерфейс для последующей передачи через VPN. Пользовательское приложение взаимодействует с этим интерфейсом, получая исходящие IP-пакеты и передавая обратно входящие после их обработки.

В основе протокола лежит связка публичного ключа узла и допустимых IP-адресов, что упрощает контроль трафика и делает поведение туннеля предсказуемым. Для каждого узла заранее задается его публичный ключ и список IP-префиксов, которые считаются за ним закреплёнными.

При отправке пакета система сначала определяет, какому узлу он должен быть доставлен, на основе адреса назначения. Затем выбирается соответствующий публичный ключ, и пакет инкапсулируется и шифруется с использованием сессионных ключей, ассоциированных с ним.

При приеме пакета выполняется обратная проверка. После успешной дешифрации определяется, какому публичному ключу соответствует данный пакет. Далее извлекается внутренний IP-пакет, и его исходный адрес проверяется на принадлежность списку IP-адресов закрепленных для этого узла. Если адрес не входит в разрешённый диапазон, пакет отбрасывается. Таким образом предотвращается подмена адреса внутри туннеля.

Передача трафика осуществляется поверх UDP. Полученный из виртуального интерфейса IP-пакет шифруется с использованием сессионных ключей, после чего инкапсулируется в UDP-дейтаграмму и отправляется на сетевой адрес удалённого узла, указанный в конфигурации. На принимающей стороне выполняется обратная операция: UDP-пакет принимается, из него извлекается зашифрованная полезная нагрузка, производится дешифрация, и восстановленный IP-пакет передаётся обратно в виртуальный интерфейс.

Использование UDP в качестве транспортного протокола обусловлено рядом архитектурных причин. В отличие от TCP, UDP не реализует механизмы установления соединения, подтверждения доставки, упорядочивания пакетов и контроля перегрузки. Это позволяет не дублировать функциональность, уже реализованную в вышележащих протоколах (в первую очередь TCP), трафик которых передаётся через VPN. В противном случае возникала бы проблема TCP-over-TCP, приводящая к ухудшению производительности из-за конкурирующих механизмов контроля перегрузки и повторной передачи.

Отсутствие состояния соединения на уровне транспортного протокола упрощает обработку пакетов. Каждая UDP-дейтаграмма обрабатывается независимо, что снижает требования к хранению состояния, уменьшает накладные расходы и позволяет минимизировать задержки. Это особенно важно для VPN, где каждый дополнительный этап обработки напрямую влияет на общую латентность.

UDP также лучше подходит для работы в условиях NAT. Поскольку большинство сетей используют трансляцию адресов, важно поддерживать актуальность соответствий (NAT bindings). В случае UDP это достигается за счёт периодической отправки keepalive-пакетов, что позволяет сохранять открытым маршрут между узлами без необходимости поддержания полноценного соединения. Кроме того, отсутствие жёсткой привязки к состоянию соединения упрощает смену внешнего адреса или порта (например, при перемещении клиента между сетями).

Наконец, модель UDP упрощает реализацию параллельной обработки. Так как пакеты независимы друг от друга, их можно обрабатывать в нескольких потоках без сложной синхронизации состояния соединения.

WireGuard изначально не поддерживает выбор криптоалгоритмов на лету, поскольку сознательно делает ставку на фиксированный набор примитивов ради простоты и надежности.

В рамках данной работы предлагается реализовать VPN на базе WireGuard с расширением crypto agility. Суть подхода состоит в том, чтобы вынести криптографические примитивы в абстрактный слой и подключать их через унифицированные интерфейсы. Это позволит заменять алгоритмы шифрования, хэширования и обмена ключами без переработки всего протокола. Такой подход особенно полезен для крупных организаций, где могут действовать собственные требования к допустимым алгоритмам, длинам ключей и срокам миграции на новые стандарты.

Отдельное внимание уделяется производительности. При разработке учитываются подходы к снижению накладных расходов, включая минимизацию копирования данных и ускорение обработки трафика. Для увеличения пропускной способности предполагается распараллелить чтение из виртуального сетевого интерфейса и UDP-сокета на несколько рабочих потоков. Теоретически возможно выполнять чтение через один файловый дескриптор, однако при увеличении числа потоков это приводит к росту задержек, поскольку операция чтения является блокирующей, и в каждый момент времени только один поток может читать из дескриптора. Это ограничивает масштабируемость и приводит к возникновению узкого места.

Для устранения данного ограничения предлагается использовать отдельный файловый дескриптор для каждого потока. Это достигается за счёт многократного создания сокетов с опцией SO_REUSEPORT, а также виртуальных сетевых интерфейсов (IFF_MULTI_QUEUE). Такой подход позволяет каждому потоку независимо принимать и обрабатывать пакеты, что обеспечивает более равномерную загрузку процессора и снижает задержки при высокой интенсивности трафика.

Однако стандартный механизм балансировки для файловых дескрипторов UDP-сокетов и TUN-интерфейсов имеет ограничение: распределение входящих пакетов выполняется на основе хэширования полей заголовка пакета, по которому определяется конкретный файловый дескриптор, принимающий пакет. В результате все пакеты, относящиеся к одному потоку или источнику, направляются в один и тот же дескриптор. Это приводит к неравномерной загрузке: один поток может быть перегружен, тогда как остальные остаются недоиспользованными. В контексте VPN это особенно критично, поскольку трафик от множества клиентов проходит через одну и ту же точку тоннеля.

Для решения данной проблемы предлагается использовать eBPF-программу, подключаемую к механизму распределения пакетов между файловыми дескрипторами. Такой подход позволяет внедрить пользовательскую логику непосредственно в ядро и переопределить стратегию выбора сокета для каждого входящего пакета, устраняя зависимость от стандартного хэширования и обеспечивая более равномерное распределение нагрузки между потоками.

В результате пакеты от одного и того же источника могут обрабатываться разными потоками, что устраняет узкие места и позволяет более равномерно задействовать вычислительные ресурсы. Это снижает задержки обработки, уменьшает вероятность переполнения очередей и повышает общую пропускную способность системы. Особенно заметный эффект достигается при высокой нагрузке и большом числе одновременно обрабатываемых пакетов, что характерно для корпоративных VPN-сервисов.

Таким образом, работа сочетает практическую реализацию VPN удаленного доступа с двумя направлениями развития: гибкой криптографической архитектурой и повышением пропускной способности за счет системных оптимизаций. Полученное решение ориентировано на корпоративное применение, где важны одновременно безопасность, управляемость и высокая производительность.

Список использованных источников:

1. UDP for IPv4 and IPv6 [Электронный ресурс] / Linux man-pages project. – Режим доступа: https://man7.org/linux/man-pages/man7/udp.7.html.

2. sendto(2) – Linux manual page [Электронный ресурс] / Linux man-pages project. – Режим доступа: https://man7.org/linux/man-pages/man2/sendto.2.html.

3. recvfrom(3) – POSIX manual page [Электронный ресурс] / Linux man-pages project – Режим доступа: https://man7.org/linux/man-pages/man3/recvfrom.3p.html.

4. socket(7) – Linux manual page [Электронный ресурс] / Linux man-pages project. – Режим доступа: https://man7.org/linux/man-pages/man7/socket.7.html.

5. bind(2) – Linux manual page [Электронный ресурс] / Linux man-pages project. – Режим доступа: https://man7.org/linux/man-pages/man2/bind.2.html.

6. getsockopt(2) – Linux manual page [Электронный ресурс] / Linux man-pages project. – Режим доступа: https://man7.org/linux/man-pages/man2/setsockopt.2.html.

7. WireGuard: Next Generation Kernel Network Tunnel [Электронный ресурс] / J. A. Donenfeld. – Режим доступа: https://www.wireguard.com/papers/wireguard.pdf.

8. WireGuard Quick Start Guide [Электронный ресурс] / WireGuard. – Режим доступа: https://www.wireguard.com/quickstart/.

9. Universal TUN/TAP device driver [Электронный ресурс] / Linux Kernel Documentation. – Режим доступа: https://docs.kernel.org/networking/tuntap.html.

10. Таненбаум Э. Современные операционные системы. – СПб.: Питер, 2015. – С. 784-802.

11. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. – СПб.: Питер, 2017. – С. 611-623.

СПОСОБ ГЕЙМИФИКАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ НА ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ИНТЕРФЕЙСА ВВОДА

Рачинская А.С., Евсеенко Е.С., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Деменковец Д.В. – старший преподаватель

Современную восстановительную медицину невозможно представить без активного использования информационных технологий. Программное обеспечение с элементами геймификации может играть ключевую роль в процессе реабилитации и повышении мотивации пациентов. В данной работе рассматриваются ключевые аспекты разработки и внедрения игрового приложения для занятий лечебной физической культурой.

Создание систем геймификации физической активности является актуальной задачей для медицинских и образовательных учреждений. В условиях постоянного развития технологий традиционные методы лечебной физической культуры (ЛФК) требуют значительной модернизации. Стандартные комплексы упражнений на удержание баланса часто монотонны и не вызывают у детей энтузиазма, что приводит к снижению эффективности лечения [1]. Современная реабилитация сталкивается с необходимостью оптимизации процесса тренировок и повышения вовлеченности пациентов. Эффективное программное средство с игровой обратной связью может стать хорошим инструментом в решении подобных задач.

В Республике Беларусь уделяется особое внимание цифровизации здравоохранения. Одним из приоритетных направлений является внедрение аппаратно-программных комплексов в процесс восстановительного лечения и реабилитации. Государственная политика в этой области направлена на повышение доступности медицинских услуг, в том числе за счет перевода части реабилитационных практик в формат удобных домашних занятий под дистанционным контролем специалистов.

В данной работе способом геймификации физической реабилитации является ПО, используемое совместно с альтернативным интерфейсом ввода. Интерфейсом ввода является балансировочный диск, а в качестве устройства отображения может быть использованы как экран монитора или телевизор. ПО представляет собой интерактивную цифровую раскраску, управление которой осуществляется за счет изменения угла наклона тела пользователя или внешних координат. Её главная цель – незаметно для ребенка перевести рутинную физическую нагрузку в формат увлекательного занятия, обеспечивая скоординированную тренировку вестибулярного аппарата, проприоцепции и зрительно-моторной реакции.

Анализ подобных систем и программного обеспечения показал, что существующие системы виртуальной реальности (VR) могут вызывать кинетоз у детей, а медицинские стабилоплатформы имеют крайне высокую стоимость [2]. Это позволило выполнить разработку приложения, независимого от дорогостоящего оборудования. Также была разработана уникальная модель взаимодействия пользователя с интерфейсом. Новизна решения заключается в полном отказе от физических нажатий. Выбор цвета кисти и заливка контуров рисунка осуществляются с помощью фиксации курсора на определенное время (dwell click). Необходимость удерживать курсор в одной позиции вынуждает ребенка целенаправленно контролировать физическое равновесие.

Физическая реализация реабилитационного процесса подразумевает использование программного обеспечения совместно с балансировочным диском, оснащенным аппаратным диагностическим комплексом. Пользователь (ребенок) располагается стоя на платформе, а перед ним, например, устанавливается телевизор или внешний монитор, дублирующий экран персонального компьютера с запущенным приложением. Схема примера взаимодействия компонентов системы представлена на рисунке 1.

Аппаратный блок платформы осуществляет непрерывный сбор данных при помощи встроенного акселерометра, измеряющего углы наклона по трем осям. Передача телеметрических данных на компьютер реализуется по беспроводному протоколу TCP через выделенный Wi-Fi модуль, что обеспечивает гарантированную доставку пакетов координат без потерь. Ребенку необходимо физически изменять угол наклона платформы, не теряя равновесия, чтобы перемещать курсор в необходимые области интерфейса и удерживать его там некоторое заданное время [3].

Пример использования данного комплекса представляется следующим образом. Ребёнок становится на балансировочный диск, устанавливает равновесие и после начала игрового уровня администратором начинает выполнение задания. С помощью балансирования ребёнок перемещает курсор по экрану для выбора цвета кисти и закрашивания областей рисунка раскраски. В качестве конечного задания могут выступать как и загруженные шаблоны рисунков, так и определенные самим игроком. После полного выполнения задания идёт подсчёт суммарного времени выполнения задания и иной статистики, сохраняя все данные в локальную базу данных.

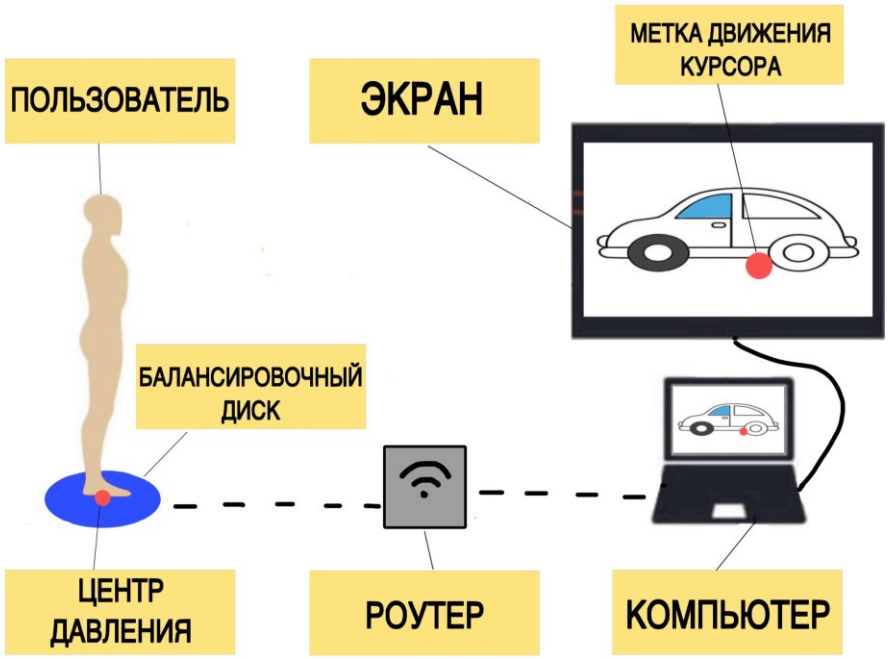


Рисунок 1 – Схема аппаратно-программного комплекса

Ключевым преимуществом разработанного программного средства является встроенный модуль аналитики. Комплекс в фоновом режиме собирает поступающие данные с балансировочного диска и иные результаты игры, например, количество неудачных попыток выбрать нужный цвет или общую пройденную дистанцию кисти.

К преимуществам данного комплекса следует отнести следующее: низкий порог вхождения в лечебную реабилитацию ввиду работы с доступным аппаратно-программным оборудованием, получение аналитики о стабильности позы, экспортируемой в CSV-отчеты, вместо субъективного визуального наблюдения, а также повышение вовлеченности детей благодаря яркой графике и понятной цели – раскрасить картинку согласно заданию или по желанию собственной фантазии. Пример игровой последовательности экранов представлен на рисунке 2.

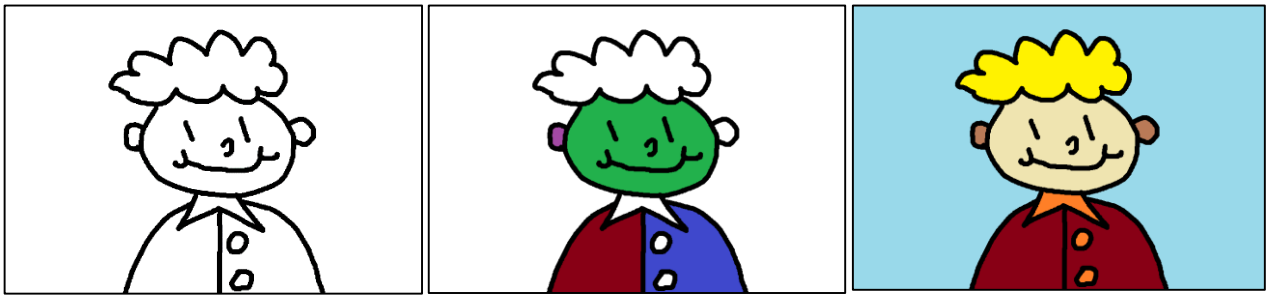


Рисунок 2 – Пример результата работы программного средства

Разработка и внедрение подобных программных средств могут стать важным направлением модернизации реабилитационных процедур для детей. В связи с высокой эффективностью геймификации, такие системы имеют хороший потенциал для применения в кабинетах ЛФК, профильных санаториях и в качестве инструмента для ежедневных домашних тренировок.

Список использованных источников:

1. Епифанов В. А. Лечебная физическая культура и спортивная медицина : учебник / В. А. Епифанов. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2007. – 568 с.

2. Джафарова, О. А. Компьютерные системы биоуправления с игровой обратной связью / О. А. Джафарова [и др.] // Медицинская техника. – 2002. – № 1. – С. 34-38.

3. Глушаченко, Н. С. Программно-аппаратный комплекс для сбора и визуализации данных при исследовании координации у детей / Н. С. Глушаченко, Д. В. Деменковец, В. С. Аносов // Информационные технологии и системы 2024 (ИТС 2024) : материалы международной научной конференции, Минск, 20 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2024. – С. 151–152. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/58615

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ДЕТЕКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯ ESP32-CAM

Русакович Е.С., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ярмолик В.Н. – д-р техн. наук, профессор

Описывается подход к определению зоны детекции в видеопотоке, получаемом с модуля ESP32-CAM. Сравниваются алгоритмы пороговой фильтрации, иллюстрируется типовая проблема алгоритмов удаления фона.

Компьютерное зрение активно развивается с середины 20-го века и успешно применяется для решения задач распознавания образов, отслеживания перемещений, воссоздания цифровых моделей объектов, детекции аномалий и др. Современное развитие встроенных систем позволяет применять различные комплексы мониторинга, включающие модули компьютерного зрения, в труднодоступных местах, сохраняя при этом небольшие габариты и высокую энергоэффективность устройства. Встроенное компьютерное зрение может быть использовано для контроля технологических параметров, детекции сбоев и нарушений работы оборудования, контроля движения в специальных зонах и соблюдения техники безопасности.

При разработке таких программно-аппаратных комплексов необходимо иметь механизм классификации событий по кадрам входного видеопотока. Значительного улучшения производительности системы можно добиться, выполняя классификацию не для каждого кадра видеопотока, а только для зон детекции (ROI) [1], определение которых сводится к вычислению маски попавших в кадр объектов, для чего применяется алгоритм удаления фона с последующей фильтрацией шума.

Одним из самых эффективных с точки зрения потребления ресурсов и метрик (точность, полнота, F-мера и др.) является вычитание фона с адаптивным обновлением фоновой модели [2]. Этот метод формирует фоновую модель на основе начальных кадров. Затем для каждого пикселя фоновой модели и пикселей последующих кадров вычисляется разность по модулю, формируя маску зафиксированных объектов. Отличительной особенностью алгоритма является то, что приходящие кадры, умноженные на константный коэффициент (скорость обучения), прибавляются к фоновой модели, тем самым адаптируя её к постепенным изменениям окружающей среды, таким как изменение освещения, формирование теней и движение фона. Причём суммируется только та часть кадра, которая не попадает в итоговую зону детекции.

Получившаяся маска объектов содержит шумовые значения, вызванные в том числе и физическим устройством сенсора камеры. Для их удаления широко применяются алгоритмы пороговой обработки: пиксели меньше или равные выбранному значению устанавливаются в 0. При установке глобального порога для всего кадра фильтрация может давать некорректные результаты при нестабильном освещении, тенях объектов и других усложняющих факторах. Для решения этой проблемы может применяться алгоритм адаптивной пороговой фильтрации, который устанавливает порог для каждого пикселя в зависимости от значений в его локальной окрестности.

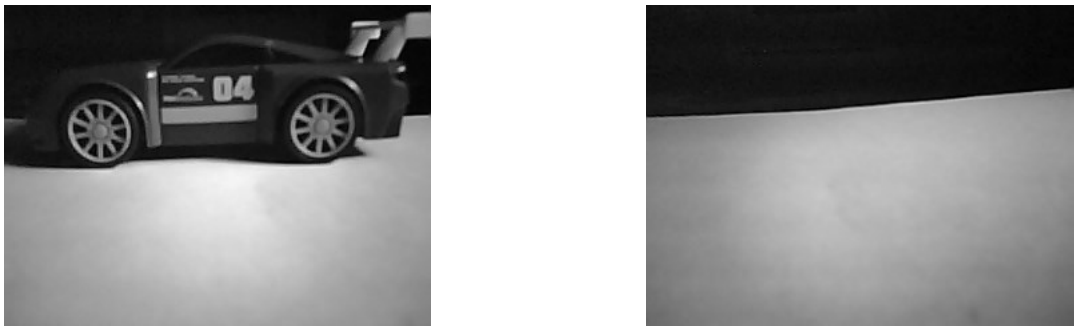
Непосредственно пороговое значение может задаваться эмпирически. Однако более стабильные результаты получаются при автоматическом выборе порога на основании пикселей кадра, например, в алгоритме Отсу [3]. Он основывается на статистических свойствах маски объектов, предполагая, что гистограмма для получившихся пикселей стремится к бимодальной, что позволяет разделить все пиксели изображения на два класса: фоновый и объекта. Пороговым выбирается значение пикселя, которому будет соответствовать максимальная межклассовая дисперсия. Межклассовая дисперсия вычисляется по формуле:

$$\sigma_b^2(\mathrm{t}) = w_0(t) \cdot w_1(t) \cdot (\mu_0(t) - \mu_1(t))^2, \quad (1)$$

где w_0 и μ_0 – вероятность и математическое ожидание пикселей класса фона; w_1 и μ_1 – вероятность и математическое ожидание пикселей класса объекта; t – пороговое значение, разделяющее классы.

Существуют различные варианты алгоритма, более устойчивые к мультимодальным гистограммам и зашумлённым кадрам. Но все они значительно повышают вычислительную сложность, учитывая, что классическая реализация линейно зависит от количества пикселей и их уникальных значений. В статье [4] приводится способ сокращения асимптотики алгоритма с линейной до логарифмической. Метод основывается на вычислении межклассовых дисперсий не для всей гистограммы значений, а только для значений, получаемых применением численного метода бисекции. Выбор следующего отрезка определяется тем, в каком направлении возрастает дисперсия. Алгоритм предполагает, что распределение межклассовой дисперсии унимодально для изображений масок,

полученных после вычитания фона. Проведены экспериментальные исследования с целью сравнения качества классификации алгоритмов. Тестовый объект и фоновая модель представлены на рисунке 1, результаты фильтрации фоновых пикселей – на рисунке 2.



а б

Рисунок 1 – Объект в зоне детекции (а) и фоновая модель (б)

а б

Рисунок 2 – Пороговая фильтрация кадра классическим алгоритмом (а) и с бисекцией (б)

Пороговое значение пикселей для маски, полученной на рисунке 2а, составило 60, в то время как для маски, полученной методом Отсу с бисекцией, – 143. Как следствие, зона детекции, выбранная после пороговой фильтрации классическим методом, точнее захватывает появившийся в кадре объект, поэтому классический метод предпочтительнее для последующей классификации.

На рисунках 2а и 2б проявляется типовая проблема алгоритмов вычитания фона: зафиксированный объект отбрасывает тень, которая включается в результирующую маску. Согласно исследованию [2] наиболее близкая к реальной маска объекта может быть получена при помощи алгоритма вычитания фона, учитывающего цвет и текстуру пикселей [5], однако объём необходимой для работы оперативной памяти делают его непригодным для реализации в рамках встроенной системы на базе ESP32. В плате предусмотрено 520 КБ встроенной оперативной памяти с возможностью адресации дополнительных 8 МБ псевдостатической оперативной памяти, встроенной в общее виртуальное адресное пространство и значительно уступающей в скорости обращения [6].

В результате проведенных экспериментов рассмотрены различные варианты получения маски объектов непосредственно на модуле ESP32-CAM. Проведено сравнение классического алгоритма Отсу и его модификации на основе метода бисекции, показано, что несмотря на заявленное в статье [4] уменьшение вычислительной сложности алгоритма, снижается точность классификации пикселей.

Список использованных источников:

1. Noman, M. An optimized and fast scheme for real-time human detection using Raspberry Pi / M. Noman, M. H. Yousaf, S. A. Velastin // 2016 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA): proc., Gold Coast, Australia, 2015 / IEEE. – [Gold Coast], 2016. – P. 1-7.

2. Sobral, A. A comprehensive review of background subtraction algorithms evaluated with synthetic and real videos / A. Sobral, A. Vacavant // Computer Vision and Image Understanding. – 2014. – Vol. 122. – P. 4-21.

3. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, No. 1. – P. 62-66.

4. Kodathala, V. Fast OTSU Thresholding Using Bisection Method [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2509.16179v1 – Дата доступа: 23.03.2026.

5. Yao, J. Multi-Layer Background Subtraction Based on Color and Texture / J. Yao, J. -M. Odobez // 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: proc., Minneapolis, USA, 17-22 June 2007 / IEEE. – [Minneapolis], 2007. – P. 1-8.

6. ESP32 Technical Reference Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://documentation.espressif.com/esp32_technical_reference_manual_en.pdf – Дата доступа: 23.03.2026.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО СОЗДАНИЯ, РЕДАКТИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕДУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ГРАФИЧЕСКОГО API VULKAN

Сазонов А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Красковский П.Н. – старший преподаватель

В работе представлено программное средство создания, редактирования и применения процедурных материалов, реализованное с использованием графического API Vulkan. Рассмотрены методы генерации текстур на основе шумовых функций, применяемые в системах визуализации в реальном времени. Проведен сравнительный анализ градиентного шума, клеточного шума (Worley noise) и фрактального шума (fBm).

Введение. Процедурная генерация текстур – метод, при котором значения цвета и других параметров поверхности вычисляются алгоритмически. Такой подход позволяет получать бесконечно детализированные структуры с минимальными затратами памяти.

Основой большинства процедурных текстур являются шумовые функции, формирующие псевдослучайные, но непрерывные распределения значений в пространстве.

Градиентный шум. Одним из наиболее распространенных методов является *Perlin Noise* – градиентный шум, обеспечивающий гладкие переходы значений.

Функция шума [1] определяется как интерполяция скалярных произведений градиентов и векторов смещения:

$$N(x) = \sum_i w_i \cdot \left(g_i \cdot (\mathrm{x} - x_i)\right), \tag{1}$$

где g_i – псевдослучайный градиент в узле решетки; w_i – весовая функция интерполяции.

Для обеспечения гладкости используется сглаживающая функция [1]:

$$f(t) = 6t^5 - 15t^4 + 10t^3 \tag{2}$$

Градиентный шум обладает следующими свойствами: непрерывности, отсутствия резких переходов и контролируемости частотной структуры. Пример генерации текстуры с помощью *Perlin Noise* приведен на рисунке 1.

Рисунок 1 – Пример генерации текстуры с помощью *Perlin Noise*

Клеточный шум. Другим важным методом является *Worley Noise*, основанный на вычислении расстояния до ближайших опорных точек. Функция, определяющая значения шума, [2] имеет следующий вид:

$$F_n(x) = distance(x, p_n) \tag{3}$$

где p_n – *n*-я ближайшая точка.

Клеточный шум формирует характерные структуры: ячейки, трещины и органические паттерны. Пример генерации текстуры с помощью *Worley Noise* приведен на рисунке 2.

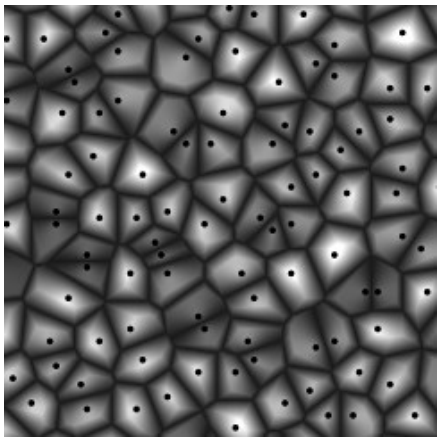


Рисунок 2 – Пример генерации текстуры с помощью *Worley Noise*

Фрактальный шум. Для увеличения детализации используется фрактальная сумма шумов *fBm (fractural Brownian motion)*. Функция фрактальной суммы шумов [2] имеет следующий вид:

$$F(x) = \sum_{i=0}^{k} a_i \cdot N\left(2^i x\right), \tag{4}$$

где a_i – амплитуда октавы; p – коэффициент уменьшения амплитуды.

Данный метод позволяет комбинировать несколько частот шума, формируя сложные структуры и обладает следующими свойствами: самоподобие, высокая детализация и гибкость настройки. Пример генерации текстуры с помощью *fBm* приведен на рисунке 3.

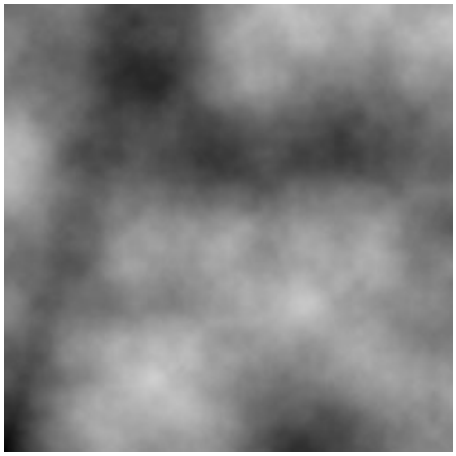


Рисунок 3 – Пример генерации текстуры с помощью *fBm*

Сравнительный анализ. Сравнение методов проводилось по следующим критериям: визуальное качество, вычислительная сложность и применимость.

Градиентный шум обеспечивает гладкий и естественные переходы, что делает его подходящим для генерации: облаков, рельефа и мягких текстур.

Клеточный шум лучше подходит для камня, кожи и органических структур.

Фрактальный шум позволяет существенно повысить детализацию, комбинируя базовые методы, однако увеличивает вычислительные затраты.

Список использованных источников:

1. Graphics Programming: Procedural Textures and Noise [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mathematik.uni-marburg.de/~thormae/lectures/graphics1/graphics_11_2_eng_web.html#1. – Дата доступа: 22.03.2026.

2. The Book of Shaders by Patrico Conzalez Vivo & Jen Lowe [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://thebookofshaders.com. – Дата доступа: 25.03.2026.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ СООБЩЕСТВА ВЛАДЕЛЬЦЕВ ДОМАШНИХ ЖИВОТНЫХ

Стасевич Ю.М., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куликов С.С. – канд. техн. наук, доцент

Каждый человек может стать владельцем домашнего питомца. При этом не все понимают необходимость правильного ухода за животными. Многие люди также ищут удобное средство для предоставления своих услуг и реализации товаров. Для этих целей и разрабатывается данное веб-приложение.

В интернете существует информация о правильной заботе о домашних питомцах. Но чтобы её найти, необходимо приложить несоразмерно много усилий, поскольку она находится не в одном месте, а разбросана по разным тематическим сайтам и форумам. Немаловажной является также проверка этих данных на достоверность. Для многих людей это слишком трудозатратно.

В последнее время наблюдается рост числа домашних питомцев [1]. В связи с этим было создано большое разнообразие платформ для их владельцев. Но они зачастую обладают значительными недостатками. Среди них можно выделить:

– поиск без возможности настройки фильтрации;
– недостоверная информация;
– отсутствие модерации.

Разрабатываемое веб-приложение призвано устранить данные недостатки. Оно должно стать удобной единой точкой доступа ко всей необходимой пользователю информации. Среди основных разделов можно выделить:

– блоги;
– объявления;
– справочную информацию;
– карточки питомцев.

Важной особенностью является реализация полнотекстового поиска с фильтрацией. Для блогов поиск выполняется по названию, имени автора, тегам и аннотации; для объявлений – по названию и тегам. Фильтры для объявлений включают тип объявления (пропажа, находка, вязка, продажа, передача), тип животного (кошки, собаки, грызуны, птицы, рыбы, другое) и город размещения. Результаты поиска можно сортировать по дате, просмотрам или рейтингу (разница лайков и дизлайков).

Отдельного внимания заслуживает система карточек питомца. Она позволяет систематизировать информацию о всех домашних животных пользователя, указывая особенности поведения, прививки и обработки. При этом происходят уведомления пользователей о ближайших мероприятиях, связанных с их питомцами, таких как график прививок и обработок.

Следует упомянуть и разграничение информации между пользователями. Любая медицинская информация о питомце должна быть доступна только владельцу карточки. При этом саму карточку можно привязать к блогу или объявлению, тем самым убрав ручное заполнение повторяющейся информации.

Из особенностей можно выделить гибкую систему модерации с чётким разделением пользователей на роли. К ним можно отнести следующие:

– неавторизованный пользователь;
– авторизованный пользователь;
– модератор;
– администратор.

Кроме того, в приложении реализован автоматизированный алгоритм проверки сообщений на неподобающий контент. Текст сначала нормализуется (приводится к нижнему регистру, очищается от лишних символов), после чего при обнаружении нарушений сообщение относится к высокой (угрозы, призывы к насилию, дискриминация, противоправные действия), средней (нецензурная лексика, оскорбления, грубость) или низкой степени риска (спам, подозрительные ссылки, избыточное повторение). Для сообщений низкой и средней степени риска применяется сокрытие сообщений или их цензурирование. Сообщения с высокой степенью риска направляются на модерацию.

Список использованных источников:

1. Pet population continues to increase while pet spending declines [Электронный ресурс] / American Veterinary Medical Association. – Дата публикации: 10.10.2024. – URL: https://www.avma.org/news/pet-population-continues-increase-while-pet-spending-declines (дата обращения: 04.04.2026).

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО КОДА КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРЫ АППАРАТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Трубач К.И., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Иванюк А.А. – д-р техн. наук, профессор

В работе предложен метод оптимизации аппаратных ускорителей на основе динамического анализа кода. В отличие от статического подхода, он позволяет адаптировать систему команд под реальные рабочие нагрузки и исключить избыточные аппаратные блоки. Эффективность метода продемонстрирована на примере ускорителя для расчета характеристик ФНФ, что обеспечивает создание более компактных и энергоэффективных процессорных архитектур.

Современная микроэлектроника характеризуется стремлением к максимальной энергоэффективности и производительности при ограниченных ресурсах кристалла. Применение универсальных ядер для решения узкоспециализированных задач часто приводит к избыточности аппаратных ресурсов. Статический анализ [1] позволяет определить потенциально необходимые ресурсы, однако он не всегда учитывает реальные сценарии выполнения программы, где определенные ветви кода могут исполняться крайне редко или зависеть от специфических входных данных.

Целью настоящей работы является формализация процесса динамического анализа программного кода для уточнения требований к архитектуре аппаратного ускорителя. Динамический анализ позволяет перейти от теоретической оценки «худшего случая» к адаптивной конфигурации аппаратного обеспечения, которая оптимизирована под реальные рабочие нагрузки. Он предполагает выполнение скомпилированного машинного кода на эмуляторе или виртуальной платформе с целью сбора трассировочных данных. В отличие от статического анализа, который оперирует структурой исходного кода, динамический анализ фокусируется на потоке управления и потоке данных во время исполнения, и включает формирование наборов входных данных для максимально широкого покрытия входных векторов, включая граничные и случайные значения; сбор статистики по каждому выполненному переходу и каждой операции; выявления цепочек вычислений, определяющих критический путь выполнения алгоритма; построение профиля использования ресурсов. Выходными данными динамического анализа является набор данных о ветвлениях в алгоритме, о частоте использования инструкций, о цепочках связанных инструкций и прочие.

Одним из применений специализированный аппаратных ускорителей является управление аппаратными блоками физически неклонируемых функций (ФНФ) [2], а также расчёт их характеристик. На рисунке 1 представлен алгоритм, заданный на псевдоязыке, для расчёта характеристики уникальности (UNQ) для *i*-той и *j*-той ФНФ, а также аппаратура, синтезированная для этого алгоритма на основе статического анализа. Функция *STA_ch(CHk, E, i)* введена для сокращения псевдокода и рассчитывает стабильность ФНФ при многократном повторении (2^E раз) запроса к ФНФ.

Input: N, E, i, j
Output: UNQ_{ij}

1 $resp_{equal} \leftarrow 0$
2 **for** k := 1 to 2^N **do**
3 $resp_{accum} \leftarrow 0$
4 sta, $resp_{last} \leftarrow STA_ch(CH_k, E, i)$
5 **if** (sta == 1) **then**
6 $resp_{accum} \leftarrow resp_{accum} + 1$
7 sta, $resp_{last} \leftarrow STA_ch(CH_k, E, j)$
8 **if** (sta == 1) **then**
9 $resp_{accum} \leftarrow resp_{accum} + 1$
10 **if** ($resp_{accum}$ == 2) **then**
11 $resp_{equal} \leftarrow resp_{equal} + 1$
12 **end for**
13 $resp_{equal} \leftarrow 1 - (resp_{equal} >> N)$
14 **return** $resp_{equal}$

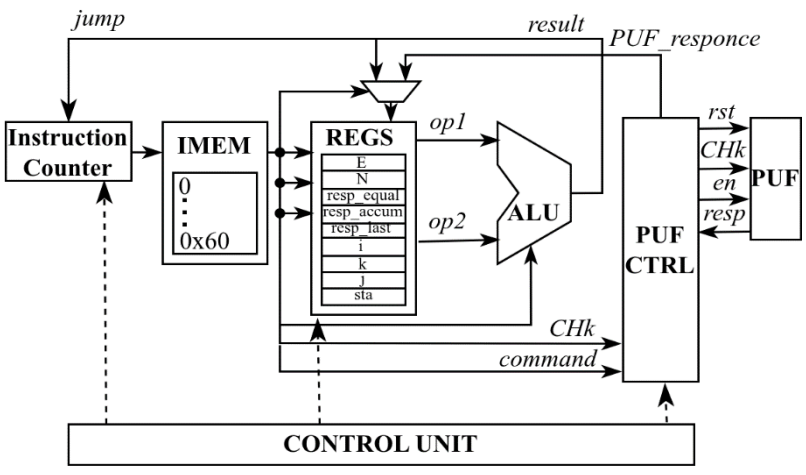


Рисунок 1 – Алгоритм расчёта уникальности и структура аппаратного ускорителя, реализующего его

Статический анализ показал, что аппаратура должна уметь выполнять следующие инструкции и операции: сдвиги влево на единицу и значение регистра, инструкция модуля (эта и перечисленные ранее операции специфичны для функции *STA_ch(CHk, E, i)*), сложение и вычитание над регистрами и константами, сдвиг вправо на значение регистра, инструкции декремента и инкремента, сравнение с единицей, сравнение с двойкой, вычитание регистра от единицы, а также ветвления. Некоторые из этих инструкций нестандартны для существующих архитектур, поскольку представляют собой операции, полученные из нескольких простых инструкций и специфичные именно данному алгоритму. Зачастую составные инструкции, если они вызываются малое количество раз по сравнению с другими инструкциями, можно развернуть в набор простых операций без значительной потери производительности, что упростит процесс декодирования в процессорном ядре и выполнение микроопераций АЛУ.

Ответить на вопрос, какие специальные инструкции можно упростить, помогает динамический анализ. Его целью является изменение аппаратуры для достижения оптимального её использования в типичном запуске. Для алгоритма, представленного выше, параметры *N* и *E* являются уточняющими (то есть от их роста зависит точность выходного значения $resp_{equal}$, а параметры *i*, *j*, индексирующие ФНФ, – определяющими крайние случаи, что связано с вероятностью получить стабильный ответ от конкретной ФНФ. Согласно алгоритму выше, от стабильности пар запрос-ответ двух ФНФ зависит выполнение или невыполнение инструкций в условных блоках if. Если для данного запроса обе ФНФ нестабильны, не будет выполнен ни один такой блок; если хотя бы одна из ФНФ нестабильна, будет выполнен только один условный блок; и наконец, если обе ФНФ стабильны, будут выполнены все условные блоки. Таким образом, проведение динамического анализа желательно на трёх случаях, для каждого из которых одним из результатов динамического анализа становится частота встречаемости инструкций (выражаемая в процентах) при динамическом исполнении микрокода в случае стабильных ФНФ (F_{fs}), в случае частично стабильных ФНФ (F_{ps}) и в случае нестабильных ФНФ (F_{ns}). В таблице 1 представлены избранные инструкции алгоритма, наиболее ярко демонстрирующие особенности изменения процента своего использования в алгоритме в зависимости от стабильности ФНФ.

Таблица 1 – Частота встречаемости избранных инструкций в зависимости от стабильности ФНФ

Инструкция	F_{ns}, %	F_{ps}, %	F_{fs}, %
Сложение двух регистров (add)	20,0466	20,1738	20,2016
Вычитание регистра от единицы (one_sub)	0,0002	0,0002	0,0001
Переход по адресу, если два сравниваемых регистра не равны (bne)	11,1302	11,1170	10,0038
Переход по адресу, если регистр не содержит единицу (bne_one)	0,0002	0,0432	9,9648
Переход по адресу, если регистр не содержит двойку (bne_two)	0	0,0216	0,0389
Взятие абсолютного значения регистра (abs)	11,0869	11,0737	9,9649
Сброс регистра в значение нуля (reset)	0,1269	0,1299	0,1196
Арифметический сдвиг регистра вправо (shr)	0,0002	0,0002	0,0001

Инструкция add является примером тех инструкций, которые составляют большую часть потока управления. Они используются во внутреннем цикле функции *STA_ch(CHk, E, i)*), и их замена на ряд простых инструкций будет крайне негативно сказываться на общей производительности алгоритма. Специализированная инструкция вычитания из единицы (one_sub) встречается незначительно редко вне зависимости от входных данных, и является хорошим кандидатом на удаление из архитектуры набора инструкций (instruction set architecture, ISA) путём замены на комбинацию инструкций сложения с константой (addi) и вычитания (sub). Такой же подход хорошо применим для сброса регистра в значение нуля (zero): её можно заменить использованием инструкции add в сочетании с аппаратным регистром-константой логического нуля. При этом несмотря на то, что инструкция сдвига вправо (shr) встречается так же редко, как и инструкция сброса регистра, она является незаменимой и удалению из ISA не подлежит. Инструкции ветвления при сравнении регистров (bne), сравнении регистра с единицей (bne_one) и сравнения регистра с двойкой (bne_two) хорошо демонстрируют описанную ранее связь между условными конструкциями и стабильностью ФНФ. Из таблицы 1 видно, что инструкция bne_one участвует редко, но она может дать существенный прирост производительности в случае стабильных ФНФ, и убирать её из ISA нежелательно.

Динамический анализ позволяет оптимизировать архитектуру ускорителей и адаптировать систему команд под реальные нагрузки и исключить избыточность. Это влечёт к пересмотру и изменению существующей архитектуры, но обеспечивает создание более компактных и энергоэффективных ядер.

Список использованных источников:

1. Kaiky M., IVANIUK A., ZALIVAKA S. Methodology for constructing statically reconfigurable soft-processor cores for hardware acceleration of algorithms : пат. 12204882 США. – 2025.

2. Иванюк А.А. Исследование физически неклонируемой функции конфигурируемого кольцевого осциллятора. Информатика. 2025, т. 22, № 1, с. 73–89. DOI: https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-1-73-89.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СКЛАДСКОГО УЧЁТА И ЭЛЕКТРОННОГО ТОВАРНОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА НА ТОРГОВОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Убоженко М.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шамына А.Ю. – старший преподаватель

В работе рассматриваются актуальные проблемы организации складского учёта и электронного товарного документооборота на торговых предприятиях малого и среднего бизнеса. Проанализированы масштабы финансовых потерь, обусловленных ошибками управления запасами, а также современные нормативные требования к прослеживаемости товаров в Республике Беларусь. Обоснована необходимость применения специализированных веб-ориентированных программных средств для повышения эффективности учётных процессов.

Эффективное управление товарными запасами является одним из ключевых факторов устойчивого функционирования любого торгового предприятия. Между тем масштаб проблемы некорректного управления запасами значительно превышает обыденные представления. Согласно аналитическому отчёту исследовательской компании IHL Group, мировые потери розничной торговли от искажения складских данных достигают 1,73 триллиона долларов ежегодно, из которых 690,9 миллиарда приходится на дефицит товаров, а 572 миллиарда – на затоваривание [1]. Проблема затоваривания и дисбаланса запасов подробно отражена в отраслевом отчёте Netstock 2024 Inventory Management Benchmark Report, построенном на анализе данных более 2 400 компаний по всему миру. Доля избыточных запасов в структуре товарных остатков малых и средних предприятий выросла до 38%, у крупных предприятий (свыше 500 сотрудников) – до 44%. Почти 80% обследованных компаний одновременно страдают от недостаточного перспективного планирования и избыточного затоваривания, несмотря на общее снижение стоимости запасов на 9% за год. Нестабильность сроков поставок остаётся ведущей проблемой для 72% предприятий, что усиливает риск как дефицита, так и избытка товаров на складе. При этом лишь небольшая доля компаний в полной мере использует современные средства оптимизации запасов, а основными сдерживающими факторами остаются опасения по поводу качества данных и непредсказуемости эффекта от внедрения [2].

Проблема усугубляется административными и учётными ошибками. По данным аналитического отчёта, ежегодные потери розничного сектора только в США, вызванные ошибками ценообразования, неправильным подсчётом запасов и некорректным оформлением поступлений, составляют порядка 20 миллиардов долларов [3]. Практика показывает, что внедрение специализированных систем товароучёта позволяет сократить потери от списаний с 8% до 2% от товарооборота, обеспечивая значительную экономию уже в первые месяцы эксплуатации [3].

Современная методика управления запасами опирается на принцип непрерывного учёта, при котором каждая складская операция – оприходование, реализация, списание, перемещение – рассматривается как атомарная транзакция, мгновенно обновляющая состояние информационной системы. В отличие от устаревшего подхода периодической инвентаризации, требующего приостановки работы предприятия, непрерывный учёт исключает информационную задержку между физическим перемещением товара и его отражением в системе. Это особенно критично для предприятий с высокой оборачиваемостью товаров, где даже незначительное расхождение учётных и реальных остатков способно спровоцировать цепную реакцию ошибок в закупках и продажах.

Центральным элементом товарного документооборота на современном предприятии выступает электронная накладная – структурированный электронный документ, фиксирующий движение товарно-материальных ценностей между контрагентами. В Республике Беларусь электронный документооборот в торговле регулируется на государственном уровне и переживает период активного развития. Согласно данным БЕЛТА, почти 35 тысяч субъектов хозяйствования в стране уже используют электронные накладные [4]. Указ Президента №381 «О цифровом развитии» от 29 ноября 2023 года закрепил юридическую равнозначность электронных документов бумажным и определил стратегию дальнейшего внедрения цифровых технологий [5]. С 1 мая 2024 года постановление установило обновлённые требования к форматам электронных товарных и товарно-транспортных накладных, включая обязательные разделы по ценообразованию и информацию о перевозчике [6]. Более того, с 1 октября 2025 года значительно расширился перечень товаров, подлежащих обязательной прослеживаемости и маркировке, а их оборот допускается исключительно посредством электронных накладных [7].

Данные нормативные изменения обязывают торговые предприятия вести количественный учёт товаров в установленных единицах измерения, указывать информацию о приходном документе (тип, дата, номер, номер строки), а также фиксировать уникальные маркировочные коды –

унифицированные контрольные знаки (УКЗ) и средства идентификации (СИ). Жизненный цикл товарного документа в такой системе представляет собой многоэтапный процесс: формирование накладной с реквизитами контрагентов и торговой точки, добавление товарных позиций с ценовыми характеристиками и сроками годности, прикрепление маркировочных кодов к каждой позиции, последовательная смена статусов документа (создание, проверка, проведение) и автоматический пересчёт складских остатков в разрезе партий и торговых точек. Подобная схема обеспечивает сквозную прослеживаемость товара от поступления до реализации конечному покупателю.

Помимо оперативного учёта, для принятия обоснованных управленческих решений предприятию необходим инструментарий торговой аналитики. Согласно сравнительному исследованию, опубликованному в рецензируемом журнале Path of Science, интерактивные графики ускоряют принятие управленческих решений в 35 раз по сравнению с табличным представлением данных, а визуализация временных рядов в виде графиков и диаграмм позволяет оперативно выявить аномалии – резкие спады продаж или периоды повышенного спроса [8].

Для решения обозначенных задач разработано веб-ориентированное программное средство MarkTrack, ориентированное на автоматизацию складского учёта и электронного товарного документооборота на торговом предприятии. Клиентская часть системы реализована на базе фреймворка Next.js и языка TypeScript с использованием файловой системы маршрутизации App Router, обеспечивающей серверный и клиентский рендеринг страниц.

Система имеет модульную архитектуру и включает следующие функциональные модули: модуль электронного документооборота, модуль складского учёта, модуль продаж, модуль справочных данных, модуль аналитической отчётности и модуль администрирования. Модуль электронного документооборота обеспечивает полный жизненный цикл товарных накладных – от создания документа с реквизитами контрагентов и товарных позиций до последовательной смены статусов и автоматического пересчёта складских остатков. Реализована поддержка нескольких типов документов: приходные и расходные накладные, перемещения между складами, списания и ценовые корректировки. Каждая товарная позиция может содержать маркировочные коды – унифицированные контрольные знаки (УКЗ) и средства идентификации (СИ), что соответствует нормативным требованиям прослеживаемости товаров. Предусмотрены функции отмены изменений полей документа, отката документа к предыдущему состоянию и экспорта данных в формат DBF.

Модуль аналитической отчётности предоставляет интерактивные информационные панели с линейными, столбчатыми и площадными диаграммами, а также табличными представлениями и карточками ключевых показателей. Домашняя страница системы представляет собой конфигурируемую панель мониторинга, состоящую из блоков визуализации с адаптивной компоновкой.

Модуль складского учёта реализует мониторинг товарных остатков в разрезе партий и торговых точек с расширенными возможностями фильтрации, поиска и сортировки.

Модуль продаж обеспечивает учёт транзакций с привязкой к внешним устройствам и детализацией по сменам, способам оплаты (наличные, карта), скидкам и возвратам.

Таким образом, в условиях законодательного ужесточения требований к прослеживаемости товаров и обязательности электронного документооборота автоматизация складского учёта становится необходимым условием функционирования торгового предприятия. Согласно отраслевым исследованиям, внедрение специализированных систем позволяет сократить издержки на 31%, повысить скорость складских операций на 42% и минимизировать ошибки учёта на 40–60% [9]. Применение веб-технологий обеспечивает доступность и оперативность внедрения, что делает подобные решения перспективным инструментом для малого и среднего бизнеса.

Список использованных источников:

1. Retail Inventory Crisis Persists Despite $172 Billion in Improvements [Электронный ресурс] / IHL Group. – 2025. – Режим доступа: https://www.ihlservices.com/news/analyst-corner/2025/09/retail-inventory-crisis-persists-despite-172-billion-in-improvements/.

2. Benchmark study: Excess inventory levels tick up among SMBs [Электронный ресурс] / Supply Chain 24/7. – 2024. – Режим доступа: https://www.supplychain247.com/article/benchmark_study_excess_inventory_levels_rise_among_smbs.

3. Retail Shrinkage: Data Reports 2026 [Электронный ресурс] / WifiTalents. – Режим доступа: https://wifitalents.com/retail-shrinkage-statistics/.

4. Почти 35 тыс. субъектов хозяйствования в Беларуси используют электронные накладные [Электронный ресурс] / БЕЛТА. – 2025. – Режим доступа: https://belta.by/economics/view/pochti-35-tys-subjektov-hozjajstvovanija-v-belarusi-ispolzujut-elektronnye-nakladnye-751237-2025/.

5. Цифровизация в Беларуси: как движется процесс перехода компаний на ЭДО [Электронный ресурс] / ЭДиН. – Режим доступа: https://edn.by/blog/cifrovizaciyavbelarusi/.

6. Переходный период: электронные накладные нового формата в ЭДО [Электронный ресурс] / EDI Bidmart. – Режим доступа: https://edi.bidmart.by/news/20.

7. Прослеживаемость и маркировка товаров с 01.10.2025 в Беларуси [Электронный ресурс] / EDI Bidmart. – Режим доступа: https://edi.bidmart.by/news/116.

8. Dosunmu, A. A Comparative Study of Data Visualisation Techniques for Effective Decision-Making in Business Intelligence / A. Dosunmu // Path of Science. – 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pathofscience.org/index.php/ps/article/view/3681.

9. Как автоматизация управления запасами помогает малому бизнесу [Электронный ресурс] / PRODELO. – Режим доступа: https://prodelo.by/kak-avtomatizacziya-upravleniya-zapasami-pomogaet-malomu-biznesu/.

РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРООБУЧЕНИЯ И МОДУЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ МАТЕРИАЛОВ

Устинович М.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Петровская В.В. – старший преподаватель

Современное образование характеризуется ростом спроса на гибридные форматы обучения и необходимостью обеспечения технической доступности образовательных ресурсов с различных устройств. В данной работе обосновывается применение принципов микрообучения и модульной организации контента для снижения когнитивной нагрузки учащихся.

Согласно исследованию, проведенному в Республике Беларусь среди старшеклассников и студентов, которые являются основной аудиторией образовательных платформ, 98,1% обучающихся владеют смартфонами [1]. В разрабатываемом приложении клиентская часть использует язык программирования Dart и фреймворк Flutter, что обеспечивает одинаковый пользовательский опыт на всех платформах, благодаря кроссплатформенности.

Для разработки серверной части приложения применяется язык программирования Kotlin и Spring Framework. Kotlin был выбран, поскольку он обладает лаконичным синтаксисом и поддерживает null-restricted типы данных, что снижает число возникающих ошибок и упрощает отладку приложения. Spring Framework включает в себя все необходимые инструменты для разработки облачных приложений.

Микрообучение представляет собой концепцию изучения какого-либо материала небольшими единицами, применяемую для приобретения профессиональных навыков [2]. Такой подход снижает когнитивную нагрузку на учащихся, способствует лучшему восприятию и запоминанию информации. Для реализации принципов микрообучения в приложении применяется модульная структура курсов. Пример модульного способа организации курса представлен на рисунке 1: курс состоит из секций, разделенных по общей тематике, в секции входят различные типы материалов (голубые – теоретические материалы, зеленые – практические материалы, оранжевые – тестовые материалы).

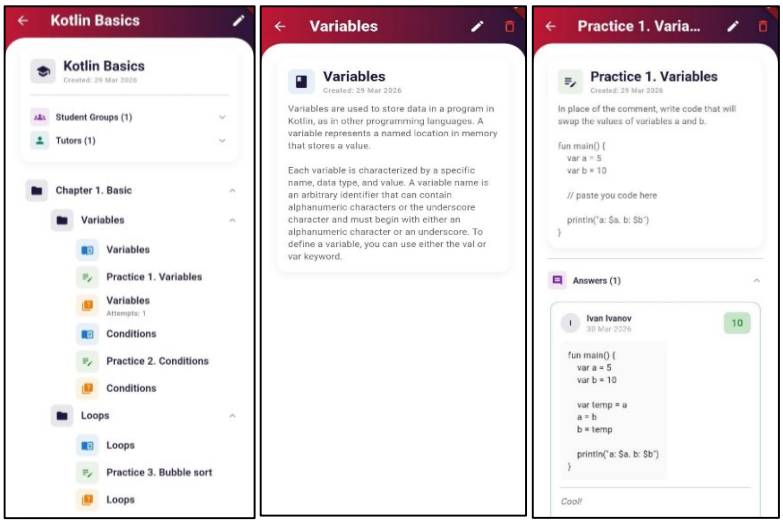


Рисунок 1 – Пример модульной организации курса

В разрабатываемом приложении можно выделить ряд преимуществ, относительно аналогов. К примеру: низкая сложность в освоении приложения, как для студентов, так и для преподавателей, единый пользовательский опыт на всех платформах, поддерживающих клиентское приложение.

Список использованных источников:

1. Бакун, А. В. Влияние использования мобильных устройств на образовательный процесс / А. В. Бакун, С. Н. Нестеренков, А. В. Царик // Информационные технологии и системы 2024 (ИТС 2024) : материалы международной научной конференции, Минск, 20 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 151–152. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/43358.

2. Монахова, Г. А. Микрообучение как центральная концепция электронного обучения / Г. А. Монахова, Д. Н. Монахов, Г. Б. Прончев // Информационные технологии в образовании. – 2020. – № 2. – С. 12–19. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/mikroobuchenie-kak-tsentralnaya-kontseptsiya-elektronnogo-obucheniya.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФИНАНСОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И СОЦИАЛЬНОЙ КООРДИНАЦИИ НА БАЗЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КАТАЛОГИЗАЦИИ ПЛАНИРУЕМЫХ ПОКУПОК

Хомельянская К.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Смолякова О.Г. – канд. техн. наук, доцент

Современный этап развития электронной коммерции сопровождается значительным увеличением объема потребляемой информации и разнообразия предлагаемых товаров. В этих условиях процессы личного финансового планирования и целевого накопления средств требуют применения специализированных информационных технологий. Систематизация личных потребностей играет ключевую роль в формировании культуры осознанного потребления и снижении количества импульсивных трат.

Создание централизованных систем каталогизации планируемых покупок или желаний является актуальной задачей не только для индивидуального финансового учета, но и для социальной координации. Традиционные методы фиксации планов на покупки (текстовые заметки, закладки в браузерах) обладают рядом критических недостатков: они не поддерживают методы приоритизации и не позволяют эффективно координировать действия группы лиц (например, при организации праздников и выборе подарков). Как следствие, возникает проблема нерационального расходования средств из-за приобретения дублирующихся или нежелательных товаров.

Задачу минимизации временных затрат пользователей на организацию предстоящих покупок решает ПО, которое представляет собой единую информационную среду для агрегации ссылок на товары, их финансовой оценки и безопасного предоставления доступа третьим лицам.

Одним из ключевых преимуществ системы является внедрение строгой методологии приоритизации желаний. Попытки расставить приоритеты без предварительной систематизации приводят к перегрузке рабочей памяти и когнитивному искажению, при котором человек реагирует на самые «срочные» стимулы, игнорируя стратегически важные [1]. Таким образом, качественная приоритизация задач в проектируемом веб-сервисе является важным условием для их последующей объективной оценки, а также, в контексте планирования покупок, предостерегает человека от «импульсивных решений».

Пользователю предоставляется возможность ранжировать добавляемые элементы по степени их субъективной значимости и необходимости. В качестве системы расстановки приоритетов был выбран выбран метод MoSCoW, который определяет четыре категории задач: Must-have (критически важные), Should-have (желательные), Could-have (допустимые) и Won't-have (отложенные) [2]. Пример визуального распределения желаний по методу MoSCoW проиллюстрирован на рисунке 1.

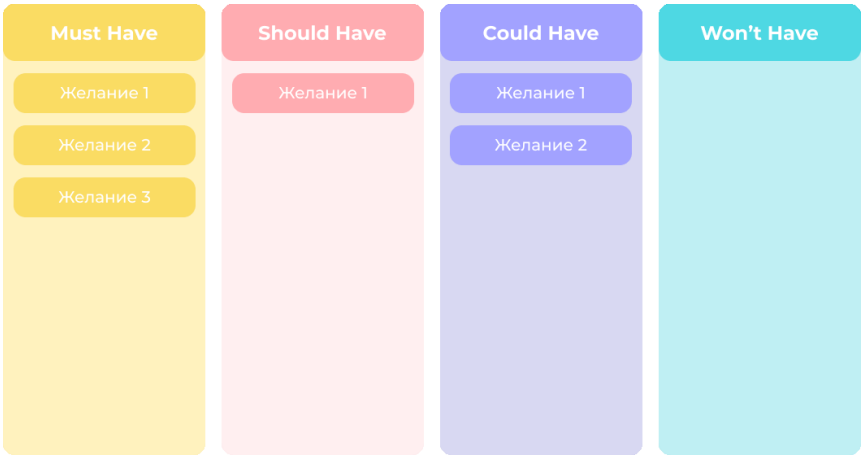


Рисунок 1 – Пример визуального распределения желаний по методу MoSCoW

Ключевым преимуществом данного подхода является его междисциплинарная универсальность. В рамках разрабатываемой системы алгоритм метода успешно транслируется на процесс управления личными финансами. Визуальное разделение планируемых покупок по категориям позволяет пользователю легко отделять критически важные траты от второстепенных, обеспечивая структурированный и осознанный подход к распределению бюджета.

Анализ пользовательского опыта существующих на рынке решений выявил существенную проблему: высокий барьер входа (необходимость регистрации) для сторонних пользователей. Исследования показывают, что пользователи склонны избегать лишних действий и когнитивной нагрузки. Когда интерфейс требует слишком много действий или обработки информации, пользователи перегружаются, совершают ошибки или вовсе отказываются от выполнения задачи [3]. Для решения этой проблемы в разрабатываемом приложении была спроектирована модель взаимодействия с неавторизованным пользователем: система предоставляет полноценный функционал просмотра и бронирования подарков на основе автоматически генерируемых гостевых сессий. Диаграмма вариантов использования ПО неавторизованным пользователем (гостем) представлена на рисунке 2.

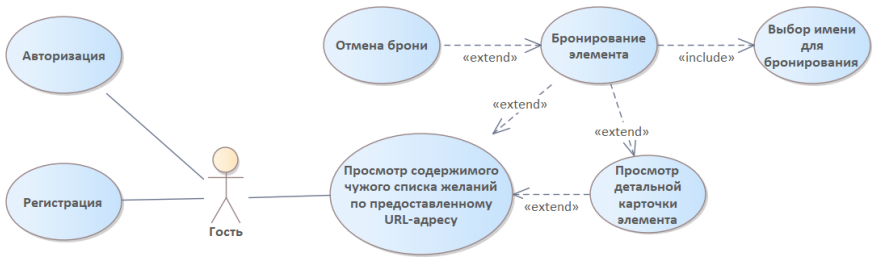


Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования ПО гостем

Особое внимание при разработке было уделено алгоритмам разрешения конфликтов и защите приватности. В системе реализован механизм маскировки данных: если владелец списка установит соответствующую настройку в профиле пользователя, он не будет иметь доступа к информации о статусах бронирования своих желаний до наступления заданной даты события. В случае отключения данной настройки пользователь получает возможность просматривать статусы бронирования своих желаний, а также управлять ими, включая отмену нежелательных бронирований своих товаров.

Дополнительным преимуществом разработанного решения является внедрение комплексного модуля аналитики. Платформа агрегирует данные о добавленных элементах списка, предоставляя пользователю наглядную статистику. Данная статистика будет полезна как для личного финансового планирования, так и для третьих лиц при выборе подарка в подходящем ценовом диапазоне. Пример формируемых аналитических графиков представлен на рисунке 3.

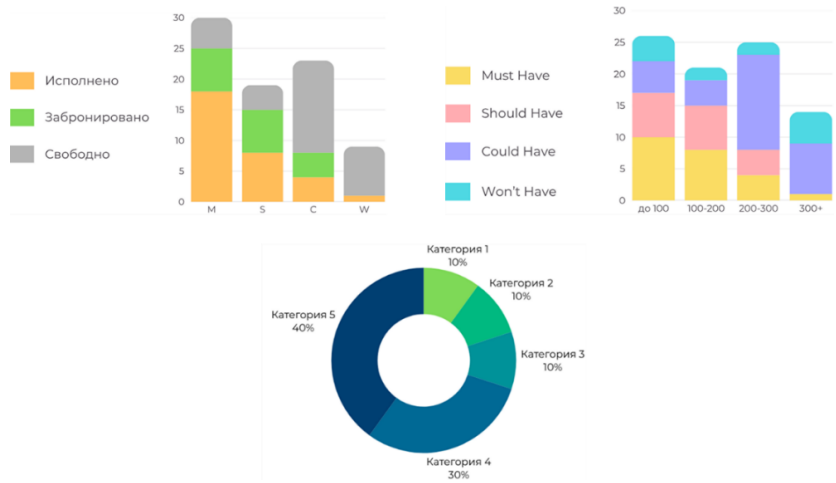


Рисунок 3 – Пример формируемых аналитических графиков

Таким образом, разработка и внедрение подобных информационных систем способствует повышению финансовой грамотности пользователей и оптимизации их временных затрат. Применение методов приоритизации, снижение барьера входа для новых пользователей и возможность просмотра аналитики делают разработанное приложение эффективным инструментом как для планирования личного бюджета, так и для социальной координации.

Список использованных источников:

1. Дорофеев М. Как воспитать свою обезьяну, опустошить инбокс и сберечь мыслетопливо / М. Дорофеев. – Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 288 с.

2. Метод MoSCoW – что это, как применять для приоритизации задач. – URL: https://kaiten.ru/blog/metod-prioritizacii-moscow/ (дата обращения 20.03.2026).

3. Minimize Cognitive Load to Maximize Usability. – URL: https://www.nngroup.com/articles/minimize-cognitive-load/ (дата обращения 20.03.2026).

ИМИТАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИХ ПОЛЕТЕ В ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Януцевич Д.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Кулага В.В. – канд. техн. наук, доцент

В работе рассматриваются теоретические аспекты и практическая реализация алгоритмов цифрового синтеза акустических сигнатур беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с двигателями внутреннего сгорания. Проанализированы физические механизмы формирования тонального и вихревого шумов винта, а также шума выхлопной системы. Описаны методы учета частотно-зависимого поглощения звука атмосферой и имитации динамики полета с использованием линий задержки. Обоснована применимость разработанных моделей для верификации алгоритмов пеленгации в условиях полунатурного эксперимента.

Разработка и отладка алгоритмов акустической локации для обнаружения БПЛА требует проведения масштабных испытаний для оценки вычислительной нагрузки и точности распознавания в реальном времени. Организация натурных полетных экспериментов сопряжена с высокой стоимостью эксплуатации БПЛА, зависимостью от метеоусловий и отсутствием повторяемости условий, необходимой для качественной оценки изменений в алгоритмах. В данной связи актуальной задачей является создание специализированного программного обеспечения для имитации акустических возмущений, позволяющего заменить дорогостоящие вылеты воспроизводимыми тестами в лабораторных условиях [1].

Природа акустического шума БПЛА. Акустический шум, генерируемый БПЛА, представляет собой сложный нестационарный процесс. Шум воздушного винта является суперпозицией дискретных низкочастотных гармоник и сплошного широкополосного спектра. Выделяют три основные составляющие: шум вытеснения, обусловленный геометрией профиля лопасти; шум нагружения, возникающий вследствие передачи аэродинамических сил среде; и вихревой шум, образующийся из-за срыва потока с задней кромки и концов лопастей.

Спектр шума вращения имеет выраженную гармоническую структуру, где дискретные частоты f_m кратны «лопастной частоте» [2]:

$$f_m = mN\Omega, \tag{1}$$

где m – номер гармоники, N – число лопастей, Ω – частота вращения винта в секунду.

Для моделирования тонального шума предлагается использовать методику, основанную на аппроксимации экспериментальных кривых затухания гармоник. Данный подход позволяет синтезировать акустическую подпись без избыточных вычислительных затрат на обсчет аэродинамики каждой точки лопасти. Тембральная окраска сигнала формируется согласно экспоненциальному закону затухания последующих гармоник [3]:

$$H_N = 26 \cdot e^{-(-0.7 \cdot M_t + 0.79) \cdot \mathrm{N}} - 22, \tag{2}$$

где M_t – число Маха конца лопасти, N – номер гармоники.

Акустическая сигнатура ДВС формируется совокупностью периодических импульсов давления выхлопа и шума всасывания воздуха [4]. Для формирования достоверного сигнала проектируется процедура, управляемая фазовым инкрементом, привязанным к оборотам двигателя. Базовая частота выхлопов рассчитывается по формуле [5]:

$$f_{vh} = \frac{2 \cdot f_{kv} \cdot N_{cl}}{I}, \tag{3}$$

где I – число тактов, N_{cl} – число цилиндров, f_{kv} – число оборотов коленчатого вала.

Обеспечение аутентичности спектрально-временной структуры звука ДВС достигается путем введения асимметрии фаз зажигания в разных цилиндрах, что позволяет имитировать звук колебательного характера на низких оборотах и специфическое «рычащее» звучание на высоких [4].

Распространение звука в пространстве. Процесс распространения акустических возмущений от БПЛА к системе обнаружения сопровождается изменением энергетических, спектральных и временных характеристик сигнала. Для достоверной имитации полета в программном обеспечении необходимо учитывать два ключевых фактора: затухание и временные задержки.

Затухание из-за геометрической дивергенции рассчитывается по формуле [6]:

$$A_{div} = 20 \cdot \log_{10} \frac{d}{d_0} + 11, \quad (4)$$

где d – расстояние от источника шума до приемника (в метрах), d_0 – опорное расстояние ($d_0 = 1$ м).

Коэффициент атмосферного поглощения рассчитывается по формуле [7]:

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_N + \alpha_O, \quad (5)$$

где α_{cl} – коэффициент затухания вследствие звукопоглощения в процессах переноса с позиций «классической» физики, α_N – коэффициент затухания вследствие молекулярного поглощения при колебательной релаксации азота, α_O – коэффициент затухания вследствие молекулярного поглощения при колебательной релаксации кислорода.

Динамическое изменение расстояния до микрофонов при движении БПЛА вызывает сдвиг частоты. Для обеспечения плавности фазовых характеристик в условиях дискретной временной сетки применяется дробная задержка, реализуемая с помощью линейной интерполяции между соседними отсчетами буфера [8].

Предлагаемый подход реализует концепцию полунатурного моделирования, объединяя имитацию внешней среды и аппаратные компоненты системы обнаружения. Применение физически обоснованных моделей при синтезе акустических сигналов направлено на достижение необходимой степени приближения к реальным условиям эксплуатации. Это позволяет проводить верификацию акустических локационных систем в широком диапазоне сценариев и снижает потребность в проведении дорогостоящих натурных испытаний на ранних этапах проектирования.

Список использованных источников:

1. Повышение технических характеристик комплекса обнаружения беспилотных летательных аппаратов по акустическому шуму их авиационных систем (промежуточный) : отчет о НИР / УО «Военная академия Республики Беларусь» ; рук. А. А. Свириденко. – Минск, 2025. – 44 с.

2. Физика шумов и вибраций. Акустическая экология [Электронный ресурс] : учебные материалы курса / Кафедра акустики физического факультета МГУ. – Режим доступа: https://acoustics.phys.msu.ru/courses/noise-and-vibrations.

3. Selfridge, R. Physically derived sound synthesis model of a propeller / R. Selfridge, D. Moffat, J. D. Reiss // AM '17 : Proceedings of the 12th International Audio Mostly Conference. – London : ACM, 2017. – P. 16:1–16:8.

4. Baldan, S. Physically informed car engine sound synthesis for virtual and augmented environments / S. Baldan [et al.] // Proceedings of the IEEE 2nd VR Workshop on SIVE. – Arles : IEEE, 2015. – P. 1–6.

5. Разработка облика комплекса обнаружения беспилотных летательных аппаратов по акустическому шуму их авиационных систем (заключительный) : отчет о НИР / УО «Военная академия Республики Беларусь» ; рук. А. А. Свириденко. – Минск, 2025. – 87 с.

6. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета : ГОСТ 31295.2–2005 (ИСО 9613-2:1996). – Минск : БелГИСС, 2006. – 32 с.

7. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 1. Расчет поглощения звука атмосферой : ГОСТ 31295.1–2005 (ИСО 9613-1:1993). – Минск : БелГИСС, 2006. – 28 с.

8. Laakso, T. I. Splitting the unit delay : [FIR/all pass filters design] / T. I. Laakso, V. Välimäki, M. Karjalainen, U. K. Laine // IEEE Signal Processing Magazine. – 1996. – Vol. 13, № 1. – P. 30–60.

СЕКЦИЯ 3
«ИНФОРМАТИКА»

УДК 004.8:004.7

ИНТЕГРАЦИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АРХИТЕКТУРУ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Славинский Г.А., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Боброва Н.Л. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В данной статье описываются вычислительные уровни современной архитектуры IoT с поддержкой машинного обучения: Cloud, Fog, Edge. Рассматриваются архитектурные паттерны интеграции на примере MLOps-ориентированной архитектуры и основные стратегии федеративного обучения. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании отказоустойчивых и масштабируемых интеллектуальных IoT-систем.

Ключевые слова. Машинное обучение, Интернет вещей, MLOps, федеративное обучение.

Введение. Концепция Интернет вещей (IoT) предполагает сеть физических объектов, оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия между собой и внешней средой. На практике IoT представляют собой сложную многоуровневую структуру, объединяющую физические устройства, сети передачи данных и интеллектуальные платформы обработки информации [1].

В отличие от простых систем сбора и хранения данных, интеллектуальные IoT-платформы обеспечивают анализ, прогнозирование и принятие решений в реальном времени, что позволяет автоматизировать различные бизнес-процессы. Инфраструктура подразумевает как персональные устройства, так и инструменты производственного процесса.

Актуальность тематики обусловлена стремительным развитием технологий искусственного интеллекта, включая направление машинного обучения (ML), и прогнозируемым ростом количества подключенных устройств, которое достигнет 39 миллиардов к 2030 году [2].

Современные ML-архитектуры IoT строятся вокруг трех ключевых уровней обработки: облака (Cloud), промежуточного туманного уровня (Fog) и периферии (Edge). Понимание каждого из этих уровней определяет способность спроектировать отказоустойчивую систему [3].

Цель исследования — определить принципы построения масштабируемых и отказоустойчивых ML-архитектур в экосистемах Интернета вещей на основе трехуровневой модели Cloud-Fog-Edge.

Облачный уровень. Данный уровень является центральным компонентом ML-архитектуры в IoT для стратегических задач и отвечает за хранение, обработку и анализ больших объемов данных. Инфраструктура включает высокопроизводительные дата-центры, оснащенные графическими и тензорными ускорителями, большими объемами оперативной памяти и специализированными программными средствами для обучения моделей высокой сложности.

В облаке выполняются наиболее ресурсоемкие задачи: обучение глубоких нейронных сетей, переобучение моделей, хранение метаданных и исторических данных. Оркестрация ML-пайплайнов осуществляется с помощью таких инструментов, как Kubeflow и Apache Airflow.

Преимущество облачного уровня заключается в возможности обслуживания множества устройств, обработке больших массивов данных, поддержке разнообразных типов данных и моделей, а также в создании единого пространства для управления, анализа, принятия решений.

Вместе с тем существуют и ограничения. Передача данных в облако может сопровождаться задержками, что не подходит для приложений критически важной инфраструктуры. Требуется стабильное интернет-соединение. Также для облачного уровня важны механизмы защиты данных — шифрование, управление доступом, а также защита от компрометации.

Облачный уровень оптимален для обучения и обновления моделей, долгосрочной аналитики и выполнения задач, допускающих задержки при передаче данных по сети.

Периферийный уровень. Инфраструктура Edge включает устройства, непосредственно взаимодействующие с физической средой, что подразумевает как датчики, микроконтроллеры, так и одноплатные компьютеры, промышленные контроллеры. Главная особенность уровня — обработка данных непосредственно в месте их генерации [3]. Такой подход обеспечивает минимальную задержку, высокую автономность и устойчивость к сбоям сети.

Данный уровень ориентирован на выполнение критически важных задач машинного обучения в реальном времени: фильтрацию телеметрии, обнаружение аномалий и событий, а также принятие решений без обращения к облаку. Из-за ограниченных вычислительных и энергетических ресурсов на периферии используются специально оптимизированные модели.

Обучение на уровне Edge возможно в виде адаптации обученных моделей или участия в федеративном обучении. Данная инфраструктура важна для систем, где задержки недопустимы, таких как робототехника и автономный транспорт.

Ключевые характеристики периферийного уровня — низкая латентность, строгие ограничения по энергопотреблению и памяти.

Для работы в условиях строгих ограничений применяется парадигма TinyML, позволяющая запускать модели непосредственно на микроконтроллерах и во встраиваемых системах [4]. Реализация данного подхода стала возможной благодаря развитию специализированных фреймворков, аппаратных ускорителей и методов оптимизации моделей.

Промежуточный уровень. Fog-уровень представляет собой способ организации и координации множества Edge-узлов в рамках локальной сети. Его задача — объединить локальные ресурсы в единую сеть для быстрой обработки данных без обращения к удаленным дата-центрам [5].

Ключевое отличие Fog от Edge заключается в масштабе и роли. Если Edge-устройства отвечают за непосредственное взаимодействие со средой и первичную обработку данных, то Fog-уровень обеспечивает координацию множества Edge-узлов, реализует логику маршрутизации потоков данных и поддерживает работу распределенных приложений в пределах одного объекта.

На данном уровне осуществляется агрегация данных от множества периферийных узлов, выполняются модели средней сложности, производится предварительная обработка, фильтрация и кэширование данных. Поддержка контейнерной оркестрации позволяет развертывать на Fog-узлах сложные сервисы и поддерживать их отказоустойчивость. Таким образом, Fog-уровень выступает в роли локальной системы принятия решений, обеспечивая баланс между вычислительными ресурсами и оперативностью.

Такой подход позволяет снизить нагрузку на каналы связи за счет отправки в облако только полезной информации, подключать новые устройства к ближайшему узлу без перегрузки центрального сервера и координировать работу множества устройств при отсутствии связи с облаком. Однако это также усложняет архитектуру, не исключает проблем совместимости оборудования разных производителей, создает потенциальные точки входа для злоумышленников, и требует затрат на установку и обслуживание физического оборудования.

Данный уровень применим в сценариях, где Edge-устройства слишком ограничены для формирования целостной картины состояния системы, а прямое взаимодействие с облаком невозможно из-за жестких требований к задержке или нестабильности каналов связи.

Архитектурные паттерны интеграции. Для построения масштабируемых и надежных IoT-платформ используются различные архитектурные подходы, которые определяют, как компоненты системы взаимодействуют друг с другом.

Управление жизненным циклом моделей в крупных экосистемах обеспечивает MLOps-ориентированная архитектура [6]. Она автоматизирует развертывание, мониторинг качества, переобучение и доставку обновлений на множество устройств.

Расширением централизованной облачной модели является архитектура Edge MLOps, которая частично переносит некоторые возможности облачного MLOps на периферийные устройства.

Для ее реализации критически важны: стандартизация форматов моделей, поддержка OTA-обновлений, контроль данных. Такой подход обеспечивает высокую надежность и устойчивость, что критически важно для крупных распределенных IoT-систем, работающих в реальном времени.

Федеративное обучение. Интеграция машинного обучения в архитектуру Интернета вещей — это непрерывный процесс, называемый жизненным циклом ML-модели. В контексте IoT этот цикл имеет свою специфику, обусловленную ограниченными ресурсами периферийных устройств и необходимостью постоянной адаптации к изменяющимся условиям. Актуальным методом обучение является федеративное обучение.

Федеративное обучение является частным случаем распределенного машинного обучения, но его основной акцент смещен с производительности на сохранение приватности и децентрализацию данных. Его ключевая особенность заключается в том, что исходные данные не покидают клиентские устройства [7]. Вместо этого устройства обучают модель на локальных данных и передают на центральный сервер или Fog-узел только обновления весов для формирования глобальной модели. Такой подход значительно снижает сетевую нагрузку и минимизирует риск при передаче данных.

В рамках федеративного обучения применяются различные стратегии агрегации, наиболее распространенными из которых являются усреднение локальных обновлений весов (FedAvg) и метод FedProx, обеспечивающий устойчивость при работе с разнородными данными и устройствами. Выбор алгоритма определяется характером данных, распределением вычислительных мощностей и требованиями к стабильности обучения.

Заключение. В совокупности уровни Cloud, Fog и Edge формируют согласованную архитектуру, в которой каждый компонент выполняет строго определенную роль и дополняет остальные. Облачный уровень обеспечивает вычислительную мощность и централизованное управление жизненным циклом систем. Fog-уровень выступает связующим звеном, реализуя горизонтальную оркестрацию, распределенную аналитику и координацию множества Edge-узлов в пределах локальной инфраструктуры. Edge-уровень обеспечивает мгновенный отклик, автономную работу и выполнение вычислений на устройствах. Такое разделение позволяет эффективно использовать ресурсы, обеспечивать конфиденциальность данных и поддерживать устойчивость IoT-систем в условиях динамичных и потенциально нестабильных сред.

Интеграция MLOps-подходов позволяет поддерживать согласованность моделей, автоматизировать обновления и обеспечивать устойчивость работы. Федеративное обучение предоставляет механизмы для непрерывного совершенствования моделей с сохранением конфиденциальности данных. Использование отдельных стратегий обучения позволяет адаптироваться к различиям в данных и вычислительных возможностях устройств.

Такое сочетание многоуровневой архитектуры, распределенного управления моделями и приватных методов обучения формирует основу для создания масштабируемых интеллектуальных IoT-систем, способных адаптироваться к динамичным условиям и обеспечивать высокую автономность.

Список использованных источников:

1. Папуловская Н. В. Основы интернета вещей : учебно-методическое пособие / Н. В. Папуловская — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. — 104 с.

2. State of IoT 2025: Number of connected IoT devices growing 14% to 21.1 billion globally [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices – Дата доступа: 27.03.2026.

3. Kalyashina, A., Smirnov, Y., Esov, V., Kuznetsov, M., & Dmitrieva, O. (2024). Enhancing IoT systems through Cloud-Fog-Edge architectures: challenges and opportunities. E3S Web of Conferences, 583, 06012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458306012

4. Kallimani R., Pai K., Raghuwanshi P., Iyer S., López O. L. A. TinyML: Tools, Applications, Challenges, and Future Research Directions [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/2303.13569 – Дата доступа: 27.03.2026

5. Gupta H., Bharti A. K. Fog Computing & IoT: Overview, Architecture and Applications // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2018. Vol. 7 (5). P. 30—33

6. Kreuzberger D., Kühl N., Hirschl S. Machine Learning Operations (MLOps): Overview, Definition, and Architecture [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/2205.02302 – Дата доступа: 27.03.2026

7. Li T., Sahu A. K., Talwalkar A., Smith V. Federated Learning: Challenges, Methods, and Future Directions // IEEE Signal Processing Magazine. 2020. Vol. 37, No. 3. P. 50–60.

UDC 004.8:004.7

THE INTEGRATION OF MACHINE LEARNING INTO IOT ARCHITECTURE

Slavinsky G.A., master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Bobrova N.L. – PhD in Technical Sciences

Annotation. This article describes the computing layers of modern ML-enabled IoT architecture: **Cloud**, **Fog**, and **Edge**. It examines architectural integration patterns using an MLOps-oriented architecture as an example, along with key federated learning strategies. The research findings can be applied to the design of fault-tolerant and scalable intelligent IoT systems.

Keywords. Machine learning, Internet of things, Cloud, Fog, Edge, MLOps, federated learning.

УДК: 004.312

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ФНФ НА КОНФИГУРИРУЕМЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ОСЦИЛЛЯТОРАХ

Бурко Л.А., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Иванюк А.А. – д-р. техн. наук, профессор

Аннотация. В работе исследуется распределение значений физически неклонируемой функции на основе конфигурируемых кольцевых осцилляторов. Для проверки гипотезы о нормальности распределения использованы гистограммы, QQ-графики и статистические тесты Шапиро-Уилка, Д'Агостино-Пирсона, Жарка-Бера и Андерсона-Дарлинга (scipy.stats).

Ключевые слова. Физическая криптография, физически неклонируемые функции, конфигурируемый кольцевой осциллятор, генерация случайных данных, тесты на нормальность.

В современных цифровых системах случайные числа применяются повсеместно. Они играют ключевую роль в обеспечении безопасности, точности и надежности вычислительных процессов. Поэтому вопросы, связанные с эффективной генерацией случайных чисел, остаются актуальным предметом многих научных исследований. Помимо этого, находят применение в криптографии и нормально распределенные данные. Например, алгоритмы типа Kyber или Dilithium используют дискретное нормальное распределение для добавления «малого» шума к секретным данным. Это делает задачу нахождения закрытого ключа вычислительно неразрешимой, так как шум маскирует структуру решетки (решеточная криптография). Нормальное распределение можно также использовать для моделирования физических процессов в криптографии и в дифференциальном анализе, который используется при тестировании криптостойкости, когда необходимо смоделировать распределение ошибок или вероятностей при попытке взлома системы.

Физически неклонируемые функции (ФНФ), реализуемые на базе программируемых логических интегральных схем, находят широкое применение в задачах аппаратной безопасности и генерации случайных чисел благодаря сочетанию уникальных физических свойств и гибкости реконфигурируемой логики. Физически неклонируемая функция – это функция, которая использует физические особенности конкретного устройства для генерации уникального и неклонируемого ответа на основе запроса. Основой функционирования ФНФ являются неконтролируемые технологические вариации, возникающие в процессе изготовления интегральных схем и обусловленные физическими свойствами полупроводниковых элементов. Распространённым примером является ФНФ на кольцевых осцилляторах (КО ФНФ), в которой отклик формируется на основе сравнений частот нескольких идентичных кольцевых осцилляторов. Конфигурируемый кольцевой осциллятор (ККО) позволяет получать множество частотных состояний за счёт выбора различных внутренних конфигураций при фиксированном числе генераторов. Данная архитектура, описанная подробно в [1, 2], формирует многобитный ответ. На точность измерения периода сигнала ККО будет влиять ширина окна измерения (множитель периода сигнала системной частоты $k_{factor} = 2^i, i \in \mathbb{Z}$).

На рисунке 1 показана схема работы ФНФ. Пара, состоящая из входного параметра запроса (Challenge) и соответствующего ему выходного параметра ответа (Response), называется парой «запрос–ответ».

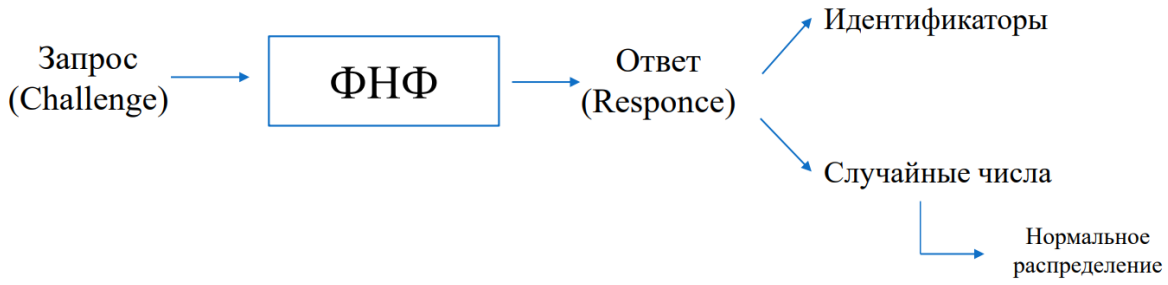


Рисунок 1 – Упрощенная схема ФНФ

Процесс эксперимента начинается с этапа описания архитектуры ФНФ и её аппаратной реализации в среде Vivado, где выполняются синтез, размещение, трассировка и формирование битового файла для программирования платы. Далее конфигурация загружается на отладочную платформу, где

осуществляется непосредственная аппаратная реализация ФНФ и генерация откликов. Параллельно в среде Xilinx Vitis разрабатывается программная часть, отвечающая за формирование запросов, управление режимами работы и передачу данных. Обмен информацией между платой и персональным компьютером осуществляется через терминальную программу TeraTerm, обеспечивающую чтение и запись данных по последовательному интерфейсу. Полученные значения ФНФ передаются в среду анализа на базе Python (Jupyter Notebook с использованием библиотек NumPy, pandas и matplotlib), где выполняется их статистическая обработка, оценка стабильности, уникальности и построение соответствующих графиков. Схема на рисунке 2 отражает полный цикл – от аппаратного проектирования ФНФ до программного анализа экспериментальных результатов.

Эксперимент проводился на плате быстрого прототипирования Digilent ZYBO-Z7 (кристалл Xilinx ZYNQ xc7z010-1).

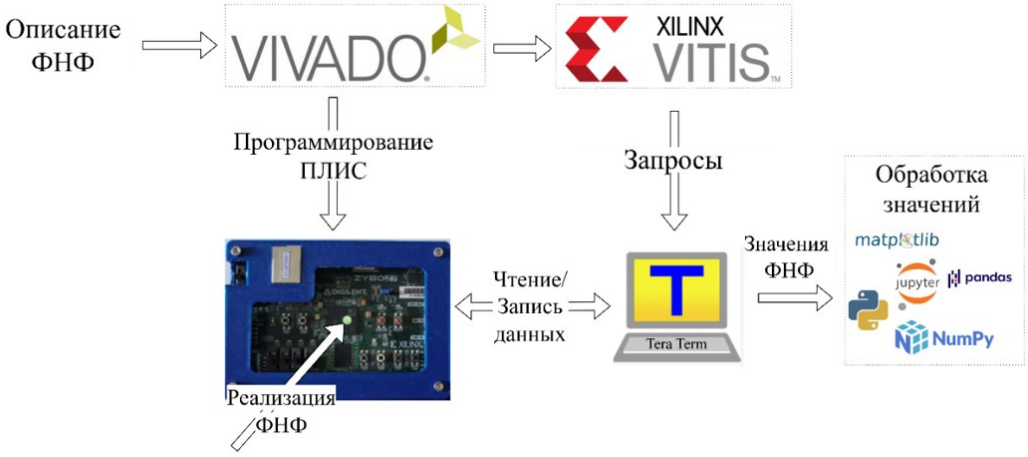


Рисунок 2 – Схема эксперимента

Был получен 31 набор данных с параметром $i \in [0; 30]$, каждый из которых содержит $M = 1000$ целочисленных значений.

При построении гистограмм распределения значений с ФНФ ККО, начиная с $i = 9$, наблюдается сходство с нормальным распределением. В работе [1] уже была показана высокая степень сходства поразрядных вероятностей данных ФНФ ККО с нормальным распределением, а также был определен оптимальный диапазон для окна измерения $i \in [9; 30]$. Также было показано, что разряды можно разделить на три группы: сильно стабильные (вероятность появления определенного бита 100%), сильно нестабильные (вероятность появления определенного бита 50%) и слабо стабильные (вероятность появление определенного бита от 50% до 100%).

Как видно на рисунке 3, дальнейшее исследование для $i<15$ нецелесообразно, поскольку уменьшение i приведёт лишь к ухудшению согласия с нормальным распределением из-за большей дискретности и возможной асимметрии, не давая при этом качественно новой информации о поведении выборки.

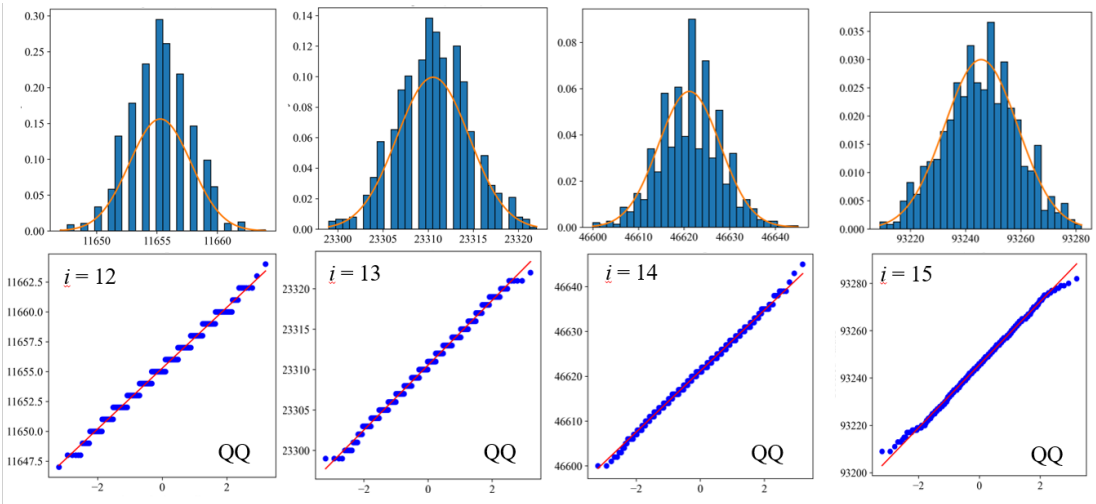


Рисунок 3 – QQ-тест и кривая нормального распределения для $i = \{12,13,14,15\}$

Целью данного исследования является анализ данных, полученных с ФНФ ККО, относительно нормального распределения для выбора наиболее подходящих *i* для дальнейших задач идентификации или генерации случайных чисел. Для этого был применён комплекс графических и статистических методов, позволяющих как качественно, так и количественно оценить степень соответствия экспериментальных данных нормальному распределению.

К графическим методам относятся гистограммы распределения и QQ-графики, примеры для *i* = {19, 23, 25, 26} показаны на рисунке 4. Гистограмма позволяет визуально оценить форму распределения и сравнить её с теоретической плотностью нормального распределения. Для этого на гистограмму накладывается соответствующая нормальная кривая, параметры (МО и СКО) которой оцениваются по выборке.

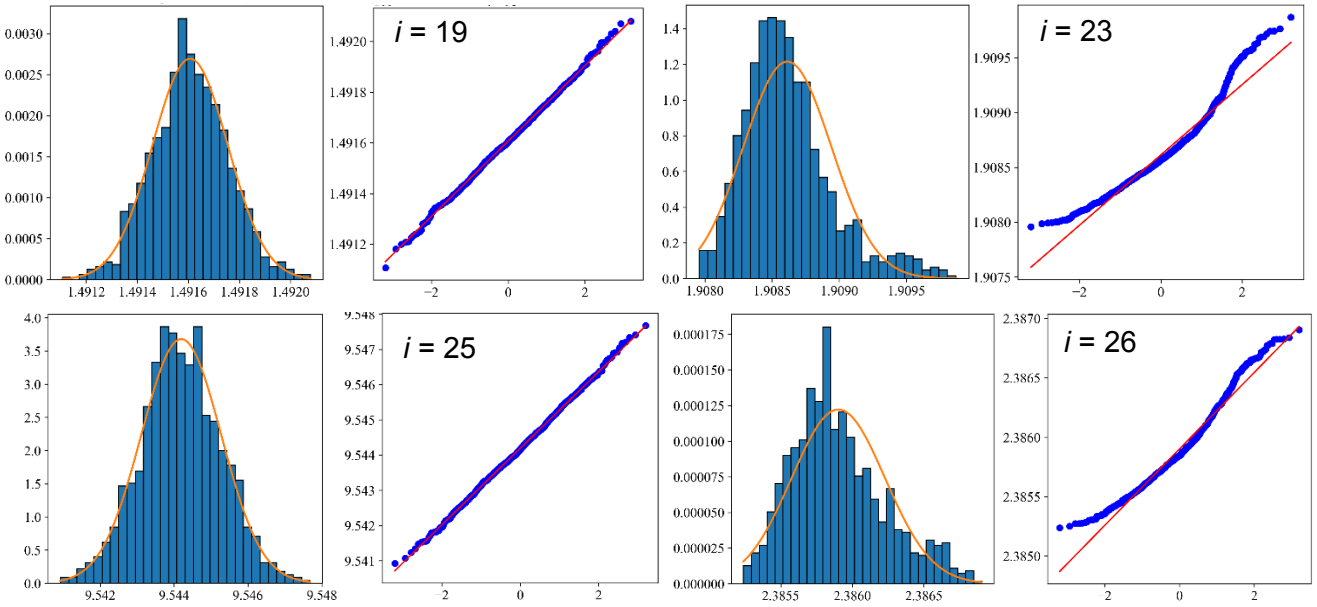


Рисунок 4 – QQ-тест и кривая нормального распределения для *i* = {19, 23, 25, 26}

Более информативным инструментом является QQ-график (quantile-quantile plot), на котором откладываются квантили экспериментальных данных относительно квантилей теоретического нормального распределения. В случае соответствия распределения нормальному закону точки на графике располагаются вдоль прямой линии. Отклонения от линейности свидетельствуют о несоответствии распределения нормальному закону, при этом характер отклонений позволяет выявить особенности распределения. Так, отклонения в центральной части указывают на изменение формы распределения, а отклонения на концах – на различия в поведении хвостов (наличие выбросов или тяжёлых хвостов).

На рисунке 4 QQ-график показывает хорошее совпадение в центральной части распределения, при этом наблюдаются отклонения в хвостах для *i* = 23 и *i* = 26, что свидетельствует о наличии более тяжёлых хвостов по сравнению с нормальным распределением. Это пример сильного отклонения от нормального распределения, в случаях *i* = 19 и *i* = 25 не наблюдается отклонений в хвостах.

Для количественной проверки гипотезы нормальности было использовано несколько статистических критериев: тест Шапиро-Уилка (stats.shapiro), тест Д'Агостино-Пирсона (stats.normaltest), критерий Жарка-Бера (stats.jarque_bera) и критерий Андерсона-Дарлинга (stats.anderson). Применение нескольких тестов обусловлено различной чувствительностью каждого из них к отдельным характеристикам распределения.

Тест Шапиро-Уилка является одним из наиболее мощных критериев проверки нормальности, особенно для выборок малого и среднего размера. Он основан на сравнении упорядоченных значений выборки с ожидаемыми значениями нормального распределения. В качестве результата вычисляется статистика теста и значение p-value. Если p-value превышает заданный уровень значимости (обычно 0,05), то нет оснований отвергать гипотезу нормальности.

Тест Д'Агостино-Пирсона основан на анализе двух характеристик распределения: асимметрии и эксцесса. Он объединяет их в единую статистику, позволяющую оценить отклонение распределения от нормального. Тест чувствителен к асимметрии распределения и отклонениям в форме хвостов. Интерпретация результата аналогична тесту Шапиро-Уилка и осуществляется по значению p-value.

Критерий Жарка-Бера также основан на анализе асимметрии и эксцесса распределения. Нулевая гипотеза заключается в том, что асимметрия равна нулю и эксцесс соответствует

нормальному распределению. Отклонение хотя бы одной из этих характеристик приводит к отклонению гипотезы нормальности.

Критерий Андерсона-Дарлинга является модификацией критерия согласия, обладающей повышенной чувствительностью к отклонениям в хвостах распределения. В отличие от предыдущих тестов, он не использует p-value, а сравнивает вычисленную статистику с критическими значениями. В рамках проведённого исследования использовались стандартные уровни значимости (15%, 10%, 5%, 2,5% и 1%). Полученные значения статистики критерия интерпретировались следующим образом: значения менее 0,5 свидетельствуют о высокой степени согласия эмпирического распределения с нормальным законом; диапазон 0,5-0,8 также рассматривается как допустимый и не указывает на существенные отклонения. При увеличении значения статистики наблюдается рост степени расхождения распределения с нормальным, что указывает на ухудшение соответствия рассматриваемой модели.

Как показано в таблице 1, для i = {15, 17, 18, 19, 21, 25} все применённые статистические тесты дают высокие значения p-value, что не позволяет отвергнуть гипотезу нормальности. Значения статистики критерия Андерсона–Дарлинга находятся в низком диапазоне, что указывает на хорошее соответствие нормальному закону. Для i = 16 и i = 20 всего лишь один из применённых статистических критериев не выявляет отклонений от нормального распределения. В остальных случаях наблюдаются статистически значимые отклонения от нормальности. Например, при i = 29 значения p-value остаются ненулевыми, но ниже порога 0,05, что также свидетельствует об отклонении.

Тем не менее, как было показано в предыдущих исследованиях [1, 2], применение дополнительных преобразований позволяет получить необходимые характеристики для задач идентификации или генерации случайных чисел.

Таблица 1 – Статистические тесты для $i \in [15; 30]$.

i	Шапиро-Уилка	Д'Агостино-Пирсона	Жарка-Бера	Андерсона- Дарлинга
15	**0,06783**	**0,11026**	**0,17046**	**0,51364**
16	0,04606	0,02944	**0,05439**	0,97937
17	**0,17797**	**0,22958**	**0,27464**	**0,42452**
18	**0,19346**	**0,30956**	**0,33125**	**0,26324**
19	**0,88472**	**0,76686**	**0,80928**	**0,24794**
20	0,01884	0,00458	0,00440	**0,65561**
21	**0,21644**	**0,19082**	**0,20286**	**0,21787**
22	0,00010	0,00049	0,00040	1,80514
23	0,00000	0,00000	0,00000	8,88308
24	0,00032	0,00123	0,00117	1,51951
25	**0,91052**	**0,85152**	**0,84501**	**0,26550**
26	0,00000	0,00000	0,00000	12,96655
27	0,00000	0,00004	0,00009	4,74584
28	0,00000	0,00000	0,00000	3,16967
29	0,00141	0,01610	0,01427	1,84256
30	0,00002	0,00395	0,00496	3,00161

В рамках данной работы было проведено комплексное статистическое исследование данных, полученных с физически неклонируемой функции на основе конфигурируемых кольцевых осцилляторов. Основной целью являлась проверка гипотезы о нормальности распределения значений ФНФ при различных параметрах окна измерения i, а также определение диапазона параметров, наиболее подходящих для практического применения в задачах идентификации и генерации случайных чисел.

Проведённый анализ включал как графические методы (гистограммы и QQ-графики), так и количественные критерии (тесты Шапиро-Уилка, Д'Агостино-Пирсона, Жарка-Бера и Андерсона-Дарлинга). Это позволило получить всестороннюю оценку распределений, учитывающую как форму, так и статистические характеристики выборок. Показано, что при малых значениях параметра i наблюдаются существенные отклонения от нормального распределения, обусловленные дискретностью данных и влиянием аппаратных особенностей измерений. Некоторые конфигурации удовлетворяют статистическим характеристикам нормального распределения, и в них группа слабо нестабильных бит меньше, чем в тех, где распределение не соответствует нормальному. Таким образом, ряд приведенных проверок позволяет выбрать необходимое i в зависимости от требуемой задачи.

Список использованных источников:

1. Иванюк, А.А. Генерирование детерминированных идентификаторов и случайных чисел на основе схемы конфигурируемого кольцевого осциллятора / А.А. Иванюк, Л.А. Бурко // Информатика. 2025, 22(4). – С.65-81. https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-4-65-81

2. Ivaniuk, A. Unclonable Identification and True Random Number Generation Based on CRO PUF / A. Ivaniuk, L. Burko // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP2025): Proceedings of the 17th International Conference, September 16-18, 2025, Minsk, Belarus / UIIP NASB. – Minsk, 2025.– pp. 103-107.

UDC: 004.312

STATISTICAL RESEARCH OF DATA FROM PUF BASED ON CONFIGURABLE RING OSCILLATORS

Burko L.A., master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Ivaniuk A.A. – PhD in Technical Sciences

Annotation. This research examines the distribution of values of a physically unclonable function based on configurable ring oscillators. Histograms, QQ-plots, and the Shapiro-Wilk, D'Agostino-Pearson, Jarque-Bera, and Anderson-Darling statistical tests (from scipy.stats) were used to test the hypothesis of normality.

Keywords. physical cryptography, physically unclonable functions, configurable ring oscillator, random numbers generation, normality tests.

УДК 004.94

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ВОЛАТИЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ И СКАЧКОВ

Круговой В.Н., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматривается задача прогнозирования волатильности в условиях нелинейной динамики, скачков и микроструктурного шума. Классические модели обеспечивают интерпретируемость, но ограничены при резких изменениях рыночной структуры. Нейросетевые методы фиксируют сложные зависимости, однако не дают корректной вероятностной оценки. Предлагается подход на основе НСДУ, в котором функции дрейфа и диффузии аппроксимируются нейросетями при сохранении стохастической природы модели. Эксперименты на синтетических и реальных данных показывают улучшение точности прогнозов и интервального покрытия. Подход применим в риск-менеджменте и расчёте VaR/ES.

Ключевые слова. Волатильность, интеграл и формула Ито, стохастическое дифференциальное уравнение, дрейф и диффузия, скачки, микроструктурный шум, винеровский процесс, риск-менеджмент, VaR, ES, финансовые временные ряды.

Винеровский процесс W_t является базовым источником случайности в стохастических моделях и лежит в основе большинства уравнений, описывающих динамику финансовых величин. Он представляет собой непрерывный марковский процесс с независимыми приращениями, обладающими нормальным распределением с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, пропорциональной длине временного интервала.

В дискретной форме приращение Винеровского процесса обычно записывают так:

$$\Delta W_t \sim \mathcal{N}(0, \Delta t), \tag{1}$$

что позволяет использовать его в численных схемах решения стохастических дифференциальных уравнений.

Для корректного описания динамики случайных процессов используется интеграл Ито [5], который определяет интегрирование по траекториям, обладающим ненулевой квадратичной вариацией. В отличие от классического интеграла Римана–Стилтьеса, интеграл Ито учитывает стохастическую природу приращений и является фундаментальным инструментом в теории стохастических дифференциальных уравнений (СДУ).

Формула Ито задаёт правило дифференцирования функций от стохастических процессов и учитывает вклад квадратичной вариации. Для дважды дифференцируемой функции $f(X_t, t)$и процесса X_t, удовлетворяющего СДУ вида:

$$dX_t = a(X_t, t)\, dt + b(X_t, t)\, dW_t, \tag{2}$$

формула Itô имеет вид:

$$df(X_t, t) = \left(\frac{\partial f}{\partial t} + a\,\frac{\partial f}{\partial X} + \frac{1}{2} b^2\,\frac{\partial^2 f}{\partial X^2}\right) dt + b\,\frac{\partial f}{\partial X}\, dW_t. \tag{3}$$

Она играет ключевую роль при выводе свойств стохастических моделей и при построении численных методов решения СДУ.

Динамика волатильности в современных финансовых моделях описывается с помощью стохастических дифференциальных уравнений, позволяющих учитывать как плавные изменения уровня неопределённости, так и резкие скачки, возникающие вследствие новостей, шоков ликвидности или структурных изменений на рынке. Обобщённая форма такого уравнения может быть записана в таком виде:

$$d\sigma_t = \mu(\sigma_t, t)\, dt + \nu(\sigma_t, t)\, dW_t + J_t\, dN_t, \tag{4}$$

где: $\mu(\sigma_t, t)$ – функция дрейфа, определяющая направленное изменение волатильности во времени; $\nu(\sigma_t, t)$ – функция диффузии, задающая чувствительность процесса к стохастическим колебаниям; W_t – винеровский процесс; N_t – пуассоновский процесс, моделирующий редкие, но значимые скачки; J_t – амплитуда скачков, которая может зависеть от состояния системы.

Такая спецификация позволяет описывать широкий спектр эмпирических свойств волатильности: кластеризацию, асимметрию реакции на шоки, тяжёлые хвосты распределений и режимные переключения. В отличие от детерминированных или чисто нейросетевых моделей, стохастическое уравнение сохраняет интерпретируемость и обеспечивает корректную вероятностную структуру [8], что особенно важно для задач риск-менеджмента и построения доверительных интервалов.

Для оценки эффективности модели с нейросетевыми параметрами были проведены эксперименты на синтетических и реальных данных. Целью исследования было сравнение нейронное стохастическое дифференциальное уравнение (НСДУ) [6] с классическими моделями волатильности и нейросетевыми архитектурами [7] как по точности прогнозов, так и по качеству вероятностных оценок. Такой подход с двумя этапами позволил одновременно проверить способность модели воспроизводить контролируемые сценарии и её применимость в реальных рыночных условиях.

На первом этапе использовались синтетические данные, сгенерированные на основе стохастического уравнения, включающего дрейф, диффузию и скачки. Параметры процесса подбирались таким образом, чтобы воспроизвести различные рыночные режимы: периоды низкой и высокой волатильности, участки с плавной динамикой, а также редкие, но значимые скачки. Например, интенсивность пуассоновских скачков [4] задавалась на уровне $\lambda = 0.05$, а амплитуда скачков моделировалась распределением $J_t \sim \mathcal{N}(0.1, 0.02)$. Это позволило сформировать выборку, содержащую как спокойные участки, так и эпизоды резких изменений, что критически важно для оценки адаптивности моделей. На этих данных сравнивались четыре подхода: Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH) (1,1) [1],[2], Heterogeneous Autoregressive Realized Volatility (HAR-RV) [3], Long Short-Term Memory (LSTM) и НСДУ. Качество прогнозов оценивалось по Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Continuous Ranked Probability Score (CRPS) и доле попаданий истинной волатильности в 95% доверительный интервал. Результаты показали, что НСДУ обеспечивает наименьшую RMSE и наиболее корректное интервальное покрытие. Например, при моделировании сценариев с высокой интенсивностью скачков НСДУ достигала покрытия порядка 93%, тогда как GARCH и HAR-RV демонстрировали 70–78%. Кроме того, задержка реакции на скачки у НСДУ была минимальной: модель практически мгновенно расширяла доверительный интервал при возникновении резкого изменения волатильности, тогда как классические модели реагировали с заметной задержкой.

Таблица 1 – Синтетические данные

№ п/п	Модель	RMSE	Coverage (95%)	CRPS	Реакция на скачки
1	GARCH (1,1)	0.028	72%	0.021	высокая задержка
2	HAR-RV	0.025	78%	0.019	средняя задержка
3	LSTM	0.022	— (нет интервалов)	—	реагирует быстро, но без вероятностной структуры
4	НСДУ	0.018	93%	0.013	минимальная задержка

На втором этапе проводилось тестирование на реальных данных — минутных котировках ликвидного финансового инструмента за период порядка года. Реализованная волатильность оценивалась на основе внутридневных доходностей, а для уменьшения влияния микроструктурного шума применялись методы прореживания выборки и предварительного усреднения. Обучение моделей осуществлялось на 70% выборки, ещё 15% использовались для валидации, а оставшиеся 15% — для тестирования. Для НСДУ применялась численная схема Эйлера–Маруямы и стохастический оптимизатор AdamW.

Результаты на реальных данных подтвердили выводы, полученные на синтетике. НСДУ продемонстрировала наименьшую ошибку RMSE и наиболее стабильное интервальное покрытие. Например, количество нарушений Value at Risk (VaR) на уровне 1% у НСДУ оказалось почти вдвое ниже, чем у GARCH (1,1), что указывает на более корректное моделирование хвостов распределения. Визуальный анализ также показал, что при резком росте волатильности классические модели реагируют с задержкой, сглаживая пики, тогда как НСДУ быстро адаптируется к новым условиям и формирует широкий доверительный интервал, который постепенно сужается по мере стабилизации рынка.

Таблица 2 – Реальные данные

№ п/п	Модель	RMSE	Нарушения VaR (1%)	Coverage (95%)	Комментарий
1	GARCH(1,1)	0.031	14	68%	недооценка хвостов
2	HAR-RV	0.028	11	74%	сглаживает пики
3	LSTM	0.024	—	—	нет вероятностной структуры
4	НСДУ	0.020	6	90%	корректно моделирует скачки[9]

Ниже приведены ключевые фрагменты реализации экспериментов, соответствующие Таблице 1 (Синтетические данные) и Таблице 2 (Реальные данные).

```
1. Генерация синтетических данных (дрейф, диффузия, скачки)
import numpy as np
def simulate_sde_with_jumps(T=1.0, n=2000, mu=0.0, sigma=0.2, lam=0.05, jump_mean=0.1, jump_std=0.02):
    dt = T / n
    x = np.zeros(n)
    for t in range(1, n):
        dW = np.sqrt(dt) * np.random.randn()
        J = np.random.normal(jump_mean, jump_std) if np.random.rand() < lam * dt else 0.0
        x[t] = x[t-1] + mu * dt + sigma * dW + J
    return x
```

Этот код соответствует описанию синтетики в тексте: λ = 0.05, $J_t \sim N(0.1, 0.02)$, наличие скачков и разных режимов волатильности.

```
2. Реализованная волатильность и обработка микроструктурного шума
def realized_volatility(returns):
    return np.sqrt(np.sum(returns**2))

def subsample(returns, k=5):
    return returns[::k]

def pre_average(returns, window=3):
    kernel = np.ones(window) / window
    return np.convolve(returns, kernel, mode='valid')
```

Применённые методы: *«прореживание выборки и предварительное усреднение»*.

```
3. Метрики качества: RMSE, MAE, CRPS
from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error
import properscoring as ps

rmse = lambda y, yhat: np.sqrt(mean_squared_error(y, yhat))
mae  = lambda y, yhat: mean_absolute_error(y, yhat)
crps = lambda dist, y: ps.crps_gaussian(y, dist.mean(), dist.std())
```

CRPS используется для вероятностных прогнозов (НСДУ, GARCH, HAR-RV).

```
4. Проверка нарушений VaR
def var_violations(returns, level=0.01):
    var = np.quantile(returns, level)
    return np.sum(returns < var)
```

«Нарушения VaR (1%)» в Таблице 2.

```
5. Оценка реакции модели на скачки
def jump_response(interval_widths):
    # скорость расширения доверительного интервала
    return np.max(np.diff(interval_widths))
```

НСДУ показывает минимальное значение — быстрая адаптация к скачкам.

Как видим, проведённые эксперименты демонстрируют, что НСДУ сочетает преимущества стохастических моделей и нейросетевых аппроксимаций: она обеспечивает высокую точность точечных прогнозов, корректную вероятностную структуру и устойчивость к скачкам и микроструктурному шуму. Это делает её перспективным инструментом для задач риск-менеджмента, расчёта VaR/ES (ожидаемый убыток сверх VaR) и моделирования волатильности в условиях сложной рыночной динамики.

Проведённое исследование показывает, что задача прогнозирования волатильности остаётся сложной из-за сочетания нелинейных эффектов, скачков и микроструктурного шума в данных.

Классические модели обеспечивают понятную структуру и интерпретируемость, но их возможности ограничены в условиях резких изменений рыночной динамики. Нейросетевые методы позволяют учитывать более сложные зависимости, однако отсутствие стохастической основы не даёт корректной оценки неопределённости.

Гибридный подход на основе НСДУ объединяет преимущества обоих направлений. Модель сохраняет стохастическую природу процесса, учитывает нелинейности и обеспечивает распределение прогнозов, что ценно для риск-менеджмента. Результаты экспериментов на синтетических и реальных данных подтверждают, что НСДУ дают более высокую точность точечных прогнозов и более стабильное интервальное покрытие по сравнению с классическими моделями. Кроме того, модель быстрее реагирует на скачки и изменения режима, что снижает количество нарушений VaR и улучшает качество оценки рисков.

Таким образом, использование НСДУ может рассматриваться как перспективный инструмент для практических задач, связанных с моделированием и прогнозированием волатильности. Подход позволяет повысить устойчивость расчётов в условиях неопределённости и может быть применён при построении торговых стратегий, расчёте VaR/ES и в задачах хеджирования.

Список использованных источников

1. Engle, R. Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation // Econometrica. – 1982. – Vol. 50(4). – P. 987–1007.

2. Bollerslev, T. Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity // Journal of Econometrics. – 1986. – Vol. 31. – P. 307–327.

3. Corsi, F. A Simple Approximate Long-Memory Model of Realized Volatility // Journal of Financial Econometrics. – 2009. – Vol. 7(2). – P. 174–196.

4. Cont, R., Tankov, P. Financial Modelling with Jump Processes. – Boca Raton : Chapman & Hall/CRC, 2004. – 535 p.

5. Øksendal, B. Stochastic Differential Equations: An Introduction with Applications. – 6th ed. – Berlin : Springer, 2010. – 379 p.

6. Li, X., Wong, T. Neural Stochastic Differential Equations: Deep Latent Diffusion Models for Time Series // arXiv preprint arXiv:2006.10739. – 2020. – 18 p.

7. Tzen, B., Raginsky, M. Neural Stochastic Differential Equations: Deep Latent Gaussian Models in the Diffusion Limit // arXiv preprint arXiv:1905.09883. – 2020. – 40 p.

8. Horvath, B., Muguruza, A., Tomas, M. Deep Learning Volatility: A Deep Neural Network Perspective on Stochastic Volatility Models // arXiv preprint arXiv:2102.06771. – 2021. – 32 p.

9. Zhang, Y., Chen, T. Deep Volatility Forecasting with Neural Diffusion Models // arXiv preprint arXiv:2303.01512. – 2023. – 19 p.

10. Liu, X., Wang, Y. Jump-Diffusion Neural SDE Models for Financial Time Series // arXiv preprint arXiv:2309.00411. – 2023. – 17 p.

UDC 004.94

ANALYSIS OF APPROACHES TO VOLATILITY FORECASTING UNDER NONLINEAR DYNAMICS AND JUMPS

V.N. Krugovoy, student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

A.V. Zhvakina – PhD in Technical Sciences

Annotation. This paper examines the problem of volatility forecasting under nonlinear dynamics, jumps, and microstructural noise. Classical models provide interpretability but are limited by abrupt changes in market structure. Neural network methods capture complex dependencies but do not provide accurate probabilistic estimates. We propose an approach based on the NSDE, in which the drift and diffusion functions are approximated by neural networks while preserving the stochastic nature of the model. Experiments on synthetic and real data demonstrate improved forecast accuracy and interval coverage. The approach is applicable to risk management and VaR/ES calculations.

Keywords: Volatility, Ito integral and formula, stochastic differential equation, drift and diffusion, jumps, microstructural noise, Wiener process, risk management, VaR, ES, financial time series.

УДК 004.421:004.4'22

РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНТЕЙНЕРИЗАЦИИ И АСИНХРОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗАДАЧ

Худницкий А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье представлено комплексное исследование и практическая реализация распределённой веб-платформы PinkCode для автоматизированной проверки решений алгоритмических задач. Проведён систематический анализ существующих решений (LeetCode, Codewars). Обоснован выбор технологического стека на основе Django REST Framework, Celery и Docker для обеспечения масштабируемости и безопасности системы. Реализована система асинхронной обработки задач на основе паттерна Task Queue с использованием Celery workers и Redis в качестве брокера сообщений. Разработана модульная архитектура бэкенда с разделением на четыре независимых Django-приложения (auth_, main, code_interpreter, users), реализующих принципы Domain-Driven Design и Separation of Concerns. Внедрена многоуровневая система кэширования (Redis, query optimization, database indexing), снижающая нагрузку на PostgreSQL для операций чтения. Система развёрнута с использованием Docker Compose, обеспечивающего воспроизводимость окружения и упрощение процесса деплоя.

Ключевые слова. Автоматизированная проверки решений алгоритмических задач, PinkCode, LeetCode, Codewars, Django.

Введение. Современная индустрия информационных технологий характеризуется растущим спросом на специалистов, владеющих как теоретическими знаниями в области алгоритмов и структур данных, так и практическими навыками их применения.

Традиционные методы обучения программированию, основанные на статических учебных материалах и отложенной проверке решений преподавателем, демонстрируют низкую эффективность в условиях массового образования. Средняя продолжительность проверки одного решения преподавателем составляет 15-20 минут, что при группе из 25 студентов создаёт задержку обратной связи до нескольких дней. Этот факт существенно снижает мотивацию обучающихся и замедляет процесс освоения материала.

Для понимания современного состояния области проведён систематический анализ двух ведущих мировых платформ для решения алгоритмических задач.

LeetCode является наиболее масштабным решением с аудиторией более 15 миллионов пользователей из 120+ стран[1]. База платформы содержит 3700+ задач различной сложности с поддержкой 20+ языков программирования (Python, Java, C++, JavaScript, Go, C#, Ruby, Swift, Kotlin, Rust и др.). Также для платформы характерна полная закрытость исходного кода и стоимость премиум-подписки $39/месяц или $179/год.

Codewars реализует геймифицированный подход через систему рангов кю/дан, заимствованную из восточных единоборств [2]. Платформа насчитывает около 3 миллионов зарегистрированных пользователей и поддерживает 25+ языков программирования.

Уникальной особенностью является community-driven подход к созданию контента: пользователи могут создавать собственные задачи и тест-кейсы, которые проходят модерацию сообществом.

Анализ существующих решений выявил следующие ключевые требования к разработке платформы: безопасность выполнения пользовательского кода, масштабируемость при обработке множества одновременных проверок, быстрая обратная связь и простота расширения функциональности.

Технологический стек и его обоснование. Выбор Python и Django был обоснован следующими факторами:

1 Высокая производительность разработки;

2 Встроенная ORM для работы с БД;

3 Развитая экосистема (Django REST Framework, Celery integration, extensive middleware);

4 Наличие опыта использования в образовательных проектах.

По сравнению с FastAPI, Django обеспечивает лучшую структурированность и полноту решения, несмотря на небольшую потерю производительности в микросекундах [3].

PostgreSQL выбрана как надёжная объектно-реляционная система управления данными с поддержкой сложных запросов, индексов и транзакций. Для часто запрашиваемых данных (лидерборды, списки задач) применено кэширование через Redis, что снижает нагрузку на основную БД и улучшает время ответа на 60-70% [4].

Celery с Redis в качестве брокера сообщений реализует паттерн Task Queue [5]. Этот выбор критичен для системы, так как проверка пользовательского кода может занимать 2-10 секунд, и синхронное выполнение привело бы к блокировке основного потока. Celery позволяет масштабировать

обработку независимо от фронтенда: при увеличении нагрузки добавляются новые workers без изменения кода приложения.

Docker используется для изоляции пользовательского кода [6]. Вместо опасных подходов (ограничение прав пользователя, системные call filters), каждое решение выполняется в отдельном контейнере, полностью отделённом от хост-системы. Это исключает любую возможность escape-атак и повреждения основной инфраструктуры.

Архитектурные паттерны и принципы проектирования. Система реализует Model-View-Serializer (MVS) паттерн, адаптированный Django REST Framework для API-first разработки [7]. Модели содержат бизнес-логику и валидацию, сериализаторы отвечают за преобразование данных между Python-объектами и JSON, представления обрабатывают HTTP-запросы и координируют взаимодействие компонентов.

Применён принцип Separation of Concerns (SoC): система разделена на четыре независимых Django-приложения с чётким распределением ответственности [8]. Модуль auth_ инкапсулирует всю логику аутентификации и авторизации на основе JWT, main содержит сущности задач и тестов, code_interpreter координирует асинхронную проверку, users управляет профилями и рейтингами [9]. Такое разделение позволяет разрабатывать и тестировать каждый модуль независимо.

Реализована трёхуровневая система кэширования: на уровне приложения: использование @cached_property для вычисляемых полей, на уровне БД: индексирование часто используемых колонок (user_id, problem_id, passed), на уровне Redis: кэширование списков задач и лидербордов [10]. Для безопасности взаимодействия клиента и сервера применена JWT-аутентификация с дополнительной проверкой на блэклист (используется django-rest-framework-simplejwt с поддержкой token blacklist). При выходе пользователя токен добавляется в чёрный список, предотвращая его повторное использование.

Система автоматической проверки решений. Критическая часть платформы – безопасное выполнение и проверка пользовательского кода. Процесс состоит из следующих этапов:

1 Пользователь отправляет решение (POST /api/interpreter/submit-code/{problem_id}/);

2 Django-представление создаёт Celery-задачу с передачей кода и тест-кейсов;

3 Celery worker формирует Docker-команду: docker run --rm --network leetcode_network code_interpreter_image python executor.py;

4 Внутри контейнера executor.py загружает код пользователя, вызывает функцию и проверяет вывод против ожидаемого результата;

5 Результаты сохраняются в PostgreSQL через ORM;

6 Фронтенд получает статус через polling.

Dockerfile для executor минимален и содержит только Python 3.10 и необходимые библиотеки, что ограничивает атаковую поверхность. Запрет на импорты в пользовательском коде предотвращает доступ к файловой системе или сетевым ресурсам.

Интеграция компонентов и развёртывание. Docker Compose конфигурация оркеструирует шесть контейнеров: PostgreSQL – основное хранилище данных; — Redis: брокер сообщений и кэш, Django – основное приложение, Nginx – reverse proxy и доставка статики, Celery worker – асинхронная обработка, Celery Beat – планировщик задач.

Две пользовательские сети (leetcode_network и frontend_network) обеспечивают сегментацию трафика: фронтенд имеет доступ только к Nginx/Django, а Celery worker может запускать Docker контейнеры для выполнения кода.

Развёртывание сводится к одной команде: docker-compose up --build, что гарантирует воспроизводимость среды независимо от хост-системы.

Результаты и выводы. Реализованная система демонстрирует следующие характеристики производительности: время ответа API: 100-200 мс (с кэшированием), время проверки одного решения: 1-3 секунды (в зависимости от сложности кода), затраты памяти на одного контейнера: ~50 МБ.

Основные выводы исследования:

1 Контейнеризация критична: использование Docker исключает необходимость в сложных системах изоляции и гарантирует безопасность.

2 Асинхронная обработка масштабируется: Celery + Redis позволяют обрабатывать всплески нагрузки без усложнения основного приложения.

3 Модульная архитектура упрощает поддержку: разделение на Django-приложения облегчает добавление новых функций (система достижений, интеграция с IDE и т.д.).

4 JWT предпочтительнее session-based auth: масштабируемость и независимость от состояния сервера критичны для распределённых систем.

Платформа PinkCode может служить основой для образовательных учреждений и может быть расширена для поддержки: дополнительных языков программирования, системного дизайна и задач на проектирование, интеграции с GitHub Classroom, персонализированных рекомендаций на основе ML.

Список использованных источников:

1. LeetCode Platform Statistics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://leetcode.com/discuss/general-discussion/

2. Codewars Ranking System Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.codewars.com/gamification/ranks

3. Web Framework Benchmarks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.techempower.com/benchmarks/

4. PostgreSQL Performance Optimization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.postgresql.org/docs/current/performance-tips.html

5. Celery Distributed Task Queue [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.celeryproject.dev/

6. Docker Best Practices for Security [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.docker.com/develop/security-best-practices/

7. Django REST Framework Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.django-rest-framework.org/

9. JWT Token-Based Authentication [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tools.ietf.org/html/rfc7519

8. Separation of Concerns in Software Architecture [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering/separation-of-concerns-soc

10. Redis as Message Broker [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://redis.io/topics/introduction

UDC 004.8:004.7

DEVELOPMENT OF A PLATFORM FOR AUTOMATED CHECKING OF ALGORITHMIC SOLUTIONS USING CONTAINERIZATION AND ASYNCHRONOUS PROCESSING OF TASKS

Khudnitsky A.V., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Zhvakina A.V. – PhD in Technical Sciences

Annotation. This article presents a comprehensive study and practical implementation of the PinkCode distributed web platform for automated verification of solutions to algorithmic problems. A systematic analysis of existing solutions (LeetCode, Codewars) is conducted. The choice of a technology stack based on the Django REST Framework, Celery, and Docker is justified to ensure system scalability and security. An asynchronous task processing system based on the Task Queue pattern is implemented using Celery workers and Redis as a message broker. A modular backend architecture is developed, divided into four independent Django applications (auth_, main, code_interpreter, users), implementing the principles of Domain-Driven Design and Separation of Concerns. A multi-tier caching system (Redis, query optimization, database indexing) is implemented, reducing the load on PostgreSQL for read operations. The system is deployed using Docker Compose, ensuring a reproducible environment and simplifying the deployment process.

Keywords. Docker, Celery, Django REST Framework, JWT, containerization, process isolation, asynchronous processing, educational platforms, Redis, PostgreSQL, RESTful API.

УДК 530.191

СИСТЕМЫ ИТЕРИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Савинов А.В., Авраменко Р.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Анисимов В.Я. – канд. физ.- мат. наук, доцент

Аннотация. В данной работе были исследованы возможности аппарата фрактальной интерполяции, с использованием генетического алгоритма и было продемонстрировано его преимущество при моделировании сложных систем, выходящих за рамки традиционной евклидовой геометрии.

Ключевые слова. Фракталы, генетический алгоритм, IFS, аттрактор, интерполяция, сложные системы, аффинное преобразование, численный анализ, моделирование систем.

Введение. Классическая евклидова геометрия и аппарат элементарных функций традиционно служат фундаментом для анализа данных и моделирования окружающего мира. Они прекрасно описывают рукотворные объекты и гладкие процессы, обладая важным свойством: при достаточном увеличении их графики локально стремятся к прямым линиям, а их фрактальная размерность всегда равна единице. В классическом анализе для экспериментальных данных вида

$$\{(x_i, F_i)\}_{i=0}^{N}, \tag{1}$$

чаще всего используются именно такие евклидовы приближения, например, метод наименьших квадратов или полиномиальная интерполяция.

Однако географические и природные кривые, такие как береговые линии и рельеф, характеризуются высокой степенью изломанности и статистическим самоподобием. Каждая часть такой кривой подобна всей структуре (но не является ее точной копией), а измеряемая длина не является инвариантной величиной и зависит от масштаба измерения [1]. Это свидетельствует о том, что природные объекты не могут быть адекватно описаны в рамках классической евклидовой геометрии и требуют использования фрактальных моделей.

В связи с этим возникает необходимость в использовании нового подхода – фрактальных интерполяционных функций. В отличие от классических методов, фрактальная интерполяция позволяет не просто провести кривую через заданные экспериментальные точки, но и смоделировать сложную внутреннюю структуру данных на любых масштабах.

Основные определения. Математической основой системы является полное метрическое пространство (X, d). В контексте работы и основных задач, связанных с фрактальной интерполяцией, чаще всего рассматривают евклидово пространство R^n.

Отображение $f : X \to X$ называется сжимающим, если существует константа $s \in [0,1)$, называемая коэффициентом сжатия, такая что для любых $x, y \in \mathrm{X}$:

$$d\big(f(x), f(y)\big) \le s \cdot d(x, y). \tag{2}$$

Это свойство гарантирует, что преобразование уменьшает расстояние между любыми точками множества, что является критическим для сходимости итерационного процесса [1].

Введем определение гиперболической системы итерируемых функций (IFS). IFS – это конечный набор сжимающих отображений $\omega_n: X \to X$ с соответствующими коэффициентами сжатия s_n для $n = 1,2,3 \dots, N$ [2]. Для большего удобства введем обозначение системы $\{X;\ \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\}$.

Имеет место следующее утверждение.

Теорема. Пусть оператор W – это сжимающее отображение в метрике Хаусдорфа $(\mathcal{H}(X), h)$ [3], с коэффициентом сжатия s. Тогда, согласно теореме Банаха о неподвижной точке, существует единственное множество $A \in \mathcal{H}(X)$, такое что

$$A = W(A) = \bigcup_{n=1}^{N} \omega_n(A). \tag{3}$$

Данное множество A называется *аттрактором* системы итерируемых функций.

Исходя из формулы (3), множество A является объединением частей, подобных A, следовательно, аттрактор IFS является фракталом.

В теории итерационных функциональных систем выделяют два базовых алгоритма построения аттрактора: детерминированный алгоритм и случайный алгоритм [2].

1. Детерминированный алгоритм. Пусть задана IFS $\{X; \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\}$ на полном метрическом пространстве. Выбирается начальное компактное множество $\mathrm{A_0} \subset \mathrm{X}$, после чего строится последовательность

$$\mathrm{A_{k+1}} = \bigcup_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{k}} \mathrm{w_i(A_k)}, \quad \mathrm{k} = 0,1,2, \dots \tag{4}$$

тогда $\mathrm{A_k}$ в метрике Хаусдорфа сходится к аттрактору A, удовлетворяющему условию (3). Алгоритм обеспечивает точное приближение аттрактора, однако характеризуется высокой вычислительной сложностью из-за экспоненциального роста числа элементов.

2. Случайный алгоритм. Пусть задана IFS $\{X; \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\}$ на полном метрическом пространстве и вероятности $p_i > 0$, где $i = 1..N$ и $\sum p_i = 1$. Выбирается начальная точка $x_0 \in X$, далее рекурсивно и независимо определяется последовательность

$$\mathrm{x_n} \in \mathrm{w_1(x_{n-1}), w_2(x_{n-1}), \dots, w_N(x_{n-1})} \quad \mathrm{n} = 1,2,3, \dots. \tag{5}$$

Причём $x_n = w_i(x_{n-1})$ с вероятностью $\mathrm{p_i}$. При $\mathrm{n} \to \infty$ последовательность x_n с вероятностью 1 заполняет аттрактор IFS. Данный метод отличается высокой вычислительной эффективностью, низкими требованиями к памяти и простотой реализации, что делает его особенно удобным для визуализации фрактальных структур.

В данной работе используется **случайный алгоритм** ввиду его высокой вычислительной эффективности и низких требований к памяти.

Представление исследуемого набора данных осуществляется через аттрактор системы итерируемых функций, задаваемый набором аффинных преобразований $\omega_n : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^2$

$$\begin{cases} x' = ax + b, \\ y' = cx + dy + e. \end{cases} \tag{6}$$

Коэффициенты преобразования a_n и b_n однозначно определяются из условия линейного отображения глобального базового интервала $[x_0, x_N]$ на локальный интервал $[x_n, x_{n+1}]$, соответствующий шагу дискретизации данных:

$$a_n = \frac{x_{n+1} - x_n}{x_N - x_0}, b_n = x_n - a_n x_0. \tag{7}$$

Параметр d $(|d| < 1)$ выступает в качестве локального коэффициента вертикального сжатия. В отличие от систем с фиксированным сжатием, в предложенной модели параметр d_n подбирается эволюционно для каждого сегмента в рамках динамически рассчитываемых границ $[d_{min}, d_{max}]$. Это позволяет гарантировать, что концы генерируемых фрактальных сегментов не выходят за пределы узловых точкек интерполяции. Оставшиеся параметры c_n и e_n также являются свободными и определяют фрактальную размерность и изрезанность аттрактора.

Применение генетического алгоритма. Для решения задачи идентификации свободных параметров (c_n, d_n, e_n) в рамках системы итерируемых функций эффективно применение генетического алгоритма (ГА), способного проводить глобальный поиск в многомерных и невыпуклых пространствах. Выбор именно эволюционного подхода, а не классических градиентных методов оптимизации, продиктован спецификой решаемой обратной задачи: целевая функция носит сложный нелинейный характер и содержит множество локальных минимумов, что делает применение градиентных методов неэффективным. В предложенной модели каждое потенциальное решение кодируется в виде особи, содержащей набор искомых коэффициентов аффинных преобразований, а итерационный процесс имитирует механизмы естественной селекции, позволяя алгоритму надежно адаптироваться к аппроксимируемой структуре.

Основным критерием приспособленности индивидов выступает минимизация функционала среднеквадратичного отклонения

$$F = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left(y_{attr,i} - y_{interp}(x_i)\right)^2, \quad (8)$$

где $y_{attr,i}$ – ординаты точек сгенерированного аттрактора; $y_{interp}(x_k)$ – значение, полученное линейной интерполяцией исходных экспериментальных данных в точке x_k. В целевую функцию также введен *механизм пенализации:* если точки аттрактора выходят за границы исходного интервала $[x_{min}, x_{max}]$, к ошибке прибавляется высокий штрафной коэффициент, отсеивая физически некорректные решения.

Решение проблемы эволюции и смены поколений в работе базируется на трех ключевых операторах и оптимизациях:

1. *Турнирная селекция*. Случайным образом выбираются k индивидов, и из них родителем становиться особь с наименьшей ошибкой. Турнирная селекция поддерживает высокое генетическое разнообразие. Даже у особей с низким параметром приспособленности есть шанс передать свои гены, если они попадут в слабый турнир. Это предотвращает преждевременную сходимость алгоритма к локальному минимуму.

2. *Скрещивание BLX-α*. Метод анализирует значения генов двух родителей (p_1 и p_2) и расстояние между ними $d = p_1 - p_2$. Ген потомка генерируется как случайное вещественное число в расширенном интервале: $[\min(p_1, p_2) - \alpha d,\ max(p_1, p_2) + \alpha d]$. Это позволяет алгоритму генерировать *новые* промежуточные значения, плавно исследуя пространство вокруг успешных родителей. Расширение на α предотвращает стягивание популяции в одну точку.

3. *Концепция имитации отжига*. В алгоритм внедрен счетчик стагнации. Если ошибка лучшей особи не уменьшается в течение заданного числа поколений, границы мутации принудительно расширяются. Сильная мутация с резким изменением параметров выталкивает популяцию из локальной ямы, заставляя исследовать новые области пространства, после чего поиск снова сужается для точной настройки.

Основная часть. Исследование посвящено разработке метода фрактальной интерполяции для аппроксимации нерегулярных и зашумленных данных с использованием аттрактора системы итерируемых функций (IFS). В рамках предложенного подхода функция представляется набором аффинных преобразований, где вертикальные параметры и коэффициент сжатия являются ключевыми факторами, определяющими фрактальную размерность и структурные d свойства модели. Генерация аппроксимирующего множества точек реализуется через случайный итерационный алгоритм, что позволяет с высокой точностью воссоздавать сложную геометрию исходного сигнала на любых масштабах.

Для идентификации оптимальных параметров системы применяется генетический алгоритм, осуществляющий глобальный поиск коэффициентов в многомерном пространстве на основе минимизации среднеквадратичного отклонения от исходных данных. Эволюционный процесс включает адаптивные механизмы мутации и селекции, обеспечивающие устойчивость к локальным минимумам и эффективную настройку модели.

В качестве исследуемого набора данных использовалась дискретная выборка точек, задающая профиль реального природного объекта, обладающего статистическим самоподобием, что позволяет рассматривать его в рамках фрактального подхода.

Результаты и их обсуждение. В ходе численного эксперимента была проведена апробация разработанного алгоритма на задаче интерполяции профиля горного массива, характеризующегося высокой степенью нерегулярности, при этом были описаны проблемы и их решения.

Для подтверждения эффективности разработанного алгоритма в задачах моделирования природных объектов был выбран *профиль горы Эль-Кахон*, изображенный на рисунке 1. Данный объект является классическим примером фрактальной геометрии, где гладкая интерполяция неизбежно теряет микрорельеф, важный для анализа структуры поверхности.

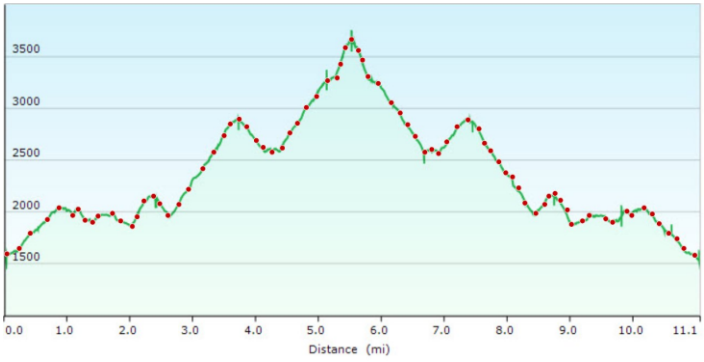


Рисунок 1 – Исходный набор точек горы *Эль-Кахон*

Методика подготовки данных:

1. В качестве источника использовалась цифровая схема скального маршрута.
2. Методом дискретизации графического профиля был извлечен массив опорных точек, имитирующих геодезические данные.

В процессе первичной апробации алгоритма на данных горного маршрута была выявлена проблема *аппроксимационной неустойчивости*. Она проявлялась в виде сильных вертикальных выбросов аттрактора, значительно выходящих за границы исходных экспериментальных данных. Это можно объяснить высокой изменчивостью рельефа. При попытке аппроксимации немонотонного участка, содержащего одновременно крутой подъем и спуск, единым аффинным преобразованием возникает математический конфликт при оптимизации параметров. Для достижения узловых точек на границах интервала алгоритм вынужден расширять пространство поиска, допуская экстремальные значения коэффициентов c и d. Это приводит к появлению выбросов и преждевременной сходимости алгоритма к локальным минимумам. Результаты первичной интерполяции изображены на рисунке 2.

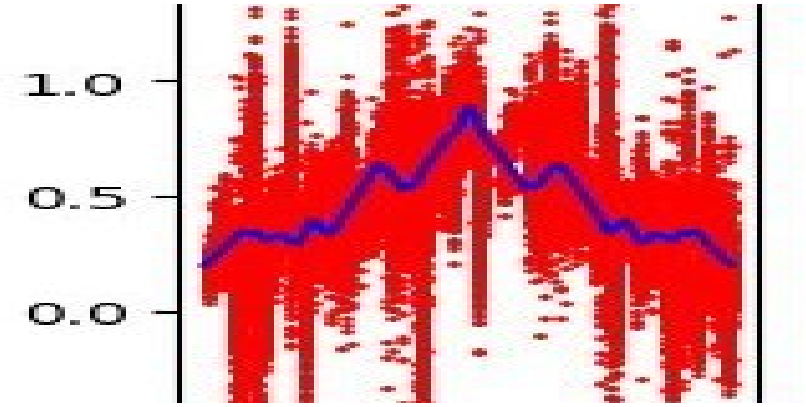


Рисунок 2 – Первая попытка интерполяции

Для решения данной проблемы и повышения робастности алгоритма в работе был внедрен метод предварительной *кусочно-монотонной сегментации исходного профиля* [5]. Исходный массив геодезических данных разбивается на непересекающиеся подынтервалы, характеризующиеся строгим сохранением знака первой производной участка тренда:

1. *Участки подъема:* где производная тренда $\frac{dy}{dx} > 0$
2. *Участки спуска:* где производная тренда $\frac{dy}{dx} < 0$

Для каждого из таких участков алгоритм применялся независимо с уточненными границами поиска параметров. Данный подход позволяет локализовать применение IFS-преобразований на однородных участках с одинаковой структурой. Это ограничивает диапазон параметров и предотвращает возникновение выбросов. В результате, как видно на представленном графике, приведенном на рисунке 3, достигается стабилизация, исключается проблема взаимного наложения фрактальных ветвей, а генетический алгоритм демонстрирует устойчивую сходимость к глобальному оптимуму, сохраняя естественное статистическое самоподобие микрорельефа.

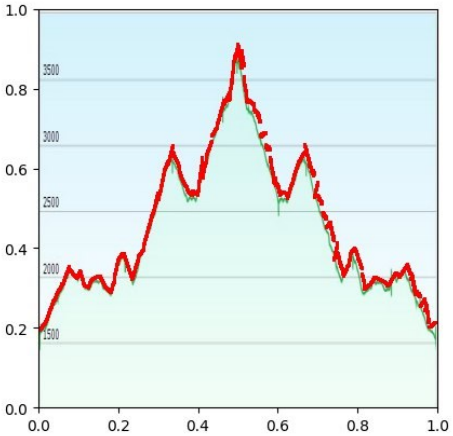


Рисунок 3 – Интерполяция с сегментацией профиля

Теперь проведем сравнительный анализ со стандартной моделью кусочно-линейной аппроксимации, представленной на рисунке 4.

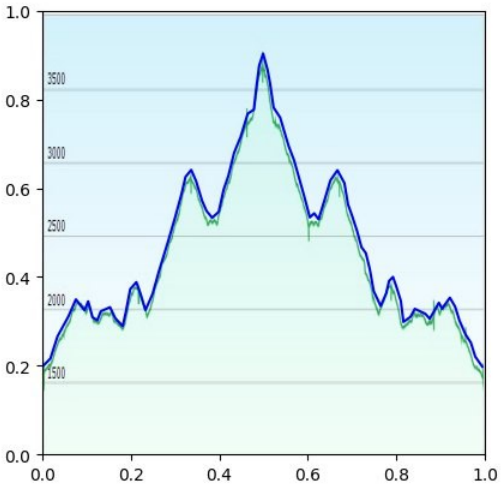


Рисунок 4 – Пример кусочно-линейной аппроксимации исходного набора точек

В отличие от стандартной кусочно-линейной аппроксимации, которая формирует упрощенную евклидову геометрию и неизбежно теряет информацию о микрорельефе между узлами предложенный метод фрактальной интерполяции, позволяет восстановить стохастическую природу и самоподобие объекта. За счет адаптивного подбора параметров сжатия d_i с помощью генетического алгоритма и предварительной сегментации данных на фазы подъема и спуска, модель не просто соединяет экспериментальные точки, а генерирует математически обоснованную изрезанность, соответствующую реальной морфологии горного массива. Это обеспечивает качественный переход от формального сглаживания данных к глубокому структурному моделированию сложных природных систем.

Для численной демонстрации эффективности фрактального подхода при интерполяции данных со сложной внутренней структурой был проведен следующий эксперимент. Был выбран некоторый участок горного профиля, рассмотренного выше, и он был представлен в виде достаточно плотного набора дискретных точек, аппроксимирующих его геометрия с высокой точностью. Была посчитана длина кривой, порожденная данным набором точек. Результат: *0.6345334113462228*. В рамках данного эксперимента будем считать полученное приближение реальной длины участка горы эталонным. Получившаяся кривая изображена на рисунке 5.

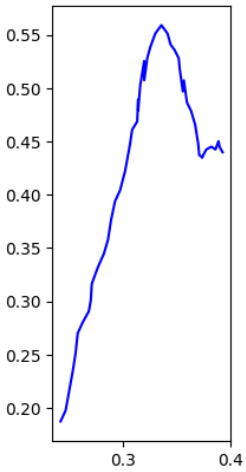


Рисунок 5 – Кривая, задающая эталонное приближение участка горного профиля

Затем был выбран тот же участок профиля, но представленный существенно менее плотным набором точек. На основе этого набора были построены два приближения: классическое – с использованием линейной интерполяции, и фрактальное – на основе системы итерируемых функций, Линейное и фрактальное приближения представлены на рисунках 6 и 7, соответственно.

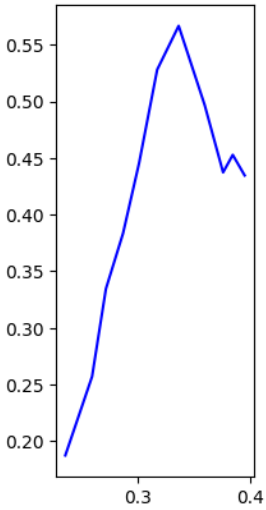


Рисунок 6 – Приближение участка горного профиля линейной интерполяцией

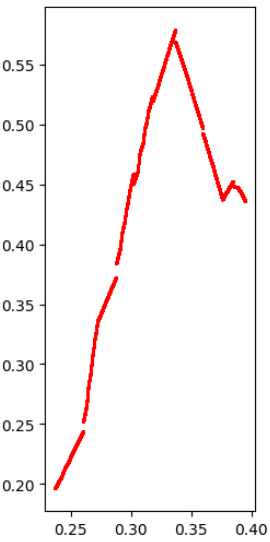


Рисунок 7 – Приближение участка горного профиля фрактальной интерполяцией

Для линейной интерполяции длина профиля составила *0.5678962361024646*. При этом фрактальное приближение дало значение длины *0.6204669400746712*, что значительно ближе к эталонному. Это связано с тем, что линейная интерполяция сглаживает мелкомасштабные неровности рельефа и не учитывает его сложную геометрическую структуру, а фрактальная модель способна воспроизводить статистическое самоподобие и учитывать геометрическую сложность профиля даже при ограниченном числе исходных точек.

Заключение. В работе разработан и исследован метод фрактальной интерполяции нерегулярных данных на основе систем итерируемых функций в сочетании с генетическим алгоритмом оптимизации параметров. В отличие от традиционных методов, ориентированных на гладкие аппроксимации, предложенный подход позволяет моделировать внутреннюю структуру сигнала, включая его стохастическую и самоподобную природу.

Ключевым результатом является выявление и устранение эффекта аппроксимационной неустойчивости, возникающего при обработке данных с высокой изменчивостью. Предложенная стратегия сегментации профиля на монотонные участки позволила существенно стабилизировать процесс оптимизации и исключить паразитные выбросы аттрактора.

Проведённые численные эксперименты показали, что интеграция IFS и генетического алгоритма формирует универсальный инструмент для моделирования сложных геометрических структур, превосходящий классические методы по способности сохранять морфологические особенности данных.

Разработанный подход может быть применён в задачах геоинформационного анализа, компьютерной графики, обработки сигналов и моделирования природных объектов.

Список использованных источников:

1. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension / B. Mandelbrot // Science. – 1967. – Vol. 156, № 3775. –, P. 636 –638.

2. Barnsley M. Fractals Everywhere / M. Barnsley. – San Diego : Academic Press, 1993. – 533 p.

3. Морозов, А.Д. Введение в теорию фракталов / А.А. Морозов. – М. : Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.

4. David E. Goldberg Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning / Goldberg E. David. – Massachusetts : Academic Press, 1989. – 432 p.

5. Fractal Polynomial Interpolation / M. A. Navascués // Zeitschrift fur Analysis und ihre Anwendungen. – 2005. – Vol. 25, № 2. – , P. 401–418.

UDC 530.191

ITERATED FUNCTION SYSTEMS IN INTERPOLATION PROBLEMS

Savinov A.V., Avramenka R. A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Anisimov V.Ya. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This paper explores the capabilities of fractal interpolation using a genetic algorithm. The study demonstrates the advantages of this approach for modeling complex systems that extend beyond the framework of traditional Euclidean geometry.

Keywords. Fractals, genetic algorithm, IFS, attractor, interpolation, complex systems, affine transformation, numerical analysis, systems modeling.

УДК 004.89:004.7

РАСШИРЕНИЕ КОНТЕКСТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПОСРЕДСТВОМ ПРОТОКОЛА MODEL CONTEXT PROTOCOL (MCP)

Маслаков С. А, студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. - канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье представлен подробный анализ Model Context Protocol (MCP) — открытого стандарта, разработанного для стандартизации взаимодействия больших языковых моделей (LLM) с внешними источниками данных. Рассматриваются принципы архитектурной схемы «Хост-Клиент-Сервер», механизмы передачи данных, использующие процедурный протокол JSON-RPC 2.0, а также особенности применения технологии потоковой передачи Server-Sent Events (SSE) для достижения высокой реактивности системы. Детально описывается полный итеративный цикл вызова внешних инструментов (Tool Calling) и процедура обратной инъекции полученных результатов в контекст модели для формирования окончательного ответа.

Ключевые слова. Model Context Protocol, MCP, JSON-RPC, LLM, контекстное обучение, вызов функций, архитектура ИИ-агентов.

Введение. Современный этап развития больших языковых моделей (LLM) столкнулся с фундаментальной проблемой: изоляцией ядра модели от актуальных данных и специализированных программных средств. Привычные методы интеграции требуют разработки уникальных адаптеров для каждого программного интерфейса (API), что закономерно ведет к фрагментации экосистемы и усложнению процесса разработки. Решением данной проблемы призван стать Model Context Protocol (MCP) — открытый стандарт, обеспечивающий ИИ-приложениям возможность бесшовного подключения к разнообразным внешним системам, от локальных файловых систем до распределенных облачных сервисов.

Архитектурная модель MCP. Протокол MCP использует трехуровневую архитектуру, гарантирующую необходимую гибкость и масштабируемость для построения сложных агентских систем. Структура включает следующие ключевые компоненты:

Хост (Host). Представляет собой исполняющую среду или приложение (например, интегрированную среду разработки (IDE) или специализированные ИИ-агенты), которому требуется доступ к внешним данным или функционалу. Хост выступает инициатором рабочей сессии и контролирует права доступа.

Клиент (Client). Является промежуточным слоем, встроенным в хост, и устанавливает прямое соединение формата «один-к-одному» с MCP-сервером. Основная задача Клиента — преобразование высокоуровневых запросов от LLM в стандартизованные сообщения протокола.

Сервер (Server). Это автономный программный модуль, который предоставляет специфические функциональные возможности. В зависимости от реализации, Сервер может обеспечивать доступ к локальным файлам, выполнять поисковые запросы или взаимодействовать с API внешних сервисов, таких как GitHub. Такая модульная архитектура (Рисунок 1) позволяет строго разграничить логику принятия решений (LLM) и логику получения и обработки данных, что значительно упрощает обслуживание и замену отдельных элементов системы.

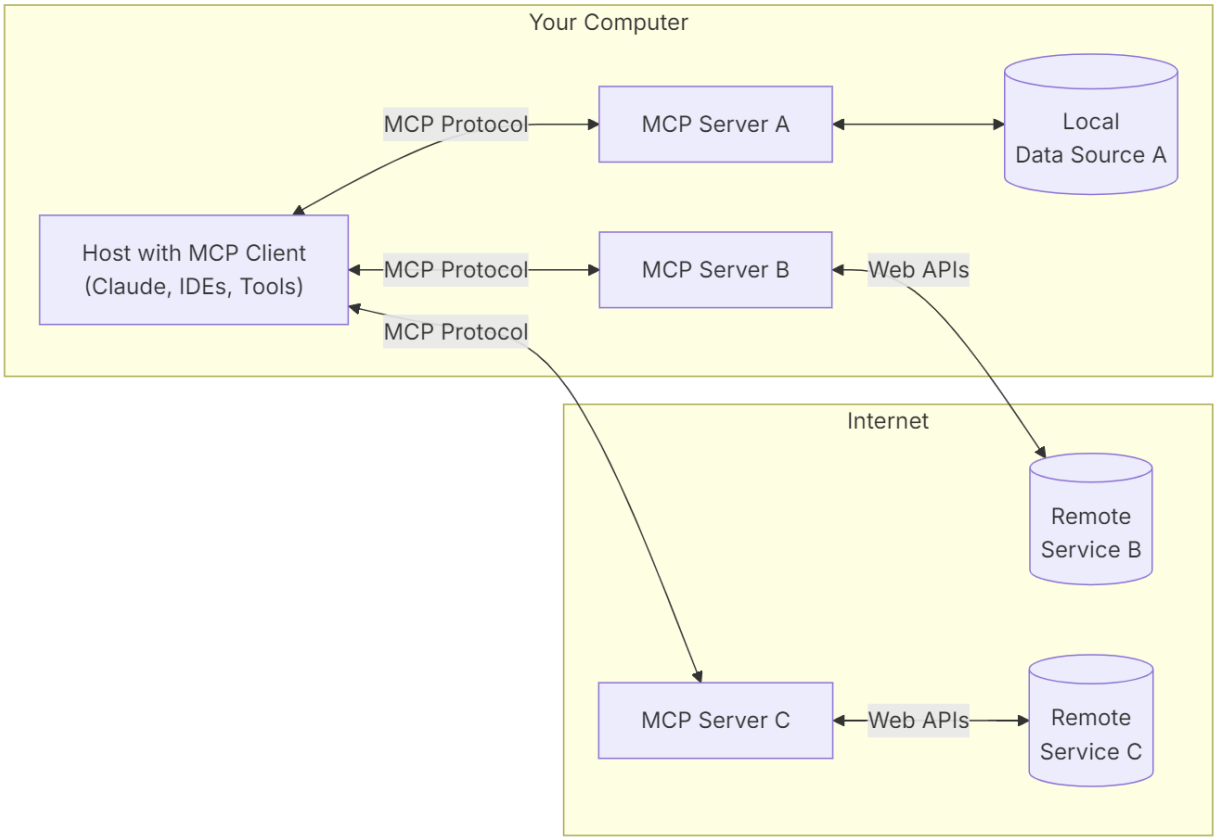


Рисунок 1 — Схема взаимодействия Host, Client и Server

Стек протоколов и передача данных. Основой для обмена сообщениями в MCP служит протокол удаленного вызова процедур JSON-RPC 2.0. Выбор данного протокола обусловлен его ориентацией на вызов процедур. В отличие от протоколов, оперирующих ресурсами (например, REST), JSON-RPC непосредственно сфокусирован на вызове методов, или «инструментов» в контексте LLM, что идеально соответствует парадигме Tool Calling. JSON-RPC обеспечивает надежный и структурированный обмен данными, где каждое сообщение запроса содержит поля «method» и «params», а ответ — «result» или «error».

Транспортный уровень MCP поддерживает два ключевых режима передачи данных. Первый, Stdio (использование стандартных потоков ввода-вывода), используется преимущественно для локальных серверов, работающих на той же машине, что и хост. Второй, более важный для распределенных сред, — Streamable HTTP, базирующийся на технологии Server-Sent Events (SSE). Технология SSE дает возможность серверу передавать данные клиенту в реальном времени через одно открытое HTTP-соединение. Это критически важно для длительных и ресурсоемких операций, таких как анализ больших объемов информации. Благодаря SSE, результат выполнения инструмента может поступать фрагментами, позволяя оркестратору LLM начать обработку контекста и формирование предварительного ответа до полного завершения процедуры.

Жизненный цикл соединения и типы сообщений. Взаимодействие Клиента и Сервера MCP начинается с обязательной фазы инициализации. Клиент отправляет запрос initialize, содержащий версию протокола и перечень своих возможностей (например, поддержка публикации логов). Сервер в ответ предоставляет полную спецификацию своих возможностей: список доступных инструментов (tools), шаблонов подсказок (prompts) и ресурсов (resources). Стандартный обмен сообщениями начинается только после того, как Сервер отправляет уведомление initialized, подтверждая свою готовность.

Спецификация MCP определяет три категории сообщений, циркулирующих между компонентами:

1. Requests: Сообщения, которые требуют обязательного ответа от получателя, например, прямой вызов определенного инструмента.
2. Responses: Содержат результат успешного выполнения запроса или подробное описание сбоя с кодом ошибки.

3. Notifications: Односторонние сообщения информационного характера, не требующие подтверждения. Примером может служить уведомление об изменении состояния внешнего файла, доступного агенту.
4. Механизм Tool Calling и интеграция с LLM

Механизм вызова инструментов является ключевой особенностью MCP, трансформирующей LLM из пассивного текстового генератора в активный, функционально нагруженный агент. Процесс Tool Calling через MCP API представляет собой итеративный цикл, состоящий из четырех последовательных этапов.

Стадия 1: Регистрация возможностей. На этом этапе оркестратор, управляющий моделью, при каждом новом запросе передает ей набор описаний доступных инструментов. Эти описания представлены в стандартизированном формате JSON Schema и включают имя инструмента, его описание, а также строгую структуру требуемых параметров.

Стадия 2: Генерация вызова. Если в процессе обработки запроса пользователя модель определяет необходимость получения внешних актуальных данных (например, для ответа на вопрос о погоде), она прекращает генерацию текста. Вместо этого модель формирует структурированный объект tool_calls с уникальным идентификатором вызова (ID) и аргументами, необходимыми для исполнения выбранного инструмента (Рисунок 2) .

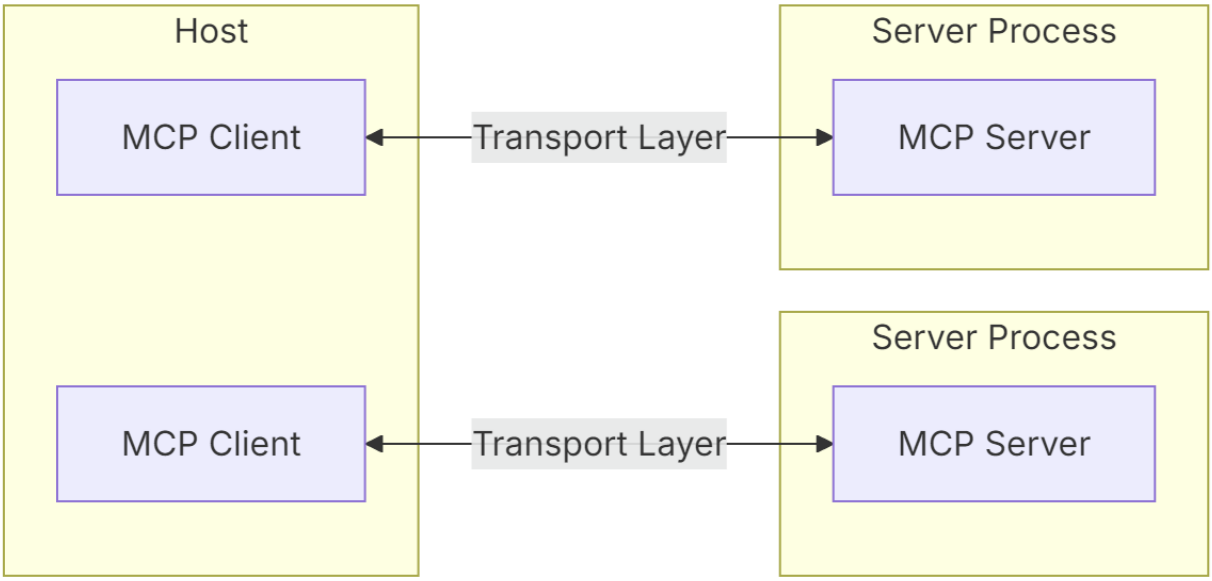


Рисунок 2 — Схема итерационного цикла Tool Calling

Стадия 3: Исполнение и инъекция (Output Injection). Сгенерированный вызов инструмента перехватывается внешним оркестратором. Оркестратор инициирует процедуру вызова соответствующего MCP-сервера, который выполняет фактическое действие (например, отправляет запрос на метеорологический API) и возвращает результат. Полученные данные (к примеру, JSON-объект с температурой и осадками) не направляются напрямую пользователю. Вместо этого они инъецируются обратно в контекст LLM с особой ролью tool и ссылкой на уникальный ID исходного вызова. Этот процесс, известный как «Output Injection», расширяет контекстное окно модели актуальной информацией.

Стадия 4: Финальная генерация. На финальном этапе модель повторно анализирует весь расширенный контекст, который теперь включает не только исходный запрос пользователя, но и полученные от инструмента данные. Основываясь на этой полной информации, модель формирует естественный, семантически корректный и информативный ответ для пользователя.

Структура и безопасность инструментов. Каждый инструмент, определенный в рамках MCP, дополняется аннотациями, которые повышают безопасность и эффективность его использования моделью. Аннотация readOnlyHint используется для указания на то, что инструмент не изменяет состояние внешней системы (например, поисковый запрос), что делает его безопасным для многократных вызовов. В то же время, аннотация destructiveHint служит предупреждением о потенциально необратимых действиях (например, удаление данных). Наличие этой аннотации позволяет оркестратору или пользовательскому интерфейсу запрашивать дополнительное подтверждение перед исполнением инструмента, что является важным элементом безопасности.

Заключение. Model Context Protocol устанавливает новый унифицированный стандарт для экосистемы искусственного интеллекта, обеспечивая стандартизированную и бесшовную интеграцию LLM с внешним информационным пространством. Использование процедурного JSON-RPC в сочетании с технологией потоковой передачи SSE обеспечивает высокую реактивность системы, четкую структуру обмена данными и способность эффективно обрабатывать длительные операции. Итеративный механизм Tool Calling, подробно описанный в спецификации, позволяет создавать сложные автономные ИИ-агенты, способные оперировать актуальной информацией в режиме реального времени. Внедрение MCP в образовательные, исследовательские и промышленные проекты позволит существенно снизить затраты на разработку интеллектуальных интерфейсов и повысить их функциональность.

Список использованных источников:

1. *MCP Specification [Electronic resource]. – Mode of access: – Date of access: 23.12.2025.*
2. *JSON-RPC 2.0 Specification [Electronic resource]. – Mode of access: – Date of access: 23.12.2025.*
3. *Badenkov, A.V. Development of AI agents based on function calling / A.V. Badenkov // Journal of Artificial Intelligence Systems. – 2024. – №3. – P. 45–52.*

UDC 004.89:004.7

EXTENDING CONTEXTUAL CAPABILITIES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE THROUGH THE MODEL CONTEXT PROTOCOL (MCP)

Maslakov S. A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Zhvakina A.V. – PhD in Technical Sciences

Annotation. This article presents a detailed analysis of the Model Context Protocol (MCP)—an open standard developed to standardize the interaction of large-scale language models (LLM) with external data sources. It examines the principles of the Host-Client-Server architectural scheme, data transfer mechanisms using the JSON-RPC 2.0 procedural protocol, and the application of Server-Sent Events (SSE) streaming technology to achieve high system responsiveness. The full iterative cycle of external tool calling and the procedure for injecting the obtained results back into the model context to generate the final answer are described in detail.

Keywords. Model Context Protocol, MCP, JSON-RPC, LLM, contextual learning, function invocation, AI agent architecture.

УДК 004.65

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОПУЛЯРНЫХ РЕЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Бахмат А.М., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ популярных реляционных систем управления базами данных: Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server и PostgreSQL. Анализ проводится на основе технических характеристик этих СУБД и объективных статистических показателей, включающих данные рейтинга DB‑Engines, отражающего популярность СУБД, а также количество вакансий на рынке труда, в которых указывается знание конкретной технологии. На основе проведённого анализа сформулированы выводы о целесообразности применения каждой СУБД в различных классах информационных систем.

Ключевые слова. СУБД, реляционные базы данных, Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, рейтинг DB‑Engines, востребованность на рынке труда, статистический анализ.

Реляционные системы управления базами данных являются фундаментальным компонентом современных информационных систем, обеспечивая структурированный способ хранения, обработки и управления данными. Суть реляционной модели заключается в организации данных в виде таблиц с чётко определёнными отношениями между ними, что обеспечивает целостность данных и поддерживает концепции транзакционной обработки, необходимые для корпоративных и критически важных приложений.

Даже на фоне роста интереса к NoSQL‑технологиям, классические реляционные СУБД продолжают занимать ведущие позиции по популярности и востребованности среди разработчиков и заказчиков систем. Это отражено в регулярных рейтингах отраслевых аналитических платформ, где классические реляционные системы традиционно занимают верхние позиции.

Целью данной работы является сравнительный анализ четырёх наиболее популярных реляционных СУБД – Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server и PostgreSQL – на основе их архитектурных особенностей, а также объективных статистических показателей, включающих популярность в профессиональном сообществе и востребованность на рынке труда.

Для проведения сравнительного анализа были отобраны четыре реляционные СУБД, занимающие ведущие позиции в DB‑Engines Ranking – рейтинге, формируемом на основе совокупной оценки популярности систем управления базами данных. Этот рейтинг учитывает множество параметров: количество упоминаний СУБД в поисковых системах, активность обсуждений на технических форумах, частоту запросов в Google Trends, количество вакансий, а также наличие профилей специалистов с указанными навыками в профессиональных сетях. Данные рейтинга представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные рейтинга DB‑Engines на январь 2026 года

СУБД	Позиция в рейтинге	Score (показатель популярности)
Oracle	1	1237.34
MySQL	2	867.52
Microsoft SQL Server	3	706.26
PostgreSQL	4	666.27

Oracle – это корпоративная реляционная система управления базами данных, предназначенная для обработки больших объёмов данных и сложных транзакций. Она отличается развитой архитектурой, поддержкой кластеризации и масштабирования, а также широким набором инструментов для резервного копирования, отказоустойчивости и безопасности. Oracle широко используется в крупных корпоративных информационных системах, в том числе в банковском, государственном и телеком-сегментах.

MySQL – реляционная СУБД, известная своей простотой и эффективностью. Она широко используется в веб-разработке, стартапах и проектах малого и среднего бизнеса благодаря низкой стоимости владения, широкому сообществу и большому количеству готовых решений. Сам продукт технически распространяется как open‑source ПО под лицензией General Public License (GPL), что означает, что исходный код доступен и может использоваться бесплатно при соблюдении условий этой

лицензии. Однако MySQL также доступен по коммерческой лицензии. Если разработчик или организация не хотят, чтобы их приложение, использующее MySQL, подчинялось условиям GPL (например, они хотят сохранить свой код закрытым), им необходимо приобрести коммерческую лицензию. Подобная модель лицензирования – когда один и тот же продукт предлагается под GPL и под отдельной коммерческой лицензией – называется dual licensing.

Microsoft SQL Server – коммерческая реляционная СУБД, разработанная корпорацией Microsoft. Отличается глубокой интеграцией с продуктами Microsoft и облачной платформой Azure, предоставляет развитые инструменты для аналитики, управления и бизнес‑интеллекта, что делает её популярной в корпоративной среде.

PostgreSQL – реляционная СУБД с открытым исходным кодом, известная строгой поддержкой стандартов SQL и расширяемой архитектурой. Поддержка сложных типов данных, процедурных языков, репликации и JSON‑типов делает PostgreSQL универсальным инструментом для широкого спектра задач, от веб‑сервисов до аналитических приложений.

Для оценки востребованности навыков работы с конкретными СУБД были собраны данные о количестве вакансий в Беларуси, в которых указание знаний соответствующей системы является обязательным требованием. Источниками послужили rabota.by и belmeta.com. Данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Количество вакансий в Беларуси с требованиями к знанию СУБД на январь 2026 года

	rabota.by	belmeta.com
Oracle	49	18
MySQL	122	47
Microsoft SQL Server	102	39
PostgreSQL	152	50

На основании собранной статистики PostgreSQL демонстрирует наибольший спрос среди работодателей, что может свидетельствовать о росте интереса к нему в профессиональной среде и использовании в текущих ИТ‑проектах. MySQL и Microsoft SQL Server также показывают высокий уровень востребованности, тогда как Oracle имеет сравнительно меньшее число вакансий, что может отражать специфику применения этой СУБД в более узких корпоративных сегментах.

График изменения рейтинговых значений популярных реляционных СУБД за период с 2013 г. по 2026 г. представлен на рисунке 1.

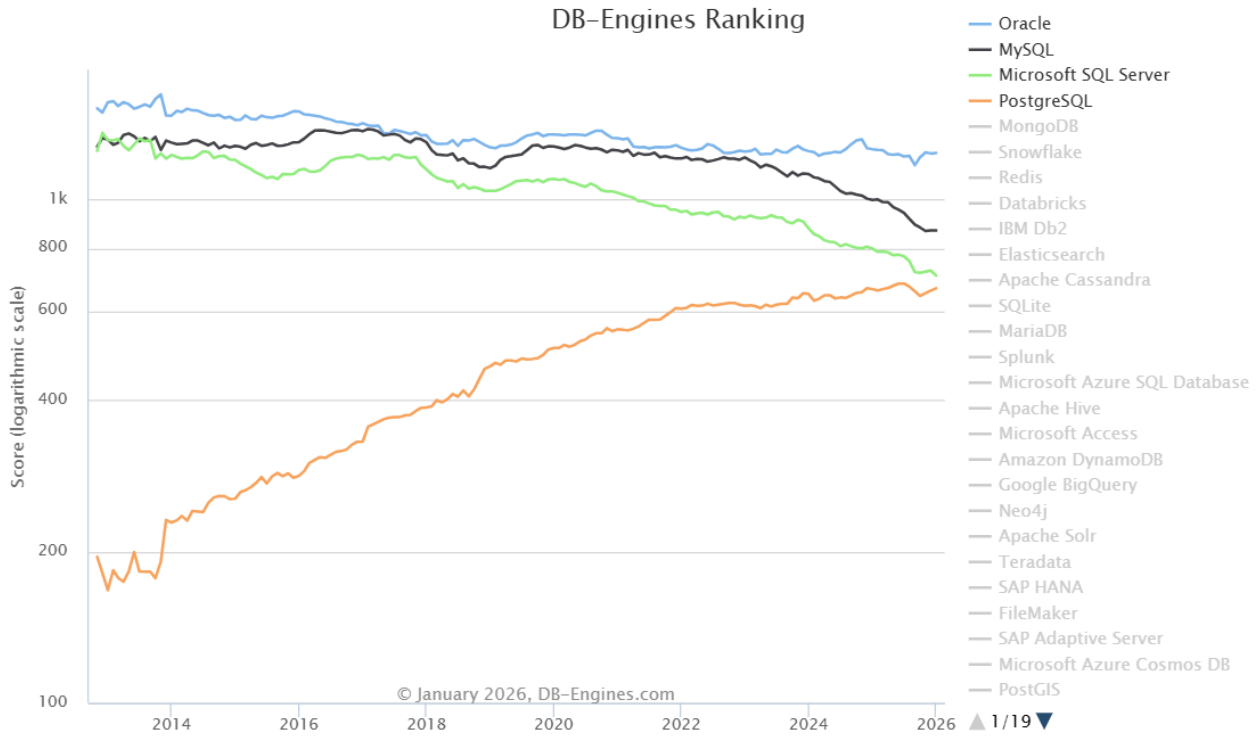


Рисунок 1 – Изменение рейтинговых значений популярных реляционных СУБД (Oracle, MySQL, Microsoft SQL Server, PostgreSQL) по данным DB‑Engines за период с 2013 г. по 2026 г.

Графический анализ позволяет наблюдать долгосрочные тренды. Как видно на графике, Oracle Database, MySQL и Microsoft SQL Server, занимавшие ведущие позиции в рейтинге на ранних этапах, демонстрируют постепенное снижение абсолютных значений показателя популярности за рассматриваемый период. PostgreSQL, напротив, показывает стабильный рост популярности с каждым годом, что отражает растущий интерес к этой СУБД среди разработчиков, профессионального сообщества и владельцев проектов. Такие изменения свидетельствуют о сдвиге интересов в сторону открытых, гибких и современных решений.

Проведённый сравнительный анализ показывает, что Oracle, MySQL, Microsoft SQL Server и PostgreSQL продолжают занимать ведущие позиции среди реляционных СУБД, оставаясь востребованными и широко используемыми технологиями.

Анализ рейтинга DB‑Engines демонстрирует, что за период с 2013 г. по 2026 г. значения показателя популярности систем Oracle, MySQL и Microsoft SQL Server имеют тенденцию к незначительному снижению, тогда как PostgreSQL стабильно растёт, отражая усиливающийся интерес профессионального сообщества к этой СУБД. Это указывает на изменение предпочтений разработчиков в сторону решений с открытым исходным кодом и расширяемой архитектурой, характерных для PostgreSQL.

Данные о вакансиях на рынке труда Беларуси также подтверждают высокую востребованность PostgreSQL, опережающего остальные системы по числу предложений, тогда как MySQL и Microsoft SQL Server сохраняют значимый спрос. Сравнительно меньшее количество вакансий с требованием знаний Oracle может отражать специфику его применения в узкоспециализированных корпоративных средах.

Таким образом, в условиях современных требований к гибкости, расширяемости и сообществу поддержки PostgreSQL выглядит наиболее перспективным выбором для широкого круга проектов, тогда как Oracle, MySQL и Microsoft SQL Server остаются актуальными в своих классических областях применения, особенно в корпоративных и legacy‑системах.

Список использованных источников:

1. DB-Engines ranking – popularity ranking of database management systems [Electronic resource]. – Mode of access: https://db-engines.com/en/ranking. – Date of access: 02.01.2026.

2. Database Comparasion: Oracle bs SQLServer vs PostreSQL vs MySQL [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.chinesepowered.com/tutorials/database-comparison-oracle-vs-sql-server-vs-postgresql-vs-mysql. – Date of access: 02.01.2026.

UDC 004.65

COMPARATIVE ANALYSIS OF POPULAR RELATIONAL DATABASE MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON STATISTICAL INDICATORS

Bakhmat A.M, student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Zhvakina A.V. – PhD in Technical Sciences

Annotation. The work presents a comparative analysis of popular relational database management systems: Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server and PostgreSQL. The analysis is based on the technical characteristics of these databases and objective statistical indicators, including data from the DB‑Engines rating, reflecting the popularity of the database, as well as the number of vacancies in the labor market, which indicate knowledge of a particular technology. Based on the analysis, conclusions are formulated about the expediency of using each DBMS in various classes of information systems.

Keywords. DBMS, relational databases, Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, DB‑Engines rating, demand in the labor market, statistical analysis.

УДК 519.853.62

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ МЕТОДА ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА НА МОДЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЯХ

Ануфриева Е.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлетроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.- мат. наук, доцент

Аннотация. Проведено численное исследование сходимости метода градиентного спуска на модельных функциях с различными свойствами гладкости и выпуклости. Проанализировано влияние числа обусловленности на скорость сходимости и траекторию метода. Построена визуализация итерационных процессов с использованием Python и NumPy.

Ключевые слова. Градиентный спуск, минимизация функций, численные методы оптимизации, сходимость итерационных методов, число обусловленности, выпуклые функции, функция Розенброка, безусловная оптимизация, скорость сходимости, вычислительный эксперимент, машинное обучение, итерационные алгоритмы.

Задачи минимизации функций многих переменных занимают особое место в современном математическом анализе и его приложениях. Они возникают при решении систем нелинейных уравнений, вариационном исчислении, математическом моделировании физических процессов, а также в методах машинного обучения. Среди других способов решения задач метод градиентного спуска является базовым алгоритмом [1, с. 52–58]. Несмотря на простоту реализации и низкие вычислительные затраты на одну итерацию, вопрос о скорости сходимости и устойчивости метода остается критически важным для практического применения [2, с. 15–20].

Целью работы является численное исследование сходимости метода градиентного спуска на модельных функциях с различными свойствами гладкости и выпуклости. Особое внимание уделяется анализу влияния числа обусловленности задачи на скорость убывания градиента и траекторию движения в точку минимума.

Для достижения цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ теоретических условий сходимости метода градиентного спуска для вогнутых функций.
2. Выбор набора модельных функций, обладающих различными свойствами обусловленности.
3. Проведение вычислительного эксперимента для построения итерационных последовательностей и оценка скорости сходимости на каждом этапе.
4. Сравнение полученных численных результатов с теоретическими оценками скорости сходимости.

Рассматривается задача безусловной минимизации дифференцируемой функции $f: R^n \to R$:

$$f(x) \to min, x \in R^n, \tag{1}$$

где функция f ограничена снизу и обладает непрерывными частными производными первого порядка.

Метод градиентного спуска строит последовательность приближений $\{x^k\}_{k=0}^{\infty}$ по правилу [6, 4:07]:

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - a_k \frac{\partial f(x^{(k)})}{\partial x_i},\ k = 0,1,2,\dots,n;\ i = 1,2,\dots,n, \tag{2}$$

где $\nabla f(x_k) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^T \epsilon R^n$ - градиент функции в точке x^k, указывающий направление наискорейшего роста функции; $a_k > 0$ – параметр шага, определяющий длину перемещения вдоль антиградиента.

Метод градиентного спуска является одним из наиболее распространённых алгоритмов оптимизации. однако его практическая эффективность напрямую зависит от свойств минимизируемой функции и выбора параметров алгоритма. для обоснования применимости метода и оценки скорости его сходимости сформулируем следующую теорему, устанавливающую достаточные условия сходимости для вогнутых функций с липшицевым градиентом

Теорема (о сходимости метода градиентного спуска). Пусть функция f: r^n→r удовлетворяет следующим условиям: 1) функция f(x) является выпуклой вниз на некотором интервале (рис. 1), то есть для любых значений аргумента x,y∈r^n и для любого числа t∈[0,1] имеет место неравенство Йенсена

$$f(tx + (1-t)y) \leq tf(x) + (1-t)f(y); \quad (3)$$

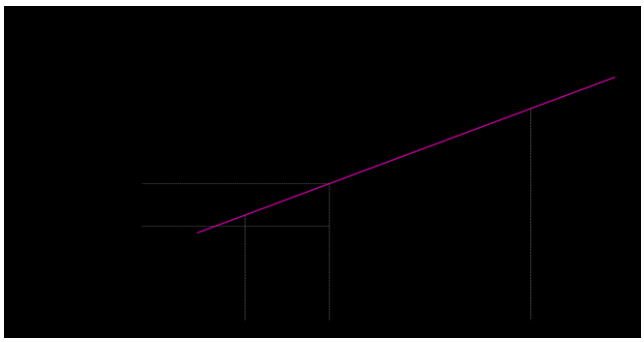


Рисунок 1 – График вогнутой функции, определяющаяся неравенством Йенсена

2) Градиент функции f(x) удовлетворяет условию липшица, то есть существует такая положительная константа l, что для любых точек x,y из отрезка [a,b] выполняется [1, с. 89] неравенство

$$|f(x) - f(y)| \leq L|x - y|; \quad (4)$$

3) Постоянный шаг a_k выбирается из интервала $(2/L)$. Тогда метод градиентного спуска (2) сходится к стационарной точке x^*, в которой $\nabla f(x^*) = 0$, при этом для значения функции справедлива оценка:

$$f(x_k) - f(x^*) \leq \left(1 - \frac{\mu}{L}\right)^k [f(x_0) - f(x^*)]. \quad (5)$$

Число k, определяемое из условия

$$k = \frac{L}{\mu} \geq 1, \quad (6)$$

называется числом обусловленности задачи и определяет скорость сходимости: чем больше k, тем медленнее сходимость [3, p. 45].

Таблица 1 составлена на основе принципа «от простого к сложному» и включает три класса функций, которые позволяют всесторонне исследовать свойства метода градиентного спуска. Первой выбрана простейшая квадратичная функция (сфера) $f(x) = |x|^2$. Линии уровня представляют собой концентрические окружности. Число обусловленности для неё равно единице. Эта функция служит базовым случаем, на котором градиентный спуск демонстрирует наилучшее поведение, сходясь к минимуму по прямой траектории за минимальное число итераций.

Вторая функция — квадратичный овраг $f(x) = x_1^2 + kx_2^2$ при $k \gg 1$. Оставаясь вогнутой, функция имеет линии уровня в виде сильно вытянутых эллипсов. На такой функции наглядно проявляется главный недостаток градиентного спуска: при большом k метод движется «зигзагом», перпендикулярно дну оврага, что приводит к замедлению сходимости.

Третьей выбрана функция Розенброка. Это невыпуклая функция со сложным ландшафтом, имеющая узкую параболическую долину, для которой x_1 и x_2 — координаты входного вектора $x = (x_1, x_2)$, то есть две независимые переменные, по которым находится минимум функции. Глобальный минимум располагается внутри этого оврага. Данная функция позволяет проверить метод в условиях, близких к реальным задачам оптимизации: алгоритм должен сначала быстро попасть в овраг, а затем медленно двигаться по его дну в точку минимума.

Таблица 1 – Функции и их свойства

Функция	Формула	Свойства	Цель исследования
Квадратичная (сфера)	$f(x) = \|x\|^2$	Сильно вогнута, $\kappa = 1$	Базовый случай быстрой сходимости
Квадратичная (овраг)	$f(x) = x_1^2 + kx_2^2$, $k \gg 1$	Вогнута	Влияние числа обусловленности на траекторию
Розенброка	$f(x) = (1 - x_1)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2$	Сложный ландшафт	Поведение метода в "овражных" функциях

Рассмотрим задачу поиска минимума функции $f(x, y)$, моделирующей рельеф морского дна, где

- сокровище — точка глобального минимума $x^* = \text{argmin} f(x)$;
- лодка — текущее приближение $x_k = (x_к, y_k)^T$;
- туман — отсутствие глобальной информации о функции; лодка «ощущает» только локальный наклон (градиент);
- компас — вектор антиградиента $\nabla f(x_k)$, указывающий направление наискорейшего спуска;
- длина шага — параметр a_k, определяющий расстояние перемещения за одну итерацию.

Движение лодки описывается дискретной динамической системой:

- $$\begin{pmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} - a_k \begin{pmatrix} \frac{df}{dx}(x_k, y_k) \\ \frac{df}{dy}(x_k, y_k) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

На рисунке 2 представлены линии уровня функции $f(x) = x_1^2 + 10x_2^2$. На рисунке 3 изображена поверхность данной функции. На рисунке 4 представлен график погрешности функции.

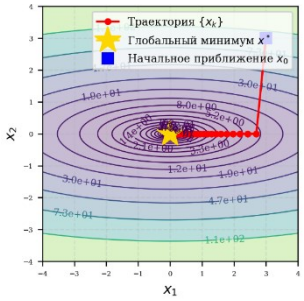


Рисунок 2 – Линии уровня функции $f(x) = x_1^2 + 10x_2^2$

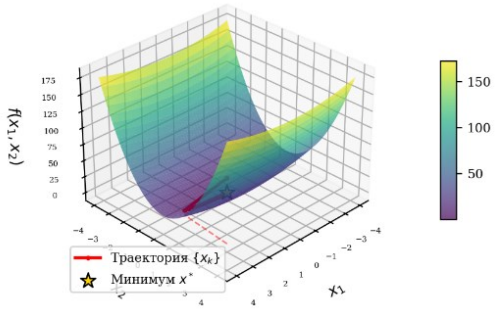


Рисунок 3 – Поверхность $f(x_1, x_2)$ с траекторией спуска

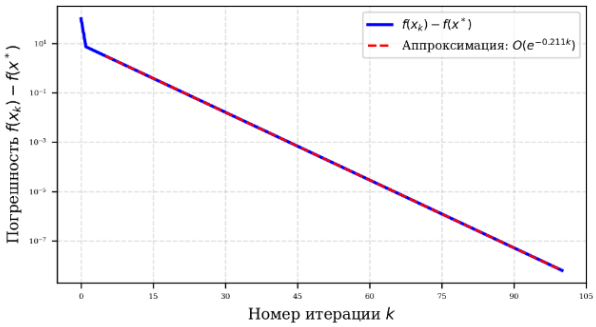


Рисунок 4 – График логарифмической погрешности

Проведем вычислительный эксперимент:

- Критерий остановки: $\|\nabla f(x_k)\| < \varepsilon$ или $|f(x_{k+1}) - f(x_k)| < \varepsilon$, где $\varepsilon = 10^{-6}$.

• Параметры: Фиксированный шаг $a = 0{,}1$ начальная точка $x_0 = (3{,}3)^T$.

Рассмотрим функцию $f(x) = x_1^2 + kx_2^2$. Рисунок 5 показывает различные поведения функции при различных числах обусловленности. На рисунке 6 изображены поверхности функции при $k = 1$ и $k = 10$. На рисунке 7 изображена скорость сходимости метода градиентного спуска при различных $k = 1$ и шаге $k = 10$. На рисунке 8 изображены профили функции. В таблице 2 представлены траектории градиентного спуска для различных значений числа обусловленности.

Таблица 2 – Траектории градиентного спуска для различных значений

k (число обусловленности)	Число итераций до сходимости	Наблюдение
1 (сфера)	~15	Прямая траектория к минимуму
10	~45	Слабые колебания
100 (овраг)	>200	Выраженный зигзаг, медленная сходимость

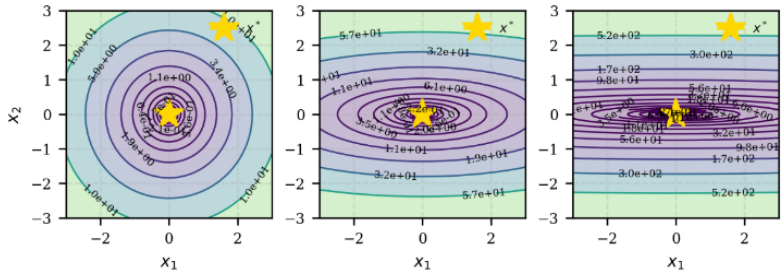


Рисунок 5 – Поверхность $f(x) = x_1^2 + kx_2^2$ при разных k

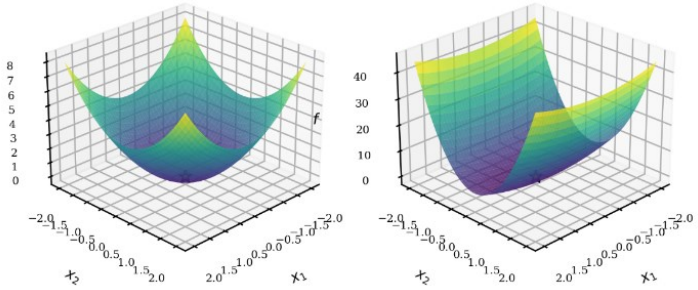


Рисунок 6 – Поверхность $f(x_1x_2)$ при $k = 1$ и $k = 10$

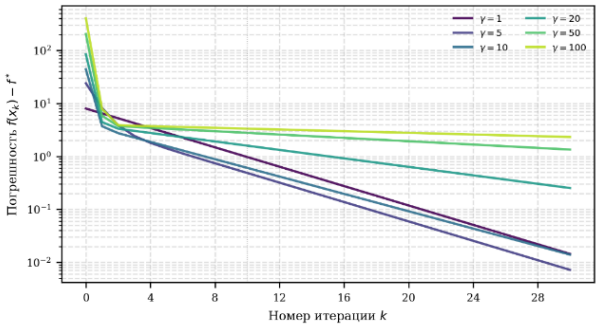


Рисунок 7 – Влияние k на скорость сходимости при $a = 0.050$

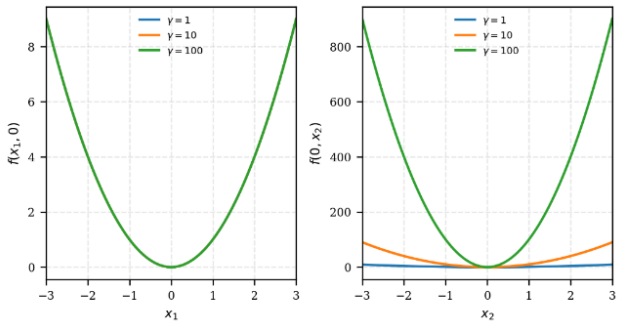


Рисунок 8 – Профили функции $f(x_1, x_2) = x_1^2 + kx_2^2$

Для функции Розенброка метод демонстрирует типичное «застревание» в овраге: после быстрого попадания в узкую долину сходимость вдоль дна оврага становится крайне медленной из-за малого градиента в направлении к минимуму. На рисунке 9 изображен график функции Розенброка. На рисунке 10 отображена сходимость градиентного спуска на функции Розенброка.

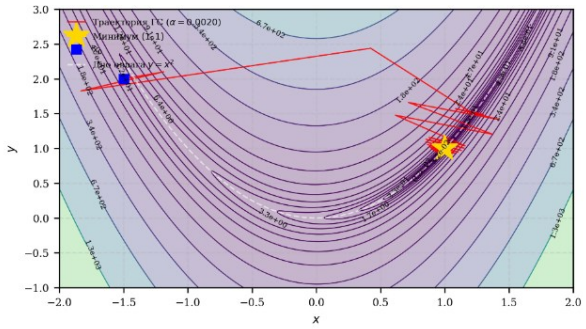


Рисунок 9 – График функции Розенброка

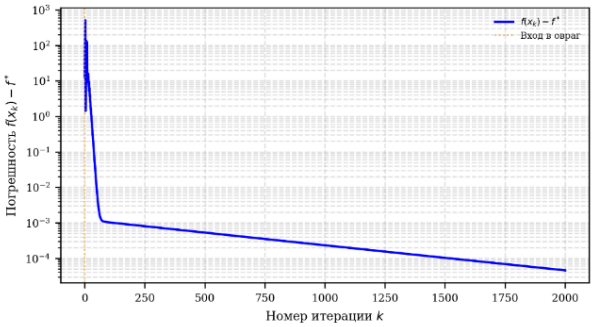


Рисунок 10 – Сходимость градиентного спуска на функции Розенброка

В ходе выполнения работы проведено численное исследование сходимости классического метода градиентного спуска на классе модельных функций. На основе анализа полученных результатов можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Подтверждение теоретических оценок сходимости.

Экспериментально доказана зависимость скорости сходимости метода от числа обусловленности к задачи минимизации. Для квадратичной функции $f(x) = x_1^2 + kx_2^2$ установлено, что количество итераций, необходимых для достижения заданной точности ε, растёт пропорционально k, что находится в полном согласии с теоретической асимптотической оценкой $O\big(k\log(1/\varepsilon)\big)$ для сильно вогнутых функций с липшицевым градиентом [1, с. 95].

Влияние геометрии функции на динамику метода.

Визуализация траекторий на функциях овражного типа (в частности, функции Розенброка) продемонстрировала характерный двухфазный характер сходимости:

• Первый этап: на начальном участке наблюдается быстрое убывание функции, так как метод движется к дну оврага в области с большими значениями градиента.

• Второй этап: при приближении к точке минимума сходимость существенно замедляется. это

связано с тем, что вдоль дна оврага градиент становится очень малым, а сам рельеф характеризуется сильной вытянутостью.

2. Важность выбора параметра шага.

Установлено, что устойчивость итерационного процесса $x^{k+1} = x^k - a_k \nabla f(x^k)$ существенно зависит от величины шага α. Превышение верхнего порога $\alpha > 2/L$ приводит к расходимости или колебательному режиму, тогда как выбор чрезмерно малого a влечёт неоправданное увеличение вычислительных затрат. Это обосновывает необходимость применения адаптивных стратегий выбора шага или методов с перестройкой метрики.

3. Ограничения метода на невыпуклых задачах.

На примере функции Розенброка показано, что в отсутствие глобальной выпуклости метод градиентного спуска не гарантирует попадания в глобальный минимум и может сходиться к локальным экстремумам или седловым точкам, где $\nabla f(x^*) = 0$. Это ограничивает применимость базового алгоритма в задачах глобальной оптимизации без модификаций (стохастизация, методы второго порядка).

Результаты работы систематизируют данные о поведении градиентного спуска на тестовых функциях и предоставляют наглядную иллюстрацию абстрактных понятий выпуклого анализа. Новизна работы заключается в систематизации данных о поведении метода градиентного спуска на конкретных функциях и визуализации зависимости скорости сходимости от геометрических свойств ландшафта функции потерь. Разработанный вычислительный эксперимент может быть использован в учебном процессе для демонстрации связи между геометрией и динамикой итерационных методов.

Проведённое исследование открывает различные направления для развития работы. Во-первых, сравнительный анализ градиентного спуска с методами второго порядка, такими как метод Ньютона или BFGS. Во-вторых, актуальным является исследование стохастических модификаций (SGD) и адаптивных алгоритмов (Adam, RMSprop) при работе с данными, что особенно важно для задач машинного обучения. В-третьих, применение методов предобуславливания может существенно улучшить сходимость на плохо обусловленных задачах, снизив влияние высокого числа обусловленности на скорость работы алгоритма. Реализация этих направлений позволит расширить область применимости градиентных методов и повысить их эффективность в практических задачах.

Список использованных источников:

1. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Поляк Б.Т. – Изд-во Моск. ун-та: Наука, 1983. – 386с.

2. Воронцова Е.А. Методы выпуклой оптимизации [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Воронцова Е.А. – Изд-во Моск. ун-та: МФТИ, 2021. – 364с.

3. Numerical Optimization [Электронный ресурс] / Jorge Nocedal, Stephen Wright. – Second Edition. – Springer-Verlag New York, 2006. – Электронные данные. – Режим доступа: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-0-387-40065-5.pdf – Дата доступа: 06.03.2026

4. An automatic method for finding the greatest or least value of a function [Электронный ресурс] / H. H. Rosenbrock // The Computer Journal. – 1960. – Vol. 3, № 3. – P. 175–184. – Электронные данные. – Режим доступа: https://academic.oup.com/comjnl/article-abstract/3/3/175/345501 – Дата доступа: 12.03.2026

5. Array programming with NumPy [Электронный ресурс] / Charles R. Harris [et al.] // Nature. – 2020. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2 – Дата доступа: 13.03.2026

UDC 519.853.62

NUMERICAL STUDY OF THE CONVERGENCE OF THE GRADIENT DESCENT METHOD ON MODEL FUNCTIONS

Anufrieva E.V., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. A numerical study of the convergence of the gradient descent method on model functions with different properties of smoothness and convexity is carried out. The influence of the conditioning number on the convergence rate and trajectory of the method is analyzed. Visualizations of iterative processes using Python and NumPy are built.

Keywords. Gradient descent, minimization of functions, numerical optimization methods, convergence of iterative methods, conditionality number, convex functions, Rosenbrock function, unconditional optimization, convergence rate, computational experiment, machine learning, iterative algorithms.

УДК 519.853.62:004.032.26

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ: ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОРАНГОВОЙ СТРУКТУРЫ ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА

Венско В.В., Якуть А.Ю., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.- мат. наук, доцент

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию структуры матриц весов, возникающей в процессе обучения многослойного перцептрона. Выдвинута гипотеза об убывании эффективного ранга матриц весов в процессе обучения методом градиентного спуска. Для проверки гипотезы обучена полносвязная нейронная сеть (MLP) на наборе данных MNIST с помощью библиотеки PyTorch; на каждой эпохе вычислялся эффективный ранг матриц весов для разных функций активации. Полученные результаты подтверждают гипотезу и демонстрируют устойчивую тенденцию к снижению эффективного ранга.

Ключевые слова. Нейронные сети, сингулярное разложение, эффективный ранг, энтропия Шеннона, градиентный спуск, MLP, ReLU, GELU.

Современные нейронные сети содержат миллиарды и триллионы параметров, однако ряд исследований указывает на то, что обучение фактически происходит в пространстве значительно меньшей размерности. Данное явление, называемое низкоранговой динамикой обучения, имеет важные практические следствия, поскольку может частично объяснять эффективность низкоранговых методов параметризации и адаптации, таких как LoRA (Low-Rank Adaptation).

В работе Xu et. al. [1, с. 6] показано, что при обучении двухслойной нейросети с гладкими функциями активации изменения весов фактически происходят в пространстве небольшой размерности – порядка $2K$, где K – число классов. Однако данные данные факты верны при определённых условиях инициализации и процессе обучения.

Целью данной работы – экспериментально исследовать динамику эффективного ранга матриц весов при обучении MLP в условиях, когда предпосылки описываемые в работе Xu et. al. [1] не выполнены: нарушены гладкость активации, двухслойность архитектуры, вид функции потерь и тип алгоритма оптимизации. Математическим аппаратом исследования служат сингулярное разложение матриц, понятие эффективного ранга и энтропия Шеннона.

Сравнивается динамика обучения при использовании недифференцируемой функции активации ReLU с гладкими дифференцируемыми функциями активации. Математическими инструментами исследования являются метод сингулярного разложения матриц, теория ранга и энтропия информационных систем.

Выдвигается следующая гипотеза: при обучении многослойного перцептрона на наборе данных MNIST эффективный ранг весовых матриц имеет тенденцию к снижению по мере обучения, причём наиболее заметно данное снижение проявляется в ранних слоях сети. Для проверки гипотезы будем использовать понятие эффективного ранга матриц [2].

Математический аппарат и постановка задачи. Пусть $W \in \mathbb{R}^{m \times n}$ – матрица весов линейного слоя нейронной сети в момент времени (эпохи) t. Матрица весов W задаёт линейный оператор

$$W\colon \mathbb{R}^{n} \to \mathbb{R}^{m}.$$

Размерность образа этого оператора равна рангу матрицы W, то есть

$$\dim(\mathrm{Im}W) = \mathrm{rank}(W).$$

Для анализа спектральной структуры матрицы весов используется сингулярное разложение (SVD – singular value decomposition).

Теорема (о сингулярном разложении) [3]. Для любой вещественной матрицы $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ существует разложение

$$A = U\Sigma V^{T},$$

где $U \in \mathbb{R}^{m \times m}$ и $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – ортогональные матрицы; $\Sigma \in \mathbb{R}^{m \times n}$ – прямоугольная диагональная матрица с элементами $\sigma_1 \geq \cdots \geq \sigma_i \geq \cdots \geq \sigma_r \geq 0$ на главной диагонали, где $r = \mathrm{rank}(A)$. Числа σ_i

называются сингулярными числами матрицы A, столбцы U – левыми, столбцы V – правыми сингулярными векторами.

Геометрически сингулярное разложение означает, что любой линейный оператор, задаваемый матрицей W, допускает разложение в три последовательных действия: поворот в исходном пространстве, масштабирование, поворот в целевом пространстве.

Матрицу W можно записать в виде суммы матриц ранга 1 [3]

$$W = \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \cdots + \sigma_r u_r v_r^T = \sum_{i=1}^{r} \sigma_i u_i v_i^T .$$

Каждое слагаемое $\sigma_i u_i v_i^T$ представляет собой матрицу единичного ранга, вклад которой в суммарное преобразование пропорционален числу σ_i. Если первые k сингулярных чисел значительно превосходят остальные сингулярные числа $\sigma_{k+1} \approx 0$, то матрица W хорошо аппроксимируется усечённым разложением вида [3]:

$$W \approx W_k = \sum_{i=1}^{k} \sigma_i u_i v_i^T , \quad \operatorname{rank}(W_k) = k \ll \operatorname{rank}(W).$$

Ранг матрицы является дискретной характеристикой, потому что он может быть равен только целым неотрицательным числам. В реальных матрицах весов нейронных сетей, возникающих в результате обучения, все сингулярные числа ненулевые. Однако часть из них зачастую пренебрежимо мала по сравнению с другими. Существует мера, оценивающая не только факт неравенства нулю сингулярных чисел, но их относительную величину. Для количественной оценки концентрации сингулярного спектра используется понятие эффективного ранга, введённое Роем и Веттерли [2]. Пусть $\sigma_1 \geq \cdots \geq \sigma_i \geq \cdots \geq \sigma_r > 0$ – ненулевые сингулярные числа матрицы W. Определим нормированное распределение вероятностей:

$$p_i = \frac{\sigma_i}{\sum_{j=1}^{r} \sigma_j}, \quad i = 1, \ldots, r.$$

Обозначим через $\operatorname{erank}(W)$ эффективный ранг матрицы W. Тогда эффективный ранг матрицы W определяется как:

$$\operatorname{erank}(W) = e^{\left(-\sum_{j=1}^{r} p_i \ln p_i\right)} = e^{H(p)},$$

где $H(p)$ – энтропия Шеннона [4, с. 80] нормированного спектрального распределения. Величина $\operatorname{erank}(W)$ принимает значения $[1, r]$: значение $\operatorname{erank}(W) = r$ соответствует равномерному распределению сингулярных чисел, значение $\operatorname{erank}(W) \approx 1$ – случаю, когда единственное сингулярное число доминирует над остальными.

Рассмотрим двухслойную нейронную сеть:

$$f(X) = W_2 \varphi(W_1 X), \quad W_1 \in \mathbb{R}^{m \times d}, \quad W_2 \in \mathbb{R}^{K \times m},$$

где $X \in \mathbb{R}^{d \times N}$ – матрица входных данных (d – мерные векторы, N объектов), $Y \in \mathbb{R}^{K \times m}$ – матрица меток, K – число классов, φ – функция активации. В процессе обучения подбираются матрицы весов W_1, W_2, минимизирующие функцию потерь (например, среднеквадратичную ошибку):

$$\min_{W_1} \mathcal{L}(W_1) = \frac{1}{2} \| f_{W_1}(X) - Y \|_F^2 .$$

Вычислим градиент $\mathcal{L}$ по W_1 методом обратного распространения ошибки (backpropagation). Обозначим:

$$\Delta_2 = W_2 \varphi(W_1 X) - Y \in \mathbb{R}^{K \times N},$$

$$\Delta_1 = W_2^T \Delta_2 \odot \varphi'(W_1 X) \in \mathbb{R}^{m \times N},$$

где $\odot$ означает поэлементное произведение, а φ' – производную функции активации. Тогда

$$G_1 = \nabla_{W_1}\mathcal{L} = \Delta_1 X^T = \left(W_2^T \Delta_2 \odot \varphi'(W_1 X)\right) X^T.$$

Обучение ведётся градиентным спуском по функции потерь по формуле:

$$W_1(t+1) = W_1(t) - \eta \cdot G_1(t).$$

Методология эксперимента.

Обучение нейросети производится на наборе данных MNIST. MNIST содержит 70000 размеченных изображений рукописных цифр (60000 обучающих и 10000 тестовых), каждое размером 28 × 28 пикселей в градациях серого (рис. 1).

Рисунок 1 – Примеры изображений из набора данных MNIST

Каждое изображение разворачивалось в вектор $x \in \mathbb{R}^{784}$, нормирующийся по формуле:

$$X_{\text{norm}} = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad \mu = 0.1307, \quad \sigma = 0.3081,$$

при этом используется нейронная сеть (многослойный перцептрон) архитектуры $784 \to 512 \to 256 \to 128 \to 10$ с функцией активации ReLU между скрытыми слоями. Каждый линейный слой задается матрицей весов вида:

$$W^{(1)} \in \mathbb{R}^{512\times 784}, \quad W^{(2)} \in \mathbb{R}^{256\times 512}, \quad W^{(3)} \in \mathbb{R}^{128\times 256}, \quad W^{(4)} \in \mathbb{R}^{10\times 128}.$$

Отсюда ранги матриц удовлетворяют условиям

$$\mathrm{rank}\left(W^{(1)}\right) \le 512, \quad \mathrm{rank}\left(W^{(2)}\right) \le 256, \quad \mathrm{rank}\left(W^{(3)}\right) \le 128, \quad \mathrm{rank}\left(W^{(4)}\right) \le 10.$$

Такие же ограничения области значений будет иметь и эффективный ранг.

Обучение велось оптимизатором Adam с шагом $\eta = 0.001$ с функцией потерь CrossEntropyLoss в течение 50 эпох, размер мини-батча – 256. Зафиксировано начальное зерно генератора случайных чисел со значением 42. На каждой эпохе t для каждой весовой матрицы W выполнялись следующие шаги:

Шаг 1. Вычисление сингулярных чисел: $\sigma_i = \mathrm{svdvals}(W) \in \mathbb{R}^n$, $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \ldots \ge \sigma_n \ge 0$.

Шаг 2. Фильтрация: удаление $\sigma_i < 10^{-10}$ во избежание численных погрешностей при вычислении логарифма.

Шаг 3. Нормировка:

$$p_i = \sigma_i / \sum_j^n \sigma_j.$$

Шаг 4. Расчёт энтропии:

$$H = -\sum_i^n p_i \ln p_i.$$

Шаг 5. Оценка эффективного ранга:

$$\mathrm{erank}(W) = exp(H).$$

Реализация эксперимента производилась на языке программирования Python с использованием библиотеки PyTorch. Функция библиотеки PyTorch linalg.svdvals вычисляет сингулярные числа без построения полного SVD-разложения, что обеспечивает эффективность вычислений.

Результаты эксперимента.

На рисунке 2 представлена динамика эффективного ранга ($\mathrm{erank}(W(t))$) для всех четырёх слоёв в зависимости от номера эпохи $t = 1, \ldots, 50$. Наблюдается тенденция к убыванию эффективного ранга во всех слоях, что подтверждает гипотезу. За 50 эпох обучения достигается точность классификации 98,4% на тестовой выборке, модель достигает сходимости.

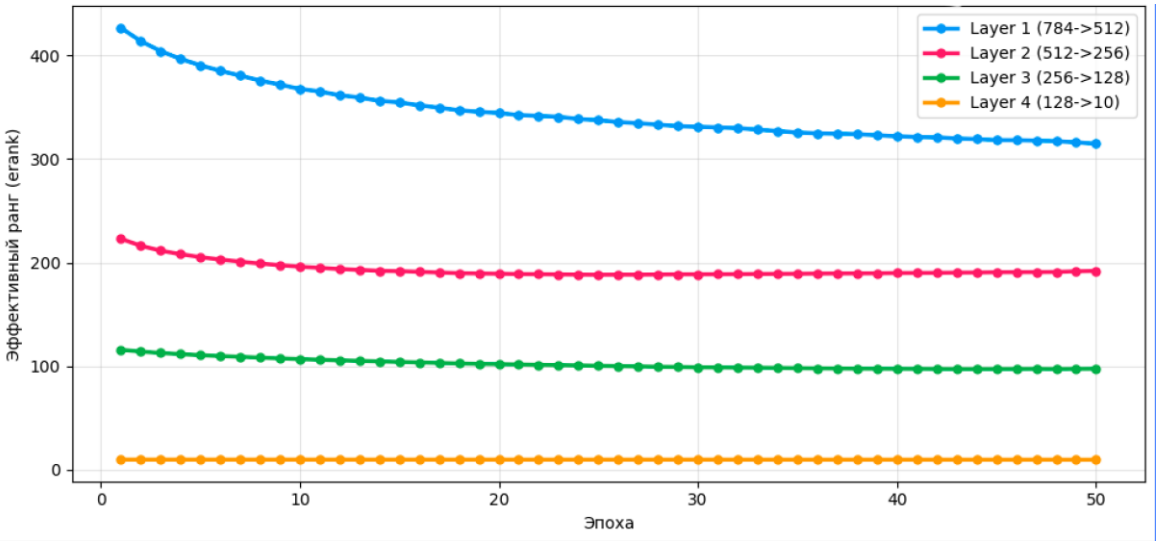


Рисунок 2 – Динамика эффективного ранга весовых матриц в процессе обучения с разными функциями активации.

В таблице 1 приведены значения эффективного ранга, отношения эффективного ранга к максимальному возможному после 50 эпох обучения.

Таблица 1 – Эффективный ранг матриц после 50 эпох обучения

Слой	макс. Ранг	Erank	erank/max_rank
$784 \rightarrow 512$	512	314.7	61.46
$512 \rightarrow 256$	256	192.7	75.27
$256 \rightarrow 128$	128	97.3	76.01
$128 \rightarrow 10$	10	9.8	98.00

В матрицах весов, особенно ранних слоёв, выделяется малое количество значимых сингулярных чисел, тогда как остальные стремятся к нулю. На первом слое (784→512) максимально возможный ранг равен 512, а эффективный ранг составил 314.7 – отношение $\mathrm{erank}(W^{(1)})/\mathrm{max_rank}(W^{(1)}) = 0.615$ указывает на значительную неравномерность сингулярного спектра. Следует подчеркнуть, что это отношение характеризует концентрацию сингулярных чисел.

Для последнего слоя $(128 \rightarrow 10)$ $\mathrm{erank}(W^{(4)}) = 9.8 \approx 10$ объясняется архитектурным ограничением: $\mathrm{rank}(W^{(4)}) \leq \min(128, 10) = 10$, а теоретический максимум $\mathrm{erank}(W^{(4)})$ при этом ранге равен ровно 10. Поскольку последний слой непосредственно осуществляет разделение объектов на 10 классов, высокая величина эффективного ранга в этом случае не противоречит общей гипотезе. Напротив, она показывает, что снижение эффективного ранга выражено неодинаково в разных частях сети и сильнее проявляется в ранних слоях.

На рисунке 3 представлена тепловая карта нормированных сингулярных чисел. Характерный «обрыв» в распределении сингулярных чисел в ранних слоях указывает на сосредоточение преобразования в низкоразмерном подпространстве.

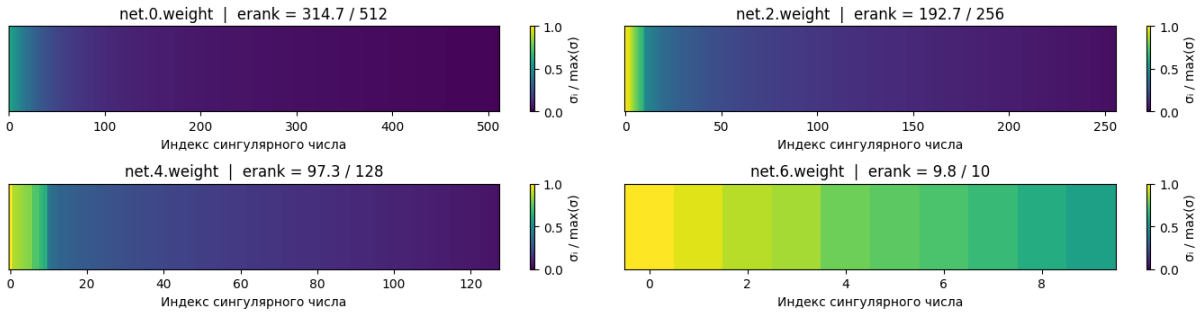


Рисунок 3 – Тепловая карта распределения сингулярных чисел

Обратим внимание, что в нашем эксперименте используется функция активации ReLU, формально не удовлетворяющая условию гладкости функции. Тем не менее, согласно Xu et. al. [1], явление низкоранговой динамики приближенно сохраняется и для негладких активаций. Поскольку исходная теория обновления весов [1] связана с гладкими функциями, сравним эксперимент с другими функциями активации библиотеки PyTorch: tanh, sigmoid, GELU.

При обучении MLP с использованием гладких функций активации (гиперболический тангенс, сигмоида, GELU) наблюдается такое же явление – эффективный ранг имеет тенденцию к снижению. В силу задания функций активации ReLU и GELU эффективный ранг изменяется по схожей траектории. Можно построить графики и заметить, что они неограниченно близко приближаются к друг другу при аргументе стремящемся к бесконечности. Динамика эффективного ранга первого слоя для всех четырёх активаций показана на рисунке 4.

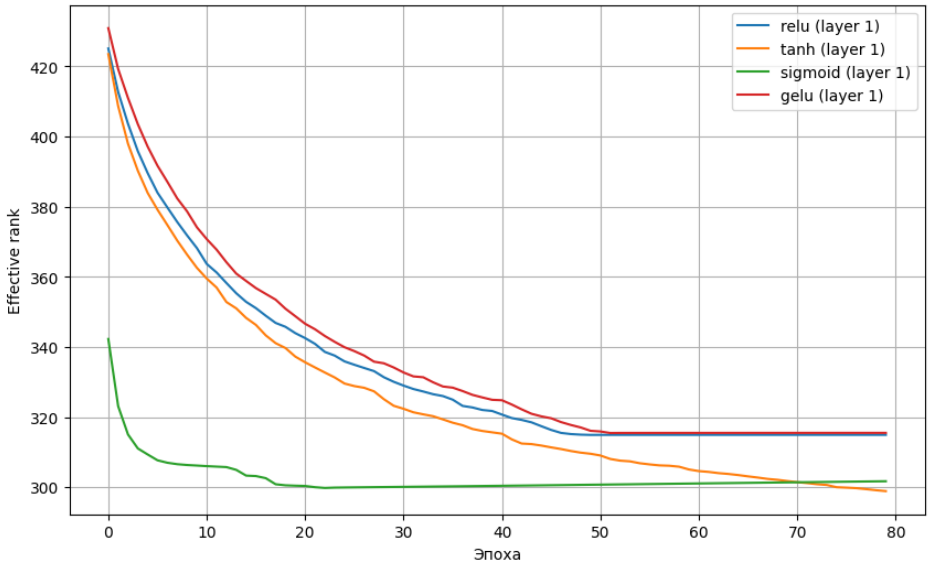


Рисунок 4 – динамика снижения эффективного ранга матриц первого слоя разных функций активации

Таким образом, в данной работе проведено экспериментальное исследование низкоранговой структуры, возникающей в процессе обучения многослойного перцептрона (MLP). Выдвинутая гипотеза подтверждается экспериментально: эффективный ранг снижается во всех слоях сети в процессе обучения методом градиентного спуска. Наиболее выраженное снижение наблюдается в ранних слоях большой размерности: первый слой (784→512) задействует лишь 61.46% своего пространства.

Практическим следствием дальнейшего изучения темы ранговых свойств градиентного спуска и весовых матриц является эффективность низкоранговых методов инициализации таких, как LoRA (Low-Rank Adaptation). Поскольку обучение фактически происходит в низкоразмерном подпространстве [1], явное ограничение ранга при правильной инициализации позволяет достигать сопоставимого качества при существенно меньшем числе параметров.

Перспективные направления дальнейшей работы: прямое измерение $\mathrm{erank}(\mathrm{W}(\mathrm{T}) - \mathrm{W}(0))$, увеличение числа независимых запусков с различными seed, повторение эксперимента на других архитектурах (CNN, Transformer) и наборах данных (CIFAR-10, Fashion-MNIST).

Список использованных источников.

1. Emergent Low-Rank Training Dynamics in MLPs with Smooth Activations / A. S. Xu, C. Yaras, M. Asato [et al.]. – 2026. – URL: https://arxiv.org/abs/2602.06208 (date of access: 09.02.2026).

2. Roy, O. The effective rank: a measure of effective dimensionality / O. Roy, M. Vetterli // EUSIPCO 2007 : proc. of the 15th Europ. signal processing conf., Poznan, 3–7 Sept. 2007. – Poznan, 2007. – P. 606–610.

3. Воеводин, В. В. Матрицы и вычисления / В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. – М. : Наука, 1984. – 318 с.

4. Чумак, О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных / О. В. Чумак. – М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» : Ин-т компьютер. исслед., 2011. – 164 с.

5. MNIST Digit Recognition Challenge // Kaggle. – URL: https://www.kaggle.com/competitions/exploretechla-ignite-digit-recognition-challenge (date of access: 09.02.2026).

UDC 519.853.62:004.032.26

SPECTRAL ANALYSIS OF NEURAL NETWORK TRAINING DYNAMICS: INVESTIGATING THE LOW-RANK STRUCTURE OF GRADIENT DESCENT

Vensko V.V. Yakut A.Y., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus
Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This work is devoted to studying the structure of weight matrices arising during the training of a multilayer perceptron. A hypothesis is proposed that the effective rank of weight matrices decreases during training by gradient descent. To test the hypothesis, a fully connected neural network (MLP) was trained on the MNIST dataset using the PyTorch library; at each epoch, the effective rank of the weight matrices was computed for different activation functions. The obtained results confirm the hypothesis and demonstrate a steady trend toward a decrease in the effective rank.

Keywords. Neural networks, singular value decomposition, effective rank, Shannon entropy, gradient descent, MLP, ReLU, GELU.

УДК 517.581:004.928

ЧИСЛЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МЕТОДОВ ИНТЕГРИРОВАНИЯ В КОМПЬЮТЕРНЫХ ИГРАХ

Визгин А.П., Финевич А.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной работе рассматривается численная стабильность различных методов интегрирования, применяемых для решения уравнений движения в физических симуляциях компьютерных игр. Анализируются методы Эйлера и Рунге-Кутта на примере моделирования динамики твердых тел под действием внешних сил. Выполнено сравнение точности и устойчивости методов, представлены графики поведения системы.

Ключевые слова. Дифференциальные уравнения, численные методы интегрирования, метод Эйлера, метод Рунге-Кутта, устойчивость алгоритма, физическая симуляция, компьютерные игры.

В процессе разработки компьютерных игр возникает необходимость симуляции движущихся объектов. Как правило, движение происходит в соответствии с законами физики. Моделирование этих законов называют физической симуляцией. Одной из основных задач физической симуляции является нахождение траектории движения тела, и следовательно, его координат в фиксированный момент времени.

Рассмотрим некоторую физическую систему, состоящую из одного тела массы m и сил, действующих на него. Тогда тело движется ускоренно и, согласно *второму закону Ньютона,* справедливо равенство:

$$\vec{a} = \frac{1}{m}\vec{F}, \tag{1}$$

где $\vec{a}$ – вектор ускорения тела; $\vec{F}$ – вектор равнодействующей силы. Полагая, что проекции векторов $\vec{a}$ и $\vec{F}$ на ось Ox равны a_x и F_x соответственно, запишем (1) в виде дифференциального уравнения:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}F_x. \tag{2}$$

Аналогичным образом можно получить уравнения движения тела вдоль других осей. Таким образом, векторное равенство (1) определяет систему дифференциальных уравнений. Нахождение траектории движения тела сводится к решению этой системы. Существует бесконечное множество таких решений, искомое решение выделяют с помощью дополнительных условий, которым оно должно удовлетворять. В зависимости от вида таких условий рассматривают три типа задач. Однако мы остановим внимание на задаче с начальными условиями (*задаче Коши*), поскольку именно она играет ключевую роль при моделировании физики в компьютерных играх.

В общем случае найти аналитическое решение уравнения (1) не представляется возможным из-за сложного взаимодействия сил, поэтому применяются различные методы численного интегрирования. Среди них мы рассмотрим наиболее известные: метод Эйлера и Рунге-Кутта 4 порядка.

Метод, использующий известное состояние системы для вычисления следующего состояния напрямую, называют явным. Метод Эйлера (*метод ломаных*) является простейшим явным одношаговым методом [3]. Пусть дана функция $y(t)$ и ее производная $y'(t) = f(t, y(t))$. Выберем значение $h > 0$ для каждого шага вдоль оси t, тогда $t_{n+1} = t_n + h$. Метод Эйлера позволяет вычислить величину y_{n+1} по формуле:

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n). \tag{3}$$

В качестве объекта исследования возьмем систему из груза массы $m = 1$ кг, прикрепленного к пружине жесткости $k = 3$ Н/м и движущегося вдоль оси Ox. Начальную координату и скорость выберем как $x_0 = 3$ м и $v_0 = 2$ м/с. Систему можно описать уравнением *гармонического осциллятора* [1, с. 398]:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx. \tag{4}$$

Перепишем уравнение (4) как систему двух уравнений вида (3), одно из которых соответствует координате груза, а другое – его скорости:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + \Delta t v_n, \\ v_{n+1} = v_n + \Delta t(-\omega^2)x_n. \end{cases} \tag{5}$$

Уравнения системы (5) называются *разностными*. Такую систему можно записать в матричной форме: $u_{n+1} = Au_n$. Численная стабильность напрямую зависит от собственных значений матрицы A, используемой для перехода от шага n к шагу $n+1$. Покажем, что явный метод Эйлера не дает стабильного результата при интегрировании уравнения (4), то есть при стремлении n к бесконечности.

Теорема [2, с. 235]. *Разностное уравнение $u_{n+1} = Au_n$ устойчиво и $u_n \to 0$, если $|\lambda_i| < 1$ для всех собственных значений, нейтрально устойчиво и вектор u_n ограничен при всех $|\lambda_i| \leq 1$ и неустойчиво (u_n неограничен), если хотя бы одно собственное значение матрицы A удовлетворяет условию $|\lambda_i| > 1$.*

Применим теорему для системы (5) в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ v_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t \\ -\Delta t\omega^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n \\ v_n \end{pmatrix}, \tag{6}$$

где Δt – величина шага; ω^2 – квадрат циклической частоты пружины, вычисляемый как k/m. Для нахождения собственных значений матрицы A, воспользуемся ее *характеристическим уравнением* [2, с. 217]:

$$det(A - \lambda E) = 0, \tag{7}$$

где E – единичная матрица; λ – собственное значение A. Тогда *характеристический многочлен* матрицы A имеет вид:

$$\lambda^2 - 2\lambda + 1 + (\Delta t\omega)^2. \tag{8}$$

Найдя корни многочлена (8), получим собственные значения $\lambda_{1,2} = 1 \pm i\Delta t\omega$. Их модули совпадают и строго больше единицы $|\lambda_1| = |\lambda_2| = \sqrt{1 + (\Delta t\omega)^2} > 1$, а, значит, уравнение (6) неустойчиво.

Практика показывает, что для многих физических систем явный метод Эйлера неустойчив. Стабильной альтернативой выступает симплектический метод Эйлера. Достаточно лишь поменять порядок интегрирования: скорость на следующем шаге должна быть вычислена до координаты. Тогда энергия рассматриваемой системы будет колебаться около ожидаемого значения, а не экспоненциально возрастать (*рис. 1*).

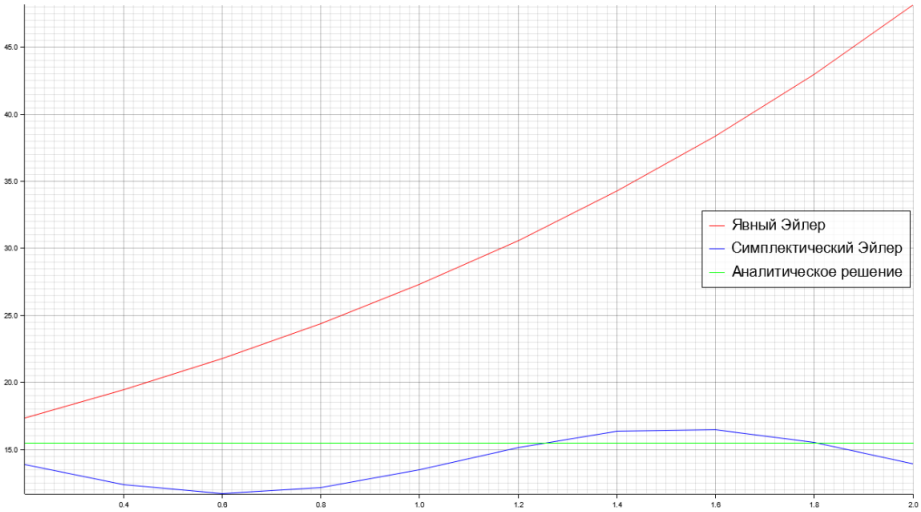


Рисунок 1 – Зависимость полной энергии системы E от времени t на участке 0-2 секунды с шагом $\Delta t = 0.2\text{c}$, $n = 10$

Рассмотрим наиболее точный метод – Рунге-Кутта четвертого порядка. Его точность обусловлена вычислением на каждом шаге четырех коэффициентов наклона в разных точках отрезка $[t_n; t_{n+1}]$, тогда как метод Эйлера вычисляет всего один коэффициент наклона. Формулируется метод Рунге-Кутта точно так же, как и метод Эйлера, однако вместо формулы (3) имеет место [3] следующее равенство:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \tag{9}$$

где $k_1 = f(t_n, y_n)$; $k_2 = f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + k_1\frac{h}{2})$; $k_3 = f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + k_2\frac{h}{2})$; $k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3)$. Полученные нами графики (*рис. 2*) демонстрируют результат использования численных интеграторов, рассмотренных в статье:

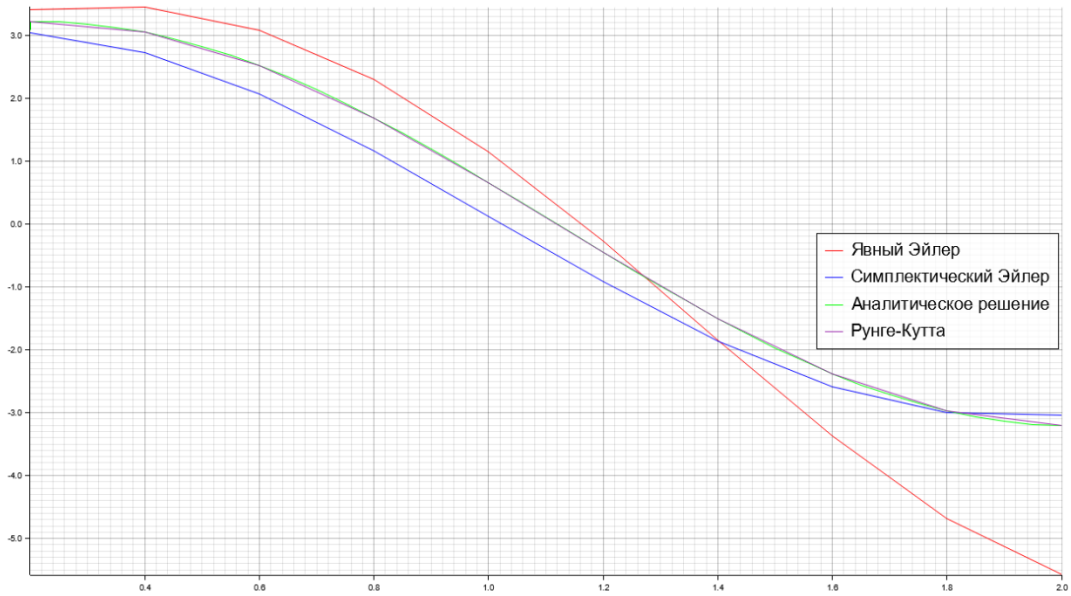


Рисунок 2 – Зависимость координаты груза x от времени t на участке 0-2 секунды с шагом $\Delta t = 0.2\text{c}$, $n = 10$

Явный метод Эйлера не дает желаемого решения и постепенно расходится, однако его симплектическая разновидность показывает хорошую точность с малыми затратами на вычисления. Метод Рунге-Кутта является несомненным лидером по точности с большими затратами на вычисления. При выборе интегратора необходимо искать баланс между вычислительной стоимостью и точностью алгоритма. Эти требования обусловлены сложностью игровых сцен, на которых могут располагаться сотни объектов, и малой величиной шага – она соответствует частоте обновления экрана (обычно 60-144 Гц).

Рисунки 3 и 4 иллюстрируют эффективность написанной нами программной реализации симплектического метода Эйлера и метода Рунге-Кутта на языке программирования *Rust (2024 edition)*. Для оценки эффективности (*бенчмарков*) была использована библиотека *criterion.* Голубой линией на графиках обозначено среднее время выполнения итерации алгоритма. Закрашенная область соответствует плотности вероятности того, что одна итерация займет определенное время.

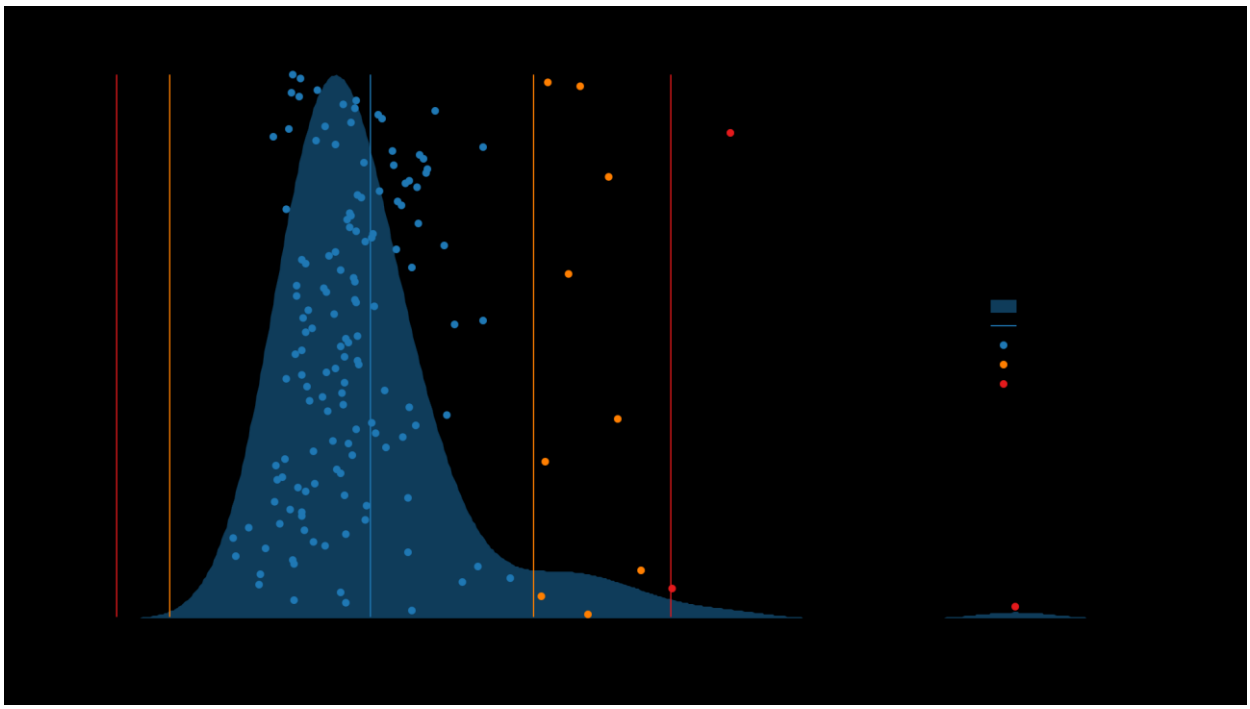


Рисунок 3 – Результаты бенчмарка для метода Рунге-Кутта

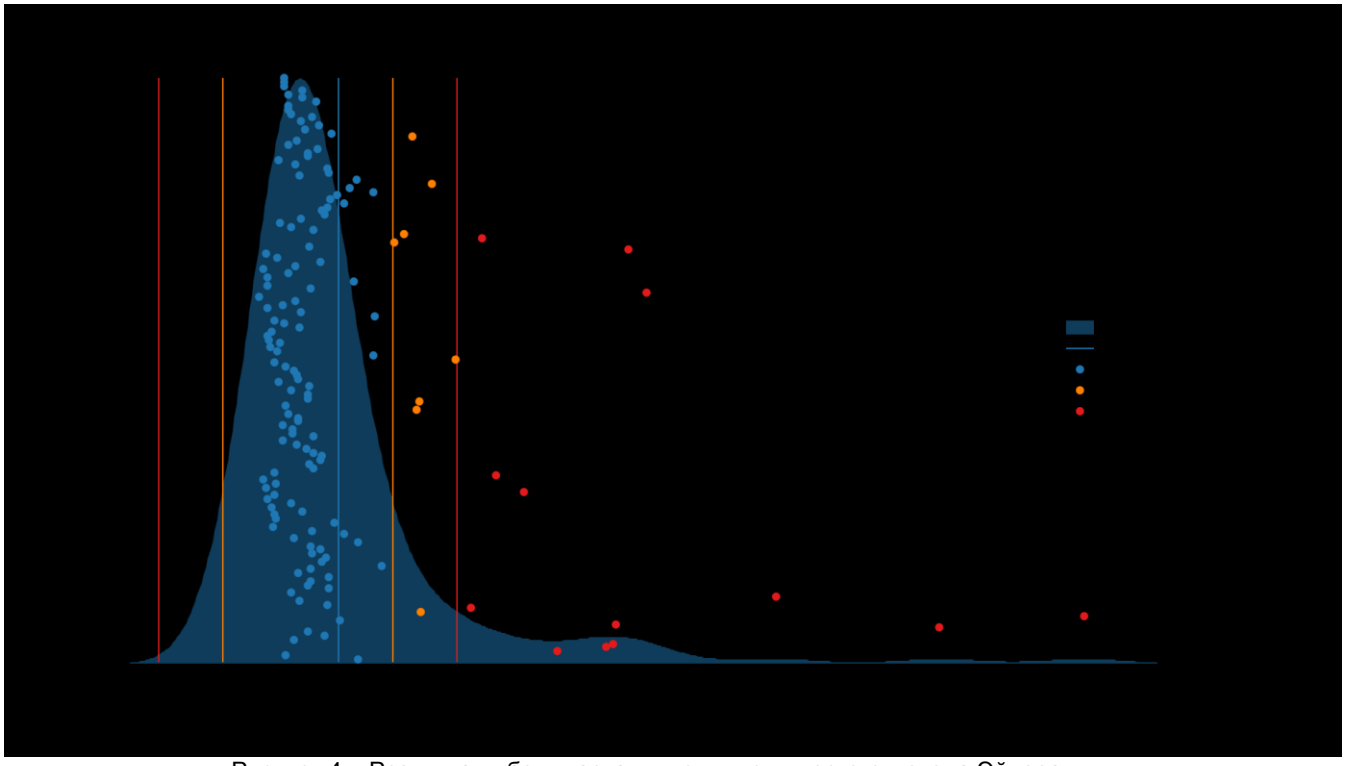


Рисунок 4 – Результаты бенчмарка для симплектического метода Эйлера

Список использованных источников:

1. Джанколи Д. Физика: В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. // Мир, 1989. – 656с.

2. Линейная алгебра и ее применения / Стренг Г. // Книга по Требованию, 2024. – 460с.

3. Князева Л.П. Численные методы. Лабораторные работы по высшей математике для студентов всех специальностей БГУИР. В 2-х частях. // БГУИР, 1998. – 36с.

UDC 517.581:004.928

NUMERICAL STABILITY OF INTEGRATION METHODS IN COMPUTER GAMES

Vizgin A.P., Finevich A.V., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This paper examines the numerical stability of various integration methods used to solve equations of motion in physical simulations of computer games. The Euler and Runge-Kutta methods are analyzed using the example of modeling the dynamics of rigid bodies under the action of external forces. The accuracy and stability of the methods are compared, and graphs of the system behavior are presented.

Keywords. Differential equations, numerical integration methods, Euler's method, Runge-Kutta method, algorithm stability, physical simulation, computer games.

УДК 004.42:616-036.22

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФЕКЦИОННОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ С УЧЕТОМ ВАКЦИНАЦИИ И СОЦИАЛЬНОЙ УСТАЛОСТИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ SIR

Вирбал А.Е., Турчук А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Описана эпидемиологическая модель SEIRD+F, разработана программная реализация модифицированной эпидемиологической модели с учётом пространственной диффузии, инкубационного периода, смертности в зависимости от пропускной способности системы здравоохранения и социальной усталости. Разработанный комплекс представляет собой интерактивный инструмент для исследования сценариев распространения инфекций и поддержки решений в области здравоохранения.

Ключевые слова. Эпидемиология, математическое моделирование, C++, Qt 6, Open MP, модель SEIRD+F, социальная усталость, реакционно-диффузионные уравнения, метод конечных разностей, аппроксимация Лапласиана.

Пандемия COVID-19 стала серьезным испытанием для систем здравоохранения и продемонстрировала необходимость заблаговременной оценки сценариев развития инфекционных заболеваний [1]. Классическая эпидемиологическая модель, такая как SIR, предложенная Кермаком и Маккендриком [2] в 1927 году, заложила фундамент математического описания распространения инфекций. Однако эта модель не позволяет учитывать пространственное распределение популяции, инкубационный период, смертность, а также сложные механизмы формирования повторных волн, наблюдавшиеся в ходе пандемии.

Современные методы вычислений позволяют расширить классические модели путем добавления новых параметров и механизмов взаимодействия, учитывать социальные факторы и особенности поведения людей. Поэтому созданные симуляции становятся более реалистичными.

Основной целью данной работы является программная реализация адаптированной (модифицированной) модели SEIRD+F, которая позволяет более точно описывать динамику распространения инфекций и анализировать влияние различных факторов на развитие эпидемического процесса. В основе исследования лежит метод математического моделирования, реализованный через модификацию модели SIR с учетом фактора социальной усталости (SEIRD+F). Пространственная динамика описывается [3] системой реакционно-диффузионных уравнений.

Классическая модель SIR определяет динамику через систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta SI}{N}, \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\beta SI}{N} - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I, \end{cases}$$

где S – восприимчивые, I – заражённые, R – выздоровевшие, N – общее количество популяции, β – коэффициент передачи инфекции, γ – коэффициент выздоровления.

Динамика системы зависит от дифференциального уравнения, где скорость определяется начальным количеством представителей каждого класса и значением коэффициентов. Такая модель умеет воспроизводить базовые фазы эпидемий и определяет пороговый критерий возникновения вспышки через базовое репродуктивное число:

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma}.$$

Однако система не может учитывать пространственную неоднородность и поведенческую адаптацию, что послужило причиной для расширения стандартной системы.

Для учёта инкубационного периода, смертности, пространственной диффузии и поведенческих факторов базовая модель была расширена до системы уравнений в частных производных [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} = D_S \Delta S - \frac{\beta(F) S I}{N} , \\ \frac{\partial E}{\partial t} = D_E \Delta E + \frac{\beta(F) S I}{N} - \sigma E , \\ \frac{\partial I}{\partial t} = D_I \Delta I + \sigma E - \big(\gamma + \mu(H)\big) I , \\ \frac{\partial R}{\partial t} = D_R \Delta R + \gamma I , \\ \frac{\partial D}{\partial t} = \mu(H) I , \\ \frac{\partial F}{\partial t} = D_F \Delta F + \alpha I - \delta F , \end{cases} \quad (1)$$

где E – латентные, D – умершие, F – социальная усталость, D_S , D_E , D_I , D_R , D_F – коэффициенты диффузии, Δ – оператор Лапласа, $\beta(F)$ – коэффициент передачи инфекций, N – общая численность популяции, σ – коэффициент перехода из группы в группу, $\mu(H)$ – коэффициент смертности, α – возбуждение, δ – демпфирование.

Множители выздоровления и перехода являются обратными величинами к средней длительности инфекционного периода и инкубационного периода соответственно и определяются как:

$$\sigma = \frac{1}{\tau_E},$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau_I}.$$

Важной особенностью модели является введение функциональных множителей, описывающих нелинейные зависимости.

Коэффициент заражения от усталости. Функция тангенса выбрана за её свойство плавного насыщения, что соответствует психологическим моделям адаптации [4]:

$$\beta(F) = \beta_0 (1 + k_\beta \cdot th(\frac{F}{F_{thr}})) ,$$

где β_0 – базовый коэффициент передачи инфекции, k_β – коэффициент чувствительности к усталости, F_{thr} – пороговое значение социальной усталости.

Линейная зависимость смертности является минималистичным, но эффективным приближением, используемым во многих моделях перегрузки систем:

$$\mu(H) = \mu_0 (1 + k_\mu \cdot \frac{I}{I_{max}}) ,$$

где μ_0 – базовый коэффициент смертности, k_μ – коэффициент чувствительности к перегрузке, $I_{\max}$ – пропускная способность системы здравоохранения.

Динамика усталости. Уравнение аналогично моделям затухающих колебаний [4], где параметр α – возбуждение, а δ – демпфирование:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \alpha I - \delta F .$$

Выполним численную реализацию системы (1) методом конечных разностей на регулярной сетке [5]. Аппроксимация Лапласиана осуществляется с помощью 5-точечного шаблона, обеспечивающего второй порядок точности. Так как оператор Лапласа является суммой частных производных второго порядка по переменным x и y дважды, необходимо найти численный аналог каждой из них. Каждая функция была разложена по осям в ряды Тейлора:

$$u_{i+1} = u_i + h \cdot u_i' + \left(\frac{h^2}{2}\right) \cdot u_i'' + \dots , \quad (2)$$

$$u_{i-1} = u_i - h \cdot u_i' + \left(\frac{h^2}{2}\right) \cdot u_i'' - \cdots , \quad (3)$$

где u_i – значение функции групп S, E, I, R, F с индексом i, h – шаг пространственной сетки. Предполагается, что раскладываемая функция достаточно гладкая и имеет непрерывные частные производные до четвёртого порядка, обеспечивающие справедливость разложения.

Далее разложения (2) и (3) были сложены и получено следующее приближенное равенство:

$$u_{i+1} + u_{i-1} \approx 2u_i + h^2 \cdot u_i'' ,$$

из которого была получена частная производная второго порядка по x дважды:

$$u_{xx}(x_i, y_i) = \frac{u(x_i+h,y_j)-2u(x_i,y_j)+u(x_i-h,y_j)}{h^2},$$

где $u_{i,j}$ – значение функции группы с индексами i и j.

Аналогично была получена частная производная второго порядка по y дважды:

$$u_{yy}(x_i, y_i) = \frac{u(x_i,y_j+h)-2u(x_i,y_j)+u(x_i,y_j-h)}{h^2},$$

и найдена сумма, которая приблизительно равна оператору Лапласа функции u:

$$\Delta u_{i,j} = u_{xx}(x_i, y_i) + u_{yy}(x_i, y_i) \approx \frac{u(x_i+h,y_j)-2u(x_i,y_j)+u(x_i-h,y_j)}{h^2} + \frac{u(x_i,y_j+h)-2u(x_i,y_j)+u(x_i,y_j-h)}{h^2} .$$

Итерационная формула для явного метода требует [5] соблюдения условия устойчивости Куранта для корректной работы:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + \frac{D\tau}{h^2\left(u_{i+1,j}^n+u_{i-1,j}^n+u_{i,j+1}^n+u_{i,j-1}^n-4u_{i,j}^n\right)} + \tau \cdot f\left(u_{i,j}^n\right),$$

где $u_{i_1 j}^n$ – значение функции в узле в текущий момент времени, τ – шаг времени, $f\left(u_{i,j}^n\right)$ – правая часть дифференциального уравнения.

Условие устойчивости Куранта гарантирует то, что возмущение не будет распространяться дальше соседних узлов за временной шаг:

$$D \cdot \frac{\tau}{h^2} \leq \frac{1}{4},$$

где D – максимальный коэффициент диффузии. Для численного исследования разработанной математической модели был создан специализированный программный комплекс, реализованный на языке C++ с применением фреймворка Qt 6. Архитектура приложения следует принципу разделения ответственности и состоит из двух основных слоёв.

Нижний уровень представляет собой вычислительное ядро, включающее решатель системы уравнений в частных производных, класс пространственной сетки и структуру параметров симуляции. Численная реализация основана на методе конечных разностей с использованием пятиточечного шаблона для аппроксимации оператора Лапласа. Для обеспечения высокой производительности вычислений применена технология параллельного программирования OpenMP.

Верхний уровень представляет собой графический интерфейс на базе Qt 6. Важной особенностью разработанной системы является возможность динамического изменения параметров модели в реальном времени без остановки симуляции. Это открывает возможности для интерактивного исследования сценариев и калибровки модели.

Для повышения реалистичности моделирования реализован редактор карты населения, позволяющий задавать пространственную неоднородность области, зоны карантина с пониженной диффузией, а также размещать начальные очаги заражения в произвольных координатах. Система поддерживает динамический карантин — возможность активации и деактивации ограничительных мер в процессе симуляции с визуальным отображением границ изолированных зон.

Визуализация результатов осуществляется в нескольких взаимодополняющих формах. Тепловые карты отображают пространственное распределение каждой из шести групп (S, E, I, R, D, F) с

цветовой кодировкой концентрации. Временные ряды демонстрируют динамику численности каждой группы населения в виде графиков зависимости от модельного времени. Реализована функция сравнения сценариев с наложением «призрачных» кривых от предыдущих запусков. Индикаторы статистики отображают текущие абсолютные и процентные значения всех классов. Это позволяет осуществлять численный контроль процесса симуляции, как показано на рисунке 1.

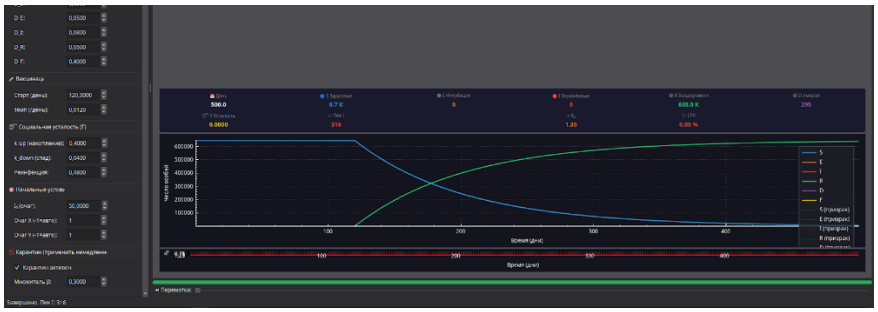


Рисунок 1 – Отображение вкладки приложения с графиками

Таким образом, программная реализация представляет собой полноценный научный инструмент, который позволяет не только интерактивно исследовать влияние параметров модели, но и визуально наблюдать сложные пространственно-временные эффекты эпидемического процесса.

С целью верификации разработанной модели, а также для демонстрации её возможностей была проведена серия вычислительных экспериментов на пространственной сетке 50×50 узлов при базовых параметрах.

Моделирование введения карантина было выполнено через уменьшение коэффициента диффузии инфицированных. Согласно полученным данным, эпидемическая волна не распространяется свободно по всей расчётной области.

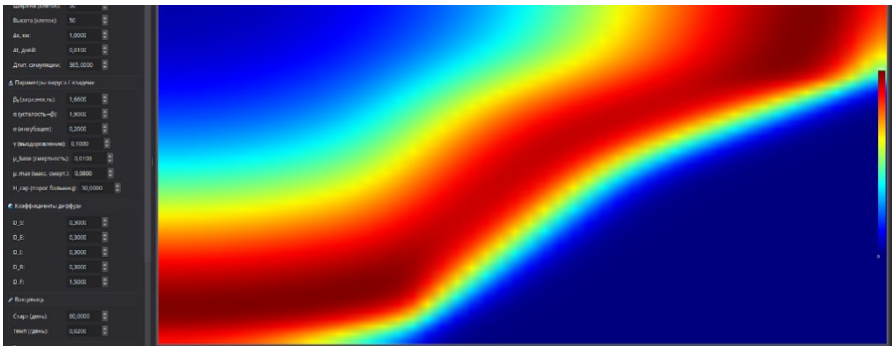


Рисунок 2 – Волна распространения заболевания столкнулась с карантинной зоной

Результаты количественного анализа подтверждают эффективность своевременного введения ограничительных мер: раннее введение карантина позволяет снизить пиковую заболеваемость и общую долю переболевших.

Влияние транспортных коридоров на пространственную динамику эпидемии продемонстрировано на рисунке 3. Согласно визуализации, инфекция, зародившаяся в левой части области, проникает в правый «город» исключительно через транспортный коридор, формируя вторичный очаг.

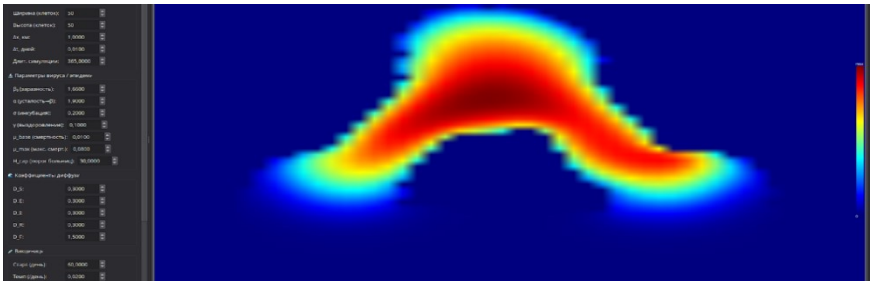


Рисунок 3 – Перемещение заболевания по дорогам

Данный результат согласуется с теоретической оценкой для реакционно-диффузных систем, качественно воспроизводит наблюдавшиеся в реальности закономерности распространения пандемий вдоль трасс и железнодорожных путей, где скорость распространения инфекции возрастает из-за скопления людей, ограниченного пространства и длительности поездок, и обосновывает необходимость дифференцированного контроля перемещений.

Ещё одной ключевой особенностью разработанного программного комплекса является возможность учёта зависимости коэффициента смертности от нагрузки. На рисунке 4 в сценарии с ограниченной ёмкостью количество заражённых создаёт нагрузку на медицинские учреждения, что приводит к увеличению летальных исходов.

Рисунок 4 – Влияние количества заболевших на работоспособность больниц

Одним из наиболее значимых воспроизводимых моделью эффектов является формирование вторичных волн заболеваемости из-за накопления социальной усталости: игнорирования симптомов болезни, нарушения введенных ограничений, снижения бдительности. На рисунке 5 данный эффект качественно согласуется с динамикой пандемии COVID-19, где ослабление ограничительных мер и снижение дисциплины населения приводило к повторным подъёмам заболеваемости даже при наличии частичного коллективного иммунитета.

Рисунок 5 – появление второй волны

Однако, при введении карантинных мер можно добиться значительных результатов в сдерживании распространения заболевания, что отображено в отсутствии второй волны на графике симуляции с теми же параметрами за исключением введения постоянного карантина. Также стоит заметить, что в таком случае величина пика заразившихся людей значительно уменьшилась, как и суммарные потери.

Учёт пространственной неоднородности и поведенческой динамики существенно повышает прогностическую ценность эпидемиологических моделей по сравнению с классическими популяционными моделями.

Разработанный программный комплекс представляет собой готовый инструмент для интерактивного исследования сценариев распространения инфекционных заболеваний и может служить основой для принятия обоснованных решений в области общественного здравоохранения.

Программная реализация позволяет интерактивно исследовать влияние параметров и визуально наблюдать сложные пространственно-временные эффекты, которые невозможно получить в классических моделях разделения на группы.

Список использованных источников:

1. Mathematical modelling of infectious diseases : a guide for public health decision-makers / World Health Organization. – Geneva : WHO Press, 2022. – 84 p. – URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240048546 (date of access: 27.03.2026).

2. Kermack, W. O. A contribution to the mathematical theory of epidemics / W. O. Kermack, A. G. McKendrick // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. – 1927. – Vol. 115, № 772. – P. 700–721.

3. Davydovych, V. Reaction–diffusion equations in mathematical models arising in epidemiology / V. Davydovych, O. Domanskyi // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, № 11. – Art. 2025. – DOI: 10.3390/sym15112025.

4. Funk, S. Modelling the influence of human behaviour on the spread of infectious diseases : a review / S. Funk, M. Salathé, V. A. A. Jansen // Journal of the Royal Society Interface. – 2010. – Vol. 7, № 50. – P. 1247–1256. – DOI: 10.1098/rsif.2010.0142.

5. Стригунов, В. В. Численные методы решения задач математической физики : учеб.-метод. пособие / В. В. Стригунов. – Минск : БГУИР, 2021. – 156 с.

UDC 004.42:616-036.22

MATHEMATICAL MODELING OF INFECTIOUS DISEASE SPREAD WITH VACCINATION AND SOCIAL FATIGUE BASED ON A MODIFIED SIR MODEL

Virbal A.E., Turchuk A.A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. The SEIRD+F epidemiological model is described, and a software implementation of a modified epidemiological model has been developed, taking into account spatial diffusion, incubation period, mortality depending on the capacity of the healthcare system, and social fatigue. The developed software package represents an interactive tool for studying infection spread scenarios and supporting decision-making in healthcare.

Keywords. Epidemiology, mathematical modeling, C++, Qt 6, OpenMP, SEIRD+F model, social fatigue, reaction-diffusion equations, finite difference method, Laplacian approximation.

УДК 519.23:616006

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИИ КРОСС-ЭНТРОПИИ

Гладкая Н.Н., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена математическому обоснованию ускорения итерационных алгоритмов минимизации функции кросс-энтропии на примере задачи бинарной классификации. Определяется принадлежность опухоли к злокачественному или доброкачественному классу по вектору числовых характеристик. Выведена функция правдоподобия, её логарифмирование приводит к функционалу кросс-энтропии. Вычислены градиент и гессиан функционала потерь. Доказана положительная определённость гессиана, устанавливающая единственность глобального минимума и сходимость итерационных методов.

Ключевые слова. Логистическая регрессия, кросс-энтропия, распределение Бернулли, классификация, градиент, гессиан, метода Ньютона, градиентный спуск.

Введение. Ранняя и точная диагностика злокачественных новообразований остаётся одной из ключевых задач современной медицины. На основе результатов биопсии, представленных в виде числовых векторов характеристик клеток (радиус, текстура, периметр, компактность и другие), необходимо принять бинарное решение: классифицировать опухоль как злокачественную или доброкачественную. Формализация данной задачи в рамках теории вероятностей и математического анализа сводит её к минимизации функционала бинарной кросс-энтропии в модели логистической регрессии. Экспериментальные данные взяты с открытой платформы Kaggle [1].

Задача сводится к минимизации функционала потерь (бинарной кросс-энтропии) как функции вектора параметров $w \in \mathbb{R}^{\mathrm{d}}$. Градиентный спуск (стандартный метод машинного обучения) использует производные первого порядка. Однако математический анализ предоставляет значительно более мощный инструмент: производные второго порядка, образующие матрицу Гессе, учитывают кривизну поверхности функционала и позволяют достичь той же точности решения значительно быстрее.

1. Постановка задачи. Рассмотрим задачу бинарной классификации. Пусть задана обучающая выборка $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{N}$, где N – объём выборки, $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{id})^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^{\mathrm{d}}$ – вектор из d числовых характеристик i-го наблюдения, $y_i \in \{0, 1\}$ – соответствующая бинарная метка ($y_i = 1$ означает злокачественную опухоль, $y_i = 0$ – доброкачественную). Через $\mathbb{R}^{\mathrm{d}}$ обозначается d – мерное вещественное евклидово пространство. Требуется найти вектор параметров $w \in \mathbb{R}^{\mathrm{d}}$, при котором функция $\sigma(w^{\mathrm{T}}x)$ наилучшим образом аппроксимирует условную вероятность злокачественности. Задача нахождения $w^* = argmin\, \mathcal{L}(w)$ является центральным математическим объектом работы. Предметом исследования является сопоставление двух численных методов: метода градиентного спуска и метода Ньютона.

2. Вероятностная модель и функционал потерь.

2.1. Модель Бернулли. Предположим, что при фиксированном x_i и параметрах w метка y_i является реализацией случайной величины: $y_i \sim Bernoulli(p_i), p_i = \sigma(w^{\mathrm{T}}x_i)$ [2]. Вероятностная масс-функция для i-го наблюдения записывается в компактном виде:

$$p(y_i \mid x_i, w) = {p_i}^{y_i} \cdot (1 - p_i)^{1-y_i},$$

где показатели степени $y_i \in \{0,1\}$ действуют как бинарный селектор: при $y_i = 1$ остаётся p_i, при $y_i = 0$ – множитель $(1 - p_i)$, что позволяет охватить оба случая единой формулой.

2.2. Логит-связь. Линейный предиктор $\eta_i = w^{\mathrm{T}}x_i$ принимает значения на всей прямой $\mathbb{R}$, тогда как вероятность $p_i \in (0,1)$. Для согласования областей значений вводится логит-связь [2]: $\ln(p_i/(1 - p_i)) = w^{\mathrm{T}}x_i$. Потенцируя и выражая p, получаем $p_{\mathrm{i}} = \sigma(w^{\mathrm{T}}x_i)$. Производная сигмоиды вычисляется дифференцированием сложной функции [3]:

$$\sigma'(z) = \frac{e^{-z}}{(1 + e^{-z})^2} = \sigma(z) \cdot (1 - \sigma(z)).$$

Это тождество является ключевым: правая часть выражена только через значения сигмоиды в данной точке, без экспонент и дробей, что существенно упрощает последующее дифференцирование функции.

2.3. Кросс-энтропия. При предположении о независимости наблюдений совместное правдоподобие факторизуется: $L(w) = \prod_{i=1}^{N} \sigma_i^{y_i}(1-\sigma_i)^{1-y_i}$. Поскольку логарифм является строго монотонным преобразованием, он не меняет точку максимума, но переводит произведение в сумму:

$$\ell(w) = \sum_{i=1}^{N}[\ y_i \ \ln\sigma_i \ + \ (1 - y_i) \ \ln(1 - \sigma_i)\ ].$$

Совершим переход от максимизации логарифма правдоподобия к минимизации его отрицательной величины и нормируем на N. Получаем функционал бинарной кросс-энтропии [4]:

$$\mathcal{L}(w) = -\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} [\ y_i \ \ln\sigma(w^{\mathrm{T}}x_i) \ + \ (1 - y_i) \ \ln(1 - \sigma(w^{\mathrm{T}}x_i))\ ].$$

3. Градиент функционала кросс-энтропии.

Обозначим $z_i = w^{\mathrm{T}}x_i$. Применяя цепное правило [3], вычислим компоненту градиента $\partial\mathcal{L}/\partial w_j$. Дифференцируем i-ое слагаемое.

Первое слагаемое $y_i \ \ln\sigma(z_i)$:

$$\partial/\partial w_j \ [y_i \ \ln\sigma_i] \ = \ y_i \ \cdot \ (1/\sigma_i) \ \cdot \ \sigma_i(1-\sigma_i) \ \cdot \ x_{ij} \ = \ y_i(1-\sigma_i)x_{ij}.$$

Второе слагаемое $(1 - y_i)\ln(1 - \sigma_i)$:

$$\partial/\partial w_j \ [(1-y_i)\ln(1-\sigma_i)] \ = \ -(1-y_i)\sigma_i x_{ij}.$$

Складывая оба слагаемых, члены $\pm y_i\sigma_i x_{ij}$ взаимно уничтожаются, имеем:

$$\partial\ell_i/\partial w_j \ = \ y_i x_{ij} - y_i\sigma_i x_{ij} \ - \ \sigma_i x_{ij} + \ y_i\sigma_i x_{ij} \ = \ (y_i \ - \ \sigma_i)x_{ij}.$$

Суммируя по всем наблюдениям и учитывая знак минус перехода от ℓ к $\mathcal{L}$, получим

$$\partial\mathcal{L}/\partial w_j \ = \ \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N}(\sigma_i - \ y_i) \ x_{ij} \ .$$

В матричной форме, вводя матрицу признаков $X \in \mathbb{R}^{\mathrm{Nxd}}$ и вектор предсказанных вероятностей $\hat{p} = \sigma(Xw) \in \mathbb{R}^{\mathrm{N}}$, имеем

$$\nabla w \ \mathcal{L}(w) \ = \ \frac{1}{N} \cdot X^{\mathrm{T}}(\hat{p} \ - \ y).$$

Геометрическая интерпретация: градиент есть взвешенная сумма строк матрицы X, где вес i-ой строки равен ошибке предсказания $(\hat{p}_i - y_i)$. Формула градиентного спуска с шагом $\alpha > 0$ запишется как

$$w_{\{k+1\}} = \ w_k \ - \ \alpha \ \cdot \ \frac{1}{N} \cdot X^{\mathrm{T}}(\hat{p}_k \ - \ y).$$

Схема сходится при $\alpha < 2/\lambda_{max}(H)$ со скоростью линейной сходимости [5]; число итераций до ε-точности определяется числом обусловленности $k(H) = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}$ гессиана, где λ_{max} и λ_{min} – наибольшее и наименьшее собственные значения матрицы H. Физически $k(H)$ показывает, насколько вытянуты уровневые множества функционала: при $k(H) >> 1$, то есть когда наибольшее собственное значение на несколько порядков превышает наименьшее, эллипсоиды уровня сильно вытянуты, и градиентный спуск совершает зигзагообразную траекторию в «овраге», сходясь крайне медленно.

4. Гессиан и строгая выпуклость.

4.1. Вычисление гессиана. Гессиан – матрица вторых частных производных [3]:

$$H_{jk} \ = \ \partial^2\mathcal{L}/(\partial w_j \ \partial w_k).$$

Дифференцируем $\partial\mathcal{L}/\partial w_j$ по w_k; единственный множитель, зависящий от w_k, – это σ_i:

$$\partial\sigma_i/\partial w_k \ = \ \sigma'(z_i) \ \cdot \ x_{ik} \ = \ \sigma_i(1 \ - \ \sigma_i) \ \cdot \ x_{ik},$$

$$H_{jk} \ = \ \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \sigma_i(1 \ - \ \sigma_i) \ \cdot \ x_{ij} \ \cdot \ x_{ik}.$$

Веса $\sigma_i(1-\sigma_i)$ зависят только от номера наблюдения i. Введём диагональную матрицу $S = diag(\sigma_1(1-\sigma_1), \dots, \sigma_n(1-\sigma_n)) \in \mathbb{R}^{\mathrm{NxN}}$. Тогда сумма факторизуется:

$$H(w) = \frac{1}{N} \cdot X^{\mathrm{T}} S X.$$

Матрица H симметрична ($H = H^{\mathrm{T}}$) и зависит от w через диагональные элементы S, что отличает нелинейную задачу от линейных, где гессиан постоянен. H допускает разложение в сумму N матриц ранга 1:

$$H = \sum_{i=1}^{N} \sigma_i(1-\sigma_i) x_i x_i^{\mathrm{T}}.$$

4.2. Теорема (положительная определённость). При условии $rank(X) = d$ матрица $H(w)$ положительно определена для любого $w \in \mathbb{R}^{\mathrm{d}}$ [6].

Доказательство. Для произвольного ненулевого вектора $v \in \mathbb{R}^{\mathrm{d}}$ вычислим квадратичную форму:

$$v^{\mathrm{T}} H v = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \sigma_i(1-\sigma_i) \cdot (v^{\mathrm{T}} x_i)^2 .$$

Поскольку $\sigma_i \in (0,1)$, все коэффициенты $\sigma_i(1-\sigma_i) > 0$; квадраты $(v^{\mathrm{T}} x_{\mathrm{i}})^2 \geq 0$, следовательно, указанная сумма является оетрицательной. Строгое неравенство обеспечивается условием $rank(X) = d$: если бы $v^{\mathrm{T}} x_i = 0$ для всех i, вектор v лежал бы в ядре X^{T}, что противоречит полноранговости. Значит, $(v^{\mathrm{T}} x_i)^2 > 0$ хотя бы для одного i, и $v^{\mathrm{T}} H v > 0$ для всех $v \neq 0$. Теорема доказана.

Следствие. Положительная определённость гессиана равносильна строгой выпуклости $\mathcal{L}(w)$. Строго выпуклая функция имеет единственную стационарную точку; локальных минимумов, кроме глобального, не существует. Оба алгоритма при выполнении условий сходимости гарантированно приходят к единственному w^*.

5. Метод Ньютона: аппроксимация второго порядка.

5.1. Разложение Тейлора второго порядка. Идея метода – локальная замена $\mathcal{L}$ квадратичной аппроксимацией в окрестности текущего приближения w_k. В одномерном случае имеем:

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + f'(x)\Delta x + \frac{1}{2} f''(x)(\Delta x)^2.$$

В многомерном случае скаляры заменяются на градиент и гессиан:

$$\mathcal{L}(w_k + \Delta w) \approx Q(\Delta w) = \mathcal{L}(w_k) + \nabla \mathcal{L}^{\mathrm{T}} \Delta w + \frac{1}{2} \cdot \Delta w^{\mathrm{T}} H \cdot \Delta w.$$

Слагаемые $Q(\Delta w)$: $\mathcal{L}(w_k)$ – значение в текущей точке (константа); $\nabla \mathcal{L}^{\mathrm{T}} \Delta w = \sum_{j=1}^{d} (\partial \mathcal{L} / \partial w_j) \cdot \Delta w_j$ – линейная поправка, учитывающая наклон вдоль каждой оси; $\frac{1}{2} \cdot \Delta w^{\mathrm{T}} H \cdot \Delta w$ – квадратичная поправка, учитывающая кривизну, в том числе перекрёстную (недиагональные элементы H_{jk}). Именно последнее слагаемое отличает метод Ньютона от градиентного спуска, полностью игнорирующего кривизну.

5.2. Минимизация квадратичной аппроксимации. Берём производную $Q(\Delta w)$ по Δw и приравниваем к нулю:

$$\partial Q / \partial \Delta w = \nabla \mathcal{L} + H \cdot \Delta w = 0.$$

Из обратимости H (следует из $H \succ 0$):

$$\Delta w^* = -H^{-1} \cdot \nabla \mathcal{L}.$$

5.3. Шаг Ньютона. Подставляя оптимальный сдвиг в правило обновления, имеем:

$$w_{k+1} = w_k - H(w_k)^{-1} \cdot \nabla \mathcal{L}(w_k).$$

Для задачи кросс-энтропии, подставляя явные формулы, найдем:

$$w_{k+1} = w_k - \left[\frac{1}{N} \cdot X^{\mathrm{T}} S_k X \right]^{-1} \cdot \frac{1}{N} \cdot X^{\mathrm{T}} (\hat{p}_k - y).$$

5.4. Квадратичная сходимость.

Вблизи строго выпуклого минимума w^* метод Ньютона обладает квадратичной сходимостью [7]: $\|w_{k+1} - w^*\| \leq C \cdot \|w_k - w^*\|^2$. Число верных знаков удваивается на каждой итерации. Градиентный спуск сходится линейно: $\|w_{k+1} - w^*\| \leq \rho \cdot \|w_k - w^*\|$ при $\rho < 1$, зависящем от $k(H)$; при $k(H) \gg 1$ линейная сходимость крайне медленна.

6. Сравнительный анализ алгоритмов.

Таблица 1 – Сравнение алгоритмов первого и второго порядка

Характеристика	**Градиентный спуск**	**Метод Ньютона**
Используемые производные	1-й порядок: $\nabla\mathcal{L}$	2-й порядок: $\nabla\mathcal{L}, H$
Шаг обновления	$w \leftarrow w - \alpha \cdot \nabla\mathcal{L}$	$w \leftarrow w - H^{-1}\nabla\mathcal{L}$
Учёт кривизны	Нет	Да (гессиан)
Скорость сходимости	Линейная: $O\left(k \cdot \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)\right)$	Квадратичная: $O\left(\left(\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)\right)\right)$
Стоимость итерации	$O(Nd)$	$O(Nd^2 + d^3)$
Выбор шага α	Обязателен	Не требуется

Принципиальное преимущество метода Ньютона состоит в инвариантности шага к аффинным преобразованиям пространства параметров. Шаг $\Delta w^* = -H^{-1}\nabla\mathcal{L}$ автоматически масштабируется по направлениям с учётом кривизны [6], устраняя зигзагообразную траекторию в «оврагах». Градиентный спуск лишён этого механизма: шаг α требует ручной настройки, а при $k(H) \gg 1$ оптимальный α мал и число итераций велико.

Ограничение метода Ньютона – стоимость $O(Nd^2 + d^3)$ на итерацию. При $d \sim 10^4 - 10^5$ хранение и инверсия матрицы $d \times d$ становятся затратными.

7. Численный эксперимент. Рассматривается задача бинарной классификации: по вектору $x \in \mathbb{R}^{30}$ числовых характеристик опухоли предсказывается принадлежность к злокачественному или доброкачественному классу. Данные получены с платформы Kaggle ($N = 569$ наблюдений, $d = 30$ признаков); модель построена автором. Разбиение: 64% – обучение (364 наблюдений), 16% – валидация 91 наблюдение), 20% – контрольная выборка (114 наблюдений). Нормировка: каждый признак центрируется и масштабируется по обучающей выборке. Инициализация: $w_0 = 0$. Критерий остановки: $\|\Delta w\| < 10^{-6}$, не более 3000 итераций.

Результаты. Для получения численных результатов (таблица 1) была построена модель логистической регрессии на языке Python с использованием библиотеки NumPy для реализации матричных вычислений. Разбиение выборки и нормировка признаков выполнены средствами библиотеки scikit-learn, графики сходимости на рисунке 1 построены с помощью Matplotlib.

Параметры подбирались по минимуму функции потерь на валидационной выборке. Для градиентного спуска: шаг $\alpha = 0{,}1$, регуляризация $\lambda = 0$.

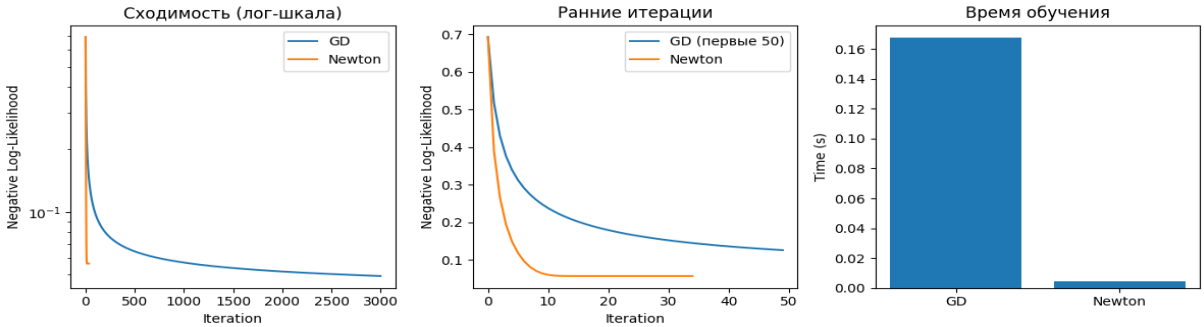


Рисунок 1 – Динамика функционала потерь: график слева – полная история обучения в логарифмической шкале; в центре – первые 50 итераций; справа – сравнение машинного времени

На рисунке отчётливо проявляется квадратичная сходимость метода Ньютона: уже к седьмой итерации значение функционала опускается ниже $0{,}08$, тогда как градиентный спуск за первые 50 итераций остаётся в диапазоне $0{,}1 - 0{,}4$. Оба метода приходят к одному качеству классификации – что теоретически гарантировано единственностью минимума.

Стократное ускорение по итерациям обусловлено различием типов сходимости: линейная против квадратичной. Ускорение по машинному времени (в 24 раза) несколько меньше, поскольку каждая итерация метода Ньютона стоит дороже – $O(Nd^2 + d^3)$ против $O(Nd)$.

Заключение. В работе рассмотрена задача минимизации функционала кросс-энтропии. Из вероятностной модели Бернулли выведена функция правдоподобия; логарифмирование дало функционал $\mathcal{L}(w)$. Цепное правило дифференцирования позволило получить градиент $\nabla\mathcal{L} = \frac{1}{N} \cdot X^{\mathrm{T}}(\hat{p} - y)$. Гессиан доказан положительно определённым, что равносильно строгой выпуклости $\mathcal{L}$ и единственности глобального минимума w^*.

Разложение Тейлора второго порядка дало квадратичную аппроксимацию $Q(\Delta w)$. Её минимизация по Δw – шаг Ньютона $w \leftarrow w - H^{-1}\nabla\mathcal{L}$, обладающий квадратичной сходимостью и инвариантностью к аффинным преобразованиям пространства параметров, в отличие от градиентного спуска, чья линейная скорость определяется числом обусловленности $k(H)$.

Численный эксперимент на задаче бинарной классификации опухолей подтверждает теоретические выводы: метод Ньютона сошёлся за ~ 30 итераций против 3000 у градиентного спуска, затратив $0{,}007$ секунд против $0{,}168$ секунд при одинаковом качестве классификации – 111 верных ответов из 114 и 3 ошибки у обоих методов.

Полученные результаты демонстрируют, что теория производных, теорема Тейлора, критерий выпуклости через гессиан непосредственно применимы к задачам, имеющим социальную значимость: ускорение диагностических алгоритмов снижает энергопотребление медицинских информационных систем без какого-либо ущерба для точности постановки диагноза.

Список использованных источников:

1. Kaggle – URL: https://www.kaggle.com (дата доступа: 10.03.2026).

2. Probabilistic Machine Learning: An Introduction / K. P. Murphy – MIT Press, 2022. – с. 258-260.

3. Курс дифференциального и интегрального исчисления: в 3 т. / Г. М. Фихтенгольц. – 8-е изд. – М.: Физматлит, 2003. – Т. 1. – 680 с.; Т. 2. – 864 с.

4. Numerical Optimization / J. Nocedal, S. Wright. – 2nd ed. – Springer, 2006. – с. 44-46.

5. An Overview of Gradient Descent Optimization Algorithms / S. Ruder – arXiv, 2016. – URL: https://arxiv.org/abs/1609.04747 (дата доступа: 10.03.2026).

6. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop – Springer, 2006. – с. 204-206.

7. Convex Optimization / S. Boyd, L. Vandenberghe – Cambridge University Press, 2004. – с. 67-69.

UDC 519.23:616006

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR MINIMIZING THE CROSS-ENTROPY FUNCTION

Gladkaya Natalia Nikolaevna, student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Abstract. The work is devoted to the mathematical justification of accelerating iterative algorithms for minimizing the cross-entropy function using the example of a binary classification problem. The classification of a tumor as malignant or benign is determined by a vector of numerical characteristics. The likelihood function is derived, and its logarithm leads to the cross-entropy functional. The gradient and Hessian of the loss functional are computed. The positive definiteness of the Hessian is proven, establishing the uniqueness of the global minimum and the convergence of iterative methods.

Keywords. Logistic regression, cross-entropy, Bernoulli distribution, classification, gradient, Hessian, Newton's method, gradient descent.

УДК 514.752.6

СВОЙСТВА ОГИБАЮЩИХ СЕМЕЙСТВА КРИВЫХ

Лопата Д.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Исследуются свойства огибающих семейств кривых и рассматриваются решения обратных задач. Изучены методы нахождения огибающих и восстановления семейств по ним. Установлено, что эволюта является огибающей нормалей, что используется для проверки расчетов. Опровергнута гипотеза о синхронных квадратичных функциях, но найдены функции с общей эволютой. Предложен алгоритм построения всех эвольвент по заданной эволюте.

Ключевые слова. Огибающая, семейство кривых, эволюта, эвольвента, обратная задача, нормаль, дифференциальное уравнение.

Введение. Понятие огибающей семейства кривых является одним из ключевых в дифференциальной геометрии и математическом анализе. Оно находит широкое применение не только в теоретической математике, но и в физике (оптика, механика), инженерии (профилирование деталей) и архитектуре. Несмотря на классический статус темы, исследование свойств огибающих позволяет открывать новые геометрические закономерности и решать обратные задачи.

1. Свойства кривых как огибающих.

Определение [2, стр.174]. Кривая Γ называется огибающей семейства кривых, если для любой плоской окрестности каждой её точки M существует кривая семейства, касающаяся Γ в точке M и геометрически отличная от Γ в этой окрестности.

Рассмотрим три способа нахождения огибающей семейства кривых.

Первый способ применим в случае, когда речь идет о семействе прямых и уравнение $A(\alpha)x + + B(\alpha)y + C(\alpha) = 0$ является квадратным относительно некоторого параметра α. Условие касания прямой и огибающей соответствует случаю кратных корней этого уравнения относительно параметра α, то есть приравниванию дискриминанта соответствующего квадратного уравнения к нулю. Кривая, удовлетворяющая полученной зависимости, и будет огибающей (или геометрическим местом особых точек) для рассматриваемого семейства прямых.

Второй способ является более общим, связан с производной функции и применим для нахождения огибающей различных семейств линий $f(x, y, \alpha) = 0$ в случаях нелинейных зависимостей. Огибающую можно получить, исключив параметр α из системы $\begin{cases} f(x, y, \alpha) = 0, \\ f'_\alpha(x, y, \alpha) = 0. \end{cases}$

Не всякая кривая, удовлетворяющая зависимости, полученной в результате исключения параметра α, будет огибающей. Проверку можно выполнить (в ходе работы с целью экономии пространства проверка не фиксировалась), используя равенство $\frac{\psi'(\alpha)}{\varphi'(\alpha)} = -\frac{f'_x(\varphi(\alpha),\psi(\alpha),\alpha)}{f'_y(\varphi(\alpha),\psi(\alpha),\alpha)}$, где $\begin{cases} x = \varphi(\alpha), \\ y = \psi(\alpha). \end{cases}$

Третий способ основан на переходе к дифференциальному уравнению семейства кривых. Он применим в случаях, когда алгебраическое исключение параметра из системы уравнений неудобно. Пусть семейство кривых задано уравнением $F(x, y, \alpha) = 0$, где α — параметр. Огибающая удовлетворяет тому же дифференциальному уравнению, что и всё семейство кривых, поэтому на практике метод сводится к исключению параметра через производную y'.

Дифференцируя уравнение семейства по x и исключая параметр α, получаем дифференциальное уравнение вида $\Phi(x, y, y') = 0$. Огибающая является особым решением этого уравнения и находится из системы: $\begin{cases} \Phi(x, y, y') = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y'} = 0. \end{cases}$

Решение некоторых задач на нахождение огибающих кривых позволяет установить свойства известных кривых.

Пример 1.1 ([1], с. 5). Семейство состоит из прямых $l(\alpha)$ (α – параметр) вида

$$bx(1 + \alpha^2) + ay(1 - \alpha^2) - 2\alpha ab = 0,$$

где a, b – заданные положительные числа.

Докажите, что эти прямые вместе с прямыми $y = \frac{bx}{a}$ и $y = -\frac{bx}{a}$ определяют треугольник постоянной площади $S = ab$. Найдите огибающую этого семейства прямых.

Решение. Найдем точки P и Q пересечения каждой из предложенных прямых с прямыми $y = \frac{bx}{a}$ и $y = -\frac{bx}{a}$ и докажем, что $OP \cdot OQ = a^2 + b^2$ и $S_{\Delta OPQ} = ab$ (рис.1).

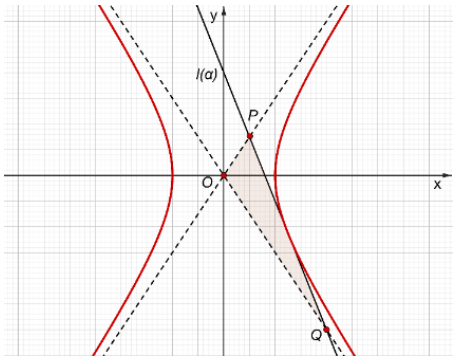


Рисунок 1 – Геометрическая иллюстрация к примеру 1.1: касательная к гиперболе и треугольник, образованный с асимптотами

$$\begin{cases} bx = ay, \\ ay(1+\alpha^2) + ay(1-\alpha^2) - 2\alpha ab = 0; \end{cases}$$

$2ay = 2\alpha ab;\ y = b\alpha;\ x = a\alpha;\ P(a\alpha; b\alpha);\ OP = |\alpha|\sqrt{a^2+b^2}.$

$$\begin{cases} bx = -ay, \\ -ay(1+\alpha^2) + ay(1-\alpha^2) - 2\alpha ab = 0; \end{cases}$$

$-2\alpha^2 ay = 2\alpha ab;\ y = -\frac{b}{\alpha};\ x = \frac{a}{\alpha};\ Q(\frac{a}{\alpha}; -\frac{b}{\alpha});\ OQ = \frac{1}{|\alpha|}\sqrt{a^2+b^2}.$

$$OP \cdot OQ = |\alpha|\sqrt{a^2+b^2} \cdot \frac{1}{|\alpha|}\sqrt{a^2+b^2} = a^2 + b^2;$$

β — угол наклона асимптоты $y = \frac{bx}{a}$ к оси Ox.

$$sin\beta = \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}};\ cos\beta = \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}};\ sin2\beta = \frac{2ab}{a^2+b^2};$$

$$S_{\Delta OPQ} = \frac{1}{2}OP \cdot OQ \cdot sin2\beta = \frac{1}{2}\alpha\sqrt{a^2+b^2} \cdot \frac{1}{\alpha}\sqrt{a^2+b^2} \cdot \frac{2ab}{a^2+b^2} = ab.$$

Найдем теперь огибающую предложенного семейства прямых. Для этого перепишем уравнение как квадратное относительно параметра α:

$$\alpha^2(bx - ay) - 2\alpha ab + bx + ay = 0.$$

$\frac{D}{4} = a^2b^2 - (b^2x^2 - a^2y^2) = 0;\ b^2x^2 - a^2y^2 = a^2b^2; \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$ – гипербола.

В итоге, огибающей семейства прямых является гипербола $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$. Поскольку все прямые предложенного семейства являются касательными к полученной гиперболе, то можно сформулировать свойство: любая касательная к гиперболе $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$ определяет вместе с ее асимптотами треугольник постоянной площади, причем $S = ab$.

Решение предложенных в статье [1, с. 5] задач 1, 3, 6 позволило сформулировать следующие свойства: для любой касательной вида $ax + by = 1$ к окружности $x^2 + y^2 = 1$ выполняется условие $a^2 + b^2 = 1$; любая касательная к параболе является осью симметрии для фокуса данной параболы и произвольной точки, взятой на директрисе; для параболы $y = \frac{\sqrt{2}}{2a}x^2 + \frac{a\sqrt{2}}{4}$ все касательные, проведенные в точках $x_0 \in \left(-\frac{a\sqrt{2}}{2}; \frac{a\sqrt{2}}{2}\right)$, отсекают от прямого угла, образованного биссектрисами первого и второго координатных углов, треугольники, сумма длин катетов которых равна a, у астроиды $x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}} = l^{\frac{2}{3}}$ все отрезки касательных, заключенные между осями координат, равны l.

Пример 1.2 ([1], с. 5). Дан отрезок длины l, который «скользит» по сторонам прямого угла. Найдите огибающую для всевозможных положений данного отрезка.

Решение. Пусть вершина прямого угла совпадает с началом координат, а катеты лежат на осях координат. Пусть длина катета, лежащего на оси абсцисс, равна a, тогда длина второго катета равна $\sqrt{l^2 - a^2}$ (a – параметр). Рассмотрим ситуацию для первой координатной четверти. Уравнение прямой, проходящей через вершины острых углов рассматриваемого треугольника, имеет вид: $\frac{x}{a} + \frac{y}{\sqrt{l^2-a^2}} = 1$.

Тогда $f(x, y, a) = \frac{x}{a} + \frac{y}{\sqrt{l^2-a^2}} - 1$ и $f'_a(x, y, a) = -\frac{x}{a^2} + \frac{ay}{\sqrt{(l^2-a^2)^3}}$.

$$\begin{cases} \frac{x}{a} + \frac{y}{\sqrt{l^2-a^2}} - 1 = 0, \\ -\frac{x}{a^2} + \frac{ay}{\sqrt{(l^2-a^2)^3}} = 0; \end{cases} \begin{cases} \frac{x}{a} + \frac{y}{\sqrt{l^2-a^2}} = 1, \\ \frac{y}{\sqrt{(l^2-a^2)^3}} = \frac{x}{a^3}. \end{cases}$$

Выполним преобразования для второго уравнения системы.

$$\frac{\sqrt[3]{y^2}}{l^2-a^2} = \frac{\sqrt[3]{x^2}}{a^2} = \frac{\sqrt[3]{x^2}+\sqrt[3]{y^2}}{l^2} \text{ (если } \frac{a}{b} = \frac{c}{d}, \text{ то } \frac{a}{b} = \frac{c}{d} = \frac{a+c}{b+d}).$$

$$a^2 = \frac{l^2\sqrt[3]{x^2}}{\sqrt[3]{x^2}+\sqrt[3]{y^2}}; \; a = \frac{l\sqrt[3]{x}}{\sqrt{\sqrt[3]{x^2}+\sqrt[3]{y^2}}}; \; l^2 - a^2 = \frac{l^2\sqrt[3]{y^2}}{\sqrt[3]{x^2}+\sqrt[3]{y^2}}; \; \sqrt{l^2 - a^2} = \frac{l\sqrt[3]{y}}{\sqrt{\sqrt[3]{x^2}+\sqrt[3]{y^2}}}.$$

Подставим полученные выводы в первое уравнение системы:

$\frac{\sqrt[3]{x^2}\sqrt{\sqrt[3]{x^2}+\sqrt[3]{y^2}}}{l} + \frac{\sqrt[3]{y^2}\sqrt{\sqrt[3]{x^2}+\sqrt[3]{y^2}}}{l} = 1$, или $(\sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{y^2})^{\frac{3}{2}} = l$, или $x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}} = l^{\frac{2}{3}}$ – астроида.

Таким образом, у астроиды $x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}} = l^{\frac{2}{3}}$ все отрезки касательных, заключенные между осями координат, равны l.

Пример 1.3. Найдите огибающую для всех хорд, которые отсекают от параболы $y = x^2$ криволинейную трапецию постоянной площади.

Решение. Рассмотрим некоторую хорду AB параболы $y = x^2$, где $A(a; a^2)$ и $B(b; b^2)$. Определим уравнение прямой AB.

$$\frac{x-a}{b-a} = \frac{y-a^2}{b^2-a^2}; \; x - a = \frac{y-a^2}{b+a}; \; y = (a + b)x - ab.$$

Найдем площадь криволинейной трапеции, ограниченной параболой и хордой AB.

$$\int_a^b \left((a + b)x - ab - x^2\right)dx = \left((a + b)\frac{x^2}{2} - abx - \frac{x^3}{3}\right)\Bigg|_a^b =$$

$$= (a + b)\frac{b^2}{2} - ab^2 - \frac{b^3}{3} - (a + b)\frac{a^2}{2} + a^2b + \frac{a^3}{3} = \frac{1}{6}\big(3(a + b)(b^2 - a^2) + 6ab(a - b) + 2(a^3 - b^3)\big) =$$

$$= \frac{1}{6}(3ab^2 + 3b^3 - 3a^3 - 3a^2b + 6a^2b - 6ab^2 + 2a^3 - 2b^3) = \frac{1}{6}(b^3 - a^3 - 3ab^2 + 3a^2b) =$$

$$= \frac{1}{6}(b - a)^3 = S.$$

Выразим *b* через *a*: $b = \sqrt[3]{6S} + a$.

Тогда уравнение прямой имеет вид $y = \left(2a + \sqrt[3]{6S}\right)x - a\left(a + \sqrt[3]{6S}\right)$.

Преобразуем его в квадратное уравнение относительно a: $a^2 - \left(2x - \sqrt[3]{6S}\right)a - x\sqrt[3]{6S} + y = 0$;

$$D = 4x^2 - 4x\sqrt[3]{6S} + \sqrt[3]{36S^2} + 4x\sqrt[3]{6S} - 4y = 0;\ 4y = 4x^2 + \sqrt[3]{36S^2};\ y = x^2 + \frac{\sqrt[3]{36S^2}}{4}.$$

Введем замену $t = \frac{\sqrt[3]{36S^2}}{4}$, тогда $S = \frac{4}{3}t\sqrt{t}$.

Отсюда отрезки касательных к параболе $y = x^2 + t$ отсекают от параболы $y = x^2$ криволинейную трапецию, площадь которой равна $S = \frac{4}{3}t\sqrt{t}$.

Пример 1.4. Найдите огибающую семейства прямых $y = \alpha x + \sqrt{\alpha^2 - 1}$, где α – параметр, $|\alpha| \geq 1$.

Решение. Данное уравнение удобно исследовать, используя дифференциальные уравнения. Продифференцируем уравнение семейства прямых по x, считая α постоянным для каждой конкретной прямой: $y' = \alpha$. Подставим найденное значение параметра $\alpha = y'$ в исходное уравнение. Получим дифференциальное уравнение семейства: $y = xy' + \sqrt{(y')^2 - 1}$. Для нахождения огибающей продифференцируем полученное равенство по y' и приравняем результат к нулю:

$0 = x + \frac{2y'}{2\sqrt{(y')^2-1}};\ x = -\frac{y'}{\sqrt{(y')^2-1}};\ x^2 = \frac{(y')^2}{(y')^2-1},\ y' = -\frac{x}{\sqrt{x^2-1}}$ (знак минус, так как x и y' противоположны). Подставим выражения для y' и $\sqrt{(y')^2 - 1}$ обратно в дифференциальное уравнение. Заметим, что $\sqrt{(y')^2 - 1} = \sqrt{\frac{x^2}{x^2-1} - 1} = \frac{1}{\sqrt{(x^2-1)}}$.

Тогда: $y = x\left(-\frac{x}{\sqrt{x^2-1}}\right) + \frac{1}{\sqrt{x^2-1}} = \frac{-x^2+1}{\sqrt{x^2-1}} = -\sqrt{x^2 - 1}$. Возводя обе части равенства в квадрат, получаем каноническое уравнение гиперболы: $x^2 - y^2 = 1$.

В итоге огибающей семейства прямых $y = \alpha x + \sqrt{\alpha^2 - 1}$ является гипербола $x^2 - y^2 = 1$.

2. Восстановление семейства кривых по огибающей.

Нахождение огибающей для данного семейства линий – стандартная задача. Возникает вопрос, можно ли восстановить семейство кривых определенного типа для данной огибающей, то есть можно ли решить задачу, обратную рассмотренной выше.

В случае, когда семейство состоит из прямых достаточно составить уравнение касательной в произвольной точке x_0 и заменить x_0 на параметр.

Пример 2.1. (**([1], с. 5).** Найдите огибающую семейства прямых $y = \alpha^3 x - \frac{3\alpha^2}{2}$ и восстановите семейство (прямых) по найденной огибающей.

Решение. Рассмотрим функцию $f(x, y, \alpha) = \alpha^3 x - \frac{3\alpha^2}{2} - y$. Находим производную $f'_\alpha(x, y, \alpha) = 3\alpha^2 x - 3\alpha$ и составляем систему

$$\begin{cases} \alpha^3 x - \frac{3\alpha^2}{2} - y = 0, \\ 3\alpha^2 x - 3\alpha = 0; \end{cases} \begin{cases} \alpha^3 x - \frac{3\alpha^2}{2} - y = 0, \\ \alpha(\alpha x - 1) = 0. \end{cases}$$

Если $\alpha = 0$, то мы имеем ось абсцисс, как геометрическое место особых точек. Если $\alpha \neq 0$, то $\alpha = \frac{1}{x}$ и $y = -\frac{1}{2x^2}$ – огибающая данного семейства. Составим уравнение касательной к графику полученной функции в произвольной точке x_0: $y = -\frac{1}{2x_0^2} + \frac{1}{x_0^3}(x - x_0) = -\frac{3}{2x_0^2} + \frac{x}{x_0^3}$. Заменяем x_0 на параметр $\frac{1}{\alpha}$ и получаем изначально предложенное семейство прямых $y = \alpha^3 x - \frac{3\alpha^2}{2}$.

В случаях, когда исходное семейство не является семейством прямых для его восстановления будем пользоваться тем фактом, что в точках касания у кривых семейства и огибающей общая касательная.

Пример 2.2 ([1], с. 5). Найдите огибающую семейства парабол $y = \alpha x^2 + \frac{1}{\alpha} - \alpha$ и восстановите семейство (парабол) по найденной огибающей.

Решение. Умножим обе части данного уравнения на α и рассмотрим его как квадратное относительно параметра $(x^2-1)\alpha^2 - y\alpha + 1 = 0;\ D = y^2 - 4x^2 + 4;\ y^2 - 4x^2 + 4 = 0;\ x^2 - \frac{y^2}{4} = 1$ – огибающая данного семейства.

Составим уравнение касательной к полученной гиперболе в произвольной точке x_0, выразив предварительно y. Рассмотрим ситуацию для $y \geq 0$:

$$f(x) = 2\sqrt{x^2-1};\ y = 2\sqrt{{x_0}^2-1} + \frac{2x_0}{\sqrt{{x_0}^2-1}}(x - x_0) = \frac{2x_0}{\sqrt{{x_0}^2-1}}x - \frac{2}{\sqrt{{x_0}^2-1}}.$$

Поскольку ветви огибающей симметричны относительно оси ординат, очевидно параболы семейства будут иметь вершины на этой оси, то есть иметь вид $y = ax^2 + c$. Составим уравнение касательной к параболе в общем виде в точке x_0 и приравняем одноименные коэффициенты полученных прямых.

$$y = a{x_0}^2 + c + 2ax_0(x - x_0) = 2ax_0x - a{x_0}^2 + c.$$

$$\begin{cases} \frac{2x_0}{\sqrt{{x_0}^2-1}} = 2ax_0, \\ -\frac{2}{\sqrt{{x_0}^2-1}} = -a{x_0}^2 + c; \end{cases} \begin{cases} a = \frac{1}{\sqrt{{x_0}^2-1}}, \\ c = \frac{{x_0}^2-2}{\sqrt{{x_0}^2-1}} = \sqrt{{x_0}^2-1} - \frac{1}{\sqrt{{x_0}^2-1}}; \end{cases}$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{{x_0}^2-1}}x^2 + \sqrt{{x_0}^2-1} - \frac{1}{\sqrt{{x_0}^2-1}} = \left|\frac{1}{\sqrt{{x_0}^2-1}} = \alpha\right| = \alpha x^2 + \frac{1}{\alpha} - \alpha.$$

Аналогичные рассуждения можно привести и для отрицательных значений переменной y.

Таким образом, действительно можно восстанавливать семейства кривых различных типов по данной огибающей. При этом одна и та же кривая может быть огибающей для разного вида семейств. Например, парабола $y = x^2$ может быть огибающей и для множества прямых, и для множества парабол, и для множества окружностей.

3. Эволюта как огибающая.

Если точка $M(x, y)$ перемещается вдоль данной кривой, то соответствующий ей центр кривизны $C(\xi, \eta)$, вообще говоря, также описывает некоторую кривую [4, с. 578]. Геометрическое место центров кривизны данной кривой называется ее эволютой. Обратно, исходная кривая по отношению к своей эволюте называется эвольвентой.

Огибающая может быть использована в качестве инструмента для проверки правильности нахождения эволют для данных кривых, поскольку эволюта – это огибающая для семейства нормалей к данной эвольвенте.

Для нахождения параметрических уравнений эволюты используют формулы:

$\xi = x - \frac{1+(f'(x))^2}{f''(x)}f'(x);\ \eta = f(x) + \frac{1+(f'(x))^2}{f''(x)}$ (функция задана явно). Покажем, что получение уравнений эволюты с помощью формул и с помощью огибающей дает одинаковые результаты.

Пример 3.1. Найдите эволюту параболы $y = ax^2$.

Решение. Найдем сначала уравнение эволюты, используя формулы:

$$\xi = x - \frac{1+4a^2x^2}{2a}2ax = -4a^2x^3;\ \eta = ax^2 + \frac{1+4a^2x^2}{2a} = \frac{1}{2a} + 3ax^2.$$

Исключим x : $\xi^2 = 16a^4x^6;\ \ (\eta - \frac{1}{2a})^3 = 27a^3x^6\ ;\ \xi^2 = \frac{16a}{27}(\eta - \frac{1}{2a})^3$. Если воспользоваться зависимостью y от x, то имеем $y = \frac{3}{4a}\sqrt[3]{4a^2x^2} + \frac{1}{2a}$. Найдем теперь огибающую для нормалей данной параболы. Уравнение нормали в точке x_0 имеет вид:

$$y = a{x_0}^2 - \frac{1}{2ax_0}(x - x_0) = -\frac{x}{2ax_0} + a{x_0}^2 + \frac{1}{2a}.\ f(x, y, \alpha) = -\frac{x}{2a\alpha} + a\alpha^2 + \frac{1}{2a} - y;$$

$$f'_\alpha(x, y, \alpha) = \frac{x}{2a\alpha^2} + 2a\alpha.$$

Составляем систему:

$$\begin{cases} -\frac{x}{2a\alpha} + a\alpha^2 + \frac{1}{2a} - y = 0, \\ \frac{x}{2a\alpha^2} + 2a\alpha = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} -\frac{x}{2a\alpha} + a\alpha^2 + \frac{1}{2a} - y = 0, \\ x = -4a^2\alpha^3. \end{cases}$$

Исключаем параметр, если $\alpha = -\sqrt[3]{\frac{x}{4a^2}}$, то

$$y = \frac{x}{2a\sqrt[3]{\frac{x}{4a^2}}} + a\sqrt[3]{\frac{x^2}{16a^4}} + \frac{1}{2a} = \frac{\sqrt[3]{4a^2x^2}}{2a} + \frac{\sqrt[3]{4a^2x^2}}{4a} + \frac{1}{2a} = \frac{3\sqrt[3]{4a^2x^2}}{4a} + \frac{1}{2a}.$$

Результаты совпали.

Итак, действительно через нахождение огибающей для нормалей эвольвенты можно проверить правильность найденной эволюты.

Доказано [3, стр. 585], что каждая эволюта имеет бесконечно много эвольвент, причем для каждых двух эвольвент выполняется условие: какую бы точку x_0 не взяли на первой кривой, найдется точка x_1 на второй кривой такая, что касательные в них будут параллельны и длина отрезка общей нормали в точках касания равна заданному числу. Назовем такие кривые **синхронными**. Тогда, если существуют, например, две квадратичные функции, графиками которых являются синхронные параболы, то графики этих функций имеют общую эволюту. Попытаемся получить квадратичную функцию, график которой будет синхронной параболой для графика функции $y = x^2$ при длине отрезка общей нормали в точках касания параллельных касательных равном 1.

Сначала выведем зависимость между коэффициентами линейных функций, графики которых параллельны и расстояние между которыми равно 1. Пусть даны две линейные функции $y = k_1x + + b_1$ и $y = k_2x + b_2$, графики которых параллельны. Очевидно, $k_1 = k_2 = k$. Найдем связь между коэффициентами b_1 и b_2. Пусть $b_2 < b_1 < 0$. Уравнение их общей нормали, проходящей через начало координат имеет вид $y = -\frac{1}{k}x$. Нормаль пересекает первую прямую в точке $A(-\frac{b_1k}{k^2+1}; \frac{b_1}{k^2+1})$, а вторую в точке $B(-\frac{b_2k}{k^2+1}; \frac{b_2}{k^2+1})$. Поскольку расстояние между прямыми должно быть равно 1, имеем:

$$AB = \sqrt{(\frac{b_2k}{k^2+1} - \frac{b_1k}{k^2+1})^2 + (\frac{b_1}{k^2+1} - \frac{b_2}{k^2+1})^2} = \frac{|b_2-b_1|}{\sqrt{k^2+1}} = \frac{b_1-b_2}{\sqrt{k^2+1}} = 1;\ b_1 = \sqrt{k^2+1} + b_2.$$

Далее для квадратичной функции $y = x^2$ попытаемся получить условие, при котором касательные к графику функции $y = x^2$ в точке x_0 и графику функции $y = ax^2 - 1$ в точке x_1 будут параллельны и расстояние между ними будет равно 1.

Уравнение касательной в точке x_0 для функции $y = x^2$ имеет вид $y = 2x_0x - {x_0}^2$, уравнение касательной в точке x_1 для функции $y = ax^2 - 1$ имеет вид $y = 2ax_1x - a{x_1}^2 - 1$. Тогда

$$\begin{cases} 2x_0 = 2ax_1, \\ -{x_0}^2 = \sqrt{4a^2{x_1}^2 + 1} - a{x_1}^2 - 1; \end{cases} \quad \begin{cases} x_0 = ax_1, \\ -a^2{x_1}^2 = \sqrt{4a^2{x_1}^2 + 1} - a{x_1}^2 - 1; \end{cases}$$

$$ {x_1}^2(a - a^2) + 1 = \sqrt{4a^2{x_1}^2 + 1}; $$

$$ {x_1}^4(a - a^2)^2 + 2{x_1}^2(a - a^2) + 1 = 4a^2{x_1}^2 + 1; $$

$${x_1}^2 = 0 \text{ или } {x_1}^2(a - a^2)^2 + 2(a - a^2) - 4a^2 = 0;\ {x_1}^2 = 0 \text{ или } {x_1}^2 = \frac{6a-2}{a(a-1)^2}.$$

Очевидно, только в трех точках выполняется предложенное условие. Однако условие синхронности требует выполнения равенства для всех x, что приводит к противоречию в коэффициентах многочленов (так как многочлены разных степеней не могут тождественно совпадать более чем в конечном числе точек). Этого недостаточно для синхронности графиков. Таким образом, несмотря на то, что рассуждения приведены для частного случая, можно утверждать, что не существует двух квадратичных функций, графики которых синхронны, а, значит, не существует двух квадратичных функций, графики которых имеют общую эволюту.

Тем не менее, функции, графики которых будут синхронными для параболы $y = x^2$ существуют. А, значит, существуют функции, графики которых будут иметь ту же эволюту, что и парабола $y = x^2$. Докажем это. Найдем нормаль.

$$y = {x_0}^2 - \frac{1}{2x_0}(x - x_0) = -\frac{x}{2x_0} + {x_0}^2 + \frac{1}{2};\ x = 2{x_0}^3 + x_0 - 2x_0 y.$$

Зафиксируем на нормали точку $(x; y)$, отстоящую от точки $(x_0;\ {x_0}^2)$ на l.

$$(x - x_0)^2 + (y - {x_0}^2)^2 = l^2;\ (2{x_0}^3 + x_0 - 2x_0 y - x_0)^2 + (y - {x_0}^2)^2 = l^2;$$

$$(y - {x_0}^2)^2(4{x_0}^2 + 1) = l^2.$$

Рассмотрим $y - {x_0}^2 < 0$. Тогда при $x_0 = t$ имеем:

$$y = t^2 - \frac{l}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}};\ x = 2t^3 + t - 2t\left(t^2 - \frac{l}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}}\right) = t + \frac{2lt}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}}.$$

Получена функция, заданная параметрически.

Используя пример 3.1., можно найти параметрические уравнения эволюты параболы $y = x^2$: $\xi = -4x^3;\ \eta = \frac{1}{2} + 3x^2$. Докажем, что параметрические уравнения эволюты найденной функции имеют тот же вид. Для параметрически заданной функции параметрические уравнения эволюты могут быть найдены по формулам:

$$\xi = x - \frac{x'^2 + y'^2}{x'y'' - x''y'}y';\ \eta = y + \frac{x'^2 + y'^2}{x'y'' - x''y'}x'.$$

$$x' = 1 + \frac{2l}{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}};\ x'' = -3l(4t^2+1)^{-\frac{5}{2}} \cdot 8t = \frac{-24lt}{(4t^2+1)^{\frac{5}{2}}};$$

$$y' = 2t + \frac{4lt}{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}};\ y'' = 2 + 4l\frac{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}} - \frac{3}{2}(4t^2+1)^{\frac{1}{2}} \cdot 8t^2}{(4t^2+1)^3} = 2 + \frac{4l - 32lt^2}{(4t^2+1)^{\frac{5}{2}}}.$$

$$\xi = t + \frac{2lt}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} - \frac{\frac{((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)^2}{(4t^2+1)^3} + \frac{((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)^2 4t^2}{(4t^2+1)^3}}{\frac{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l}{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}}\left(2 + \frac{4l-32lt^2}{(4t^2+1)^{\frac{5}{2}}}\right) + \frac{24lt}{(4t^2+1)^{\frac{5}{2}}}\left(2t + \frac{4lt}{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}}\right)} \cdot \frac{2t((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)}{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}} =$$

$$= t + \frac{2lt}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} - \frac{((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)^3(4t^2+1)2t}{(4t^2+1)^3(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{(4t^2+1)^4}{((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)\left(2(4t^2+1)^{\frac{5}{2}} + 4l - 32lt^2\right) + 48lt^2((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)} =$$

$$= t + \frac{2lt}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} - \frac{((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)^3(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}2t}{((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)(2(4t^2+1)^{\frac{5}{2}} + 4l(4t^2+1))} = t + \frac{2lt}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} - \frac{((4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l)t}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} =$$

$$= t + \frac{2lt - t(4t^2+1)^{\frac{3}{2}} - 2lt}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} = t - t(4t^2+1) = -4t^3.$$

Учитывая аналогию, имеем:

$$\eta = t^2 - \frac{l}{(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} + \frac{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l}{2(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} = t^2 + \frac{(4t^2+1)^{\frac{3}{2}}+2l-2l}{2(4t^2+1)^{\frac{1}{2}}} = \frac{2t^2+4t^2+1}{2} = 3t^2 + \frac{1}{2}.$$

Подтверждение совпадения уравнений эволют квадратичной функции $y = x^2$ и функции, которая была найдена, получено. В пособии [4] доказано, что у каждой эволюты есть бесконечно много эвольвент, но не приведено ни одного примера, подтверждающего этот факт. Предложенные выше рассуждения как раз таким примером и являются.

4. Обратная задача эволют: алгоритм построения всех эвольвент по заданной эволюте.

Рассмотрим гладкую кривую Γ (эволюту), заданную параметрически $X = X(t),\ Y = Y(t)$. Для каждой точки $M(t) = (X(t), Y(t))$ на Γ определим касательную прямую. Далее каждая точка $M(t)$ сдвигается вдоль касательной прямой на расстояние, равное длине дуги от фиксированной точки t_0 до

t, увеличенное на константу C. При таком сдвиге получается новая кривая γ, для которой Γ является эволютой. Это происходит потому, что сдвиг вдоль касательной прямой на расстояние, равное длине дуги, гарантирует, что нормаль к γ будет совпадать с касательной к Γ.

Тогда все её эвольвенты задаются параметрическими уравнениями:

$$x(t) = X(t) - (s(t) + C) \cdot \frac{X'(t)}{\sqrt{X'(t)^2 + Y'(t)^2}},\ y(t) = Y(t) - (s(t) + C) \cdot \frac{Y\prime(t)}{\sqrt{(X\prime(t)^2 + Y\prime(t)^2)}}, \quad (4.1)$$

где $s(t) = \int_{t_0}^{t} \sqrt{(X'(t)^2 + Y'(t)^2)}\, dt$ — длина дуги эволюты от фиксированной точки t_0 до точки t, а $C \in \mathbb{R}$ — произвольная постоянная.

Доказательство. Рассмотрим точку $M(t) = (X(t), Y(t))$ на эволюте Γ. Вектор касательной к Γ в этой точке равен $m(t) = (X'(t), Y'(t))$. Единичный касательный вектор: $T(t) = \frac{(X\prime(t), Y\prime(t))}{\sqrt{X'(t)^2 + Y'(t)^2}}$. Определим точку $P(t) = (x(t), y(t))$ как сдвиг точки $M(t)$ вдоль касательной на расстояние $s(t) + C$ в направлении, противоположном движению по кривой (знак минус в (4.1)). Найдём вектор касательной к γ. Обозначим $v(t) = \sqrt{X'(t)^2 + Y'(t)^2}$. Тогда:

$$\frac{dx}{dt} = X'(t) - \frac{d}{dt}(s(t) + C) \cdot \frac{X'(t)}{v(t)} - (s(t) + C) \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{X'(t)}{v(t)}\right) =$$

$$= X'(t) - v(t) \cdot \frac{X'(t)}{v(t)} - (s(t) + C) \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{X'(t)}{v(t)}\right) = 0 - (s(t) + C) \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{X'(t)}{v(t)}\right).$$

Аналогично: $\frac{dy}{dt} = -(s(t) + C) \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{Y'(t)}{v(t)}\right)$.

Поскольку $T(t) = \left(\frac{X'(t)}{v(t)}, \frac{Y\prime(t)}{v(t)}\right)$ — единичный вектор, его производная $\frac{d}{dt}T(t)$ перпендикулярна $T(t)$ (производная единичного вектора всегда ортогональна самому вектору). Следовательно, вектор касательной к γ перпендикулярен касательной к Γ. Из формул (4.1) следует, что вектор $(X(t) - x(t), Y(t) - y(t))$ является коллинеарным касательному вектору $(X'(t), Y'(t))$ к Γ. Это означает, что точка $(X(t), Y(t))$ лежит на прямой, проходящей через $(x(t), y(t))$ и направленной вдоль касательной к Γ. Вместе с перпендикулярностью касательных это гарантирует, что нормаль к γ совпадает с касательной к Γ.

Отсюда следует, что все нормали к γ касаются Γ, а Γ является их огибающей. По определению, это означает, что Γ — эволюта γ, а γ — эвольвента Γ.

Каждому значению C соответствует своя эвольвента; при $C_1 \neq C_2$ эвольвенты различны и являются «синхронными» в смысле главы 3 (их касательные в соответствующих точках параллельны, а расстояние между точками вдоль общей нормали постоянно и равно $|C_1 - C_2|$).

Пример 4.1. Восстановите параболу $y = x^2$ по её эволюте.

Решение. Эволюта параболы $y = x^2$ задаётся параметрическими уравнениями:

$$X(t) = -4t^3, Y(t) = 3t^2 + ½.$$

Это полукубическая парабола, поскольку исключение параметра t даёт уравнение $27(Y - ½)^2 = 16X^3$. Вычислим производные функций $X(t)$ и $Y(t)$: $X'(t) = -12t^2$, $Y'(t) = 6t$. Тогда $v(t) = \sqrt{((-12t^2)^2 + (6t)^2)} = 6|t|\sqrt{(4t^2 + 1)}$. Для $t \geq 0$ имеем $v(t) = 6t\sqrt{(4t^2 + 1)}$. Вычислим длину дуги, выбирая $t_0 = 0$: $s(t) = \int_0^t 6\tau\sqrt{(4\tau^2 + 1)}\ d\tau = \frac{1}{2}((4t^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 1)$. Подставим полученные выражения для $X'(t), Y'(t), s(t)$ в равенства (4.1) при $C = \frac{1}{2}$. После упрощений получаем: $x(t) = t$, $y(t) = t^2$, то есть параметрическое уравнение исходной параболы $y = x^2$. При других значениях C получаются другие эвольвенты той же полукубической параболы.

В итоге по заданной эволюте (полукубической параболе) восстановлена исходная кривая — парабола: $y = x^2$.

Заключение. Таким образом, понятие огибающей дает широкое поле для исследования за пределами решения стандартных задач. В приведенной работе:

1. Сформулированы новые геометрические свойства некоторых известных кривых с помощью метода огибающих.

2. Продемонстрирована возможность восстановления семейств линий определенного типа по известной огибающей (решение обратной задачи).

3. Установлено, что эволюта кривой является огибающей семейства нормалей к ней, что может служить инструментом проверки расчетов.

4. Доказано, что не существует двух различных квадратичных функций, графики которых имеют общую эволюту, то есть опровергнута гипотеза о синхронных параболах, и найдены непараболические функции, синхронные с параболой.

5. Разработан и обоснован алгоритм построения всех эвольвент по заданной эволюте.

Полученные результаты могут найти применение в курсах дифференциальной геометрии, а также в прикладных задачах компьютерной графики и проектирования механизмов.

Список использованных источников:

1. Болтянский В.Г. Огибающая. Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», №3, 1987 – С. 2-7.

2. Толстов Г.П. К отысканию огибающей семейства плоских кривых, УМН, 1952, том 7, выпуск 4 – С. 173-179.

3. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: в 3 т. Т. 1 / предисл. и примеч. А. А. Флоринского. — 8-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 680 с.

UDC 514.752.6

PROPERTIES OF ENVELOPES OF FAMILIES OF CURVES

Lopata D. A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Primecheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Abstract. This paper investigates the properties of envelopes of families of curves and the solution of inverse problems. Methods for finding envelopes and reconstructing families of curves from them are considered. It is shown that the evolute is the envelope of normals, which is used to verify calculations. The hypothesis about synchronous quadratic functions is refuted, but functions with a common evolute are found. An algorithm for constructing all involutes from a given evolute is proposed.

Keywords: Envelope, family of curves, evolute, involute, inverse problem, normal, differential equation.

УДК 004.42:534.2

ГЕНЕРАЦИЯ МУЗЫКИ С ПОМОЩЬЮ L −СИСТЕМ

Кузьмицкий М.С., Сарело Е.К., студенты
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Изучено применение L −систем для алгоритмической генерации музыки. Совершен обзор существующих подходов, выявлены ограничения детерминированных моделей. Разработана программа на Python с использованием библиотеки pretty_midi, реализующая стохастическую L −систему с гармонической привязкой к аккордовой прогрессии.

Ключевые слова. L −система (система Линденмайера), алгоритмическая композиция, генеративная музыка, стохастическая грамматика, фрактальная структура, MIDI, Python, pretty_midi, гармоническая привязка, аккордовая прогрессия.

Введение. L −системы, или системы Линденмайера, представляют собой формальный аппарат параллельного переписывания, являющийся разновидностью формальных грамматик. Структурно L − система базируется на алфавите символов, служащем строительным материалом для строк, наборе порождающих правил, определяющем подстановку для каждого знака, начальной строке («аксиоме»), запускающей процесс генерации, и механизме интерпретации, трансформирующем полученную строку в геометрические или иные структуры. Теоретический фундамент был заложен в 1968 году Аристидом Линденмайером, венгерским биологом и ботаником из Утрехтского университета. Изначально Линденмайер применял данный математический инструмент для описания динамики клеток растений и симуляции процессов онтогенеза. В дальнейшем сфера применения расширилась: L −системы стали использоваться для моделирования морфологии разнообразных биологических организмов, а также для генерации самоподобных фрактальных структур, родственных системам итерируемых функций.

После определения параметров L − система запускает процесс эволюции, строго следуя заданным правилам. Точкой отсчета служит аксиома — начальное состояние системы. В ходе дальнейшего развития строка, кодирующая состояние объекта, претерпевает изменения. Этот процесс носит циклический характер и состоит из итераций. На каждом шаге строка сканируется последовательно, однако ключевой особенностью является параллелизм применения правил: замена символов происходит одновременно для всей строки текущей итерации. Для каждого символа подбирается правило, при котором данный символ выступает символом-предшественником для строки-преемника. При отсутствии явного правила для конкретного символа X применяется неявное правило тождества $X \to X$, что сохраняет символ без изменений. Если же правило найдено, символ-предшественник замещается на строку-преемник, указанную в правиле. Именно механизм параллельной замены отличает L −системы от классических грамматик Хомского и обеспечивает рост фрактальных структур.

Основная часть. Наиболее распространенными и функциональными разновидностями L −систем являются стохастические, контекстозависимые и параметрические.

Стохастические (или недетерминированные) системы внедряют элемент вероятностной неопределенности в процесс развития. В отличие от классических моделей, здесь для одного символа-предшественника может существовать несколько правил подстановки. Выбор конкретного правила осуществляется случайным образом на каждой итерации, согласно заданным вероятностям. Каждому варианту правила присваивается вес — числовое значение от нуля до единицы, сумма вероятностей для одного символа обычно равна единице. Это позволяет имитировать естественную вариативность, наблюдаемую в живой природе.

Контекстозависимый подход обобщает классическую модель, также допуская множественные правила для одного предшественника. Однако выбор правила диктуется не случайностью, а локальным окружением — контекстом. Учитываются символы, расположенные непосредственно слева или справа от обрабатываемого знака. Глубина контекста (количество учитываемых соседей) напрямую влияет на сложность системы: чем шире контекст, тем более тонкие взаимосвязи могут быть смоделированы.

Параметрические L −системы расширяют классический алфавит, снабжая символы числовыми параметрами. Эти параметры функционируют как переменные, позволяющие управлять количественными характеристиками при моделировании сложных структур. Правила переписывания в таких системах могут зависеть от текущих значений параметров, которые сами изменяются в процессе итераций по заданным математическим функциям. Это дает возможность моделировать не только форму, но и динамику роста, толщину ветвей или возраст органов.

Отдельного внимания заслуживает возможность генерации древовидных структур, которая является классическим примером применения L –систем в компьютерной графике. Ниже на рисунке 1 представлен код для генерации дерева с помощью L –системы, а на рисунке 2 изображено само дерево, получившееся в результате этой генерации.

```
def draw(commands, angle, step):
    stack = []
    for cmd in commands:
        if cmd == "F":
            turtle.pencolor("green")
            turtle.forward(step)
        elif cmd == "X":
            turtle.pencolor("red")
            turtle.dot(6)
        elif cmd == "+":
            turtle.right(angle)
        elif cmd == "-":
            turtle.left(angle)
        elif cmd == "[":
            stack.append((turtle.position(), turtle.heading()))
        elif cmd == "]":
            pos, head = stack.pop()
            turtle.penup()
            turtle.goto(pos)
            turtle.setheading(head)
            turtle.pendown()

axiom = "X"
rules = {
    "X": "F[+X][-X]FX",
    "F": "FF"
}
```

Рисунок 1 — пример кода для генерации дерева с помощью L –системы

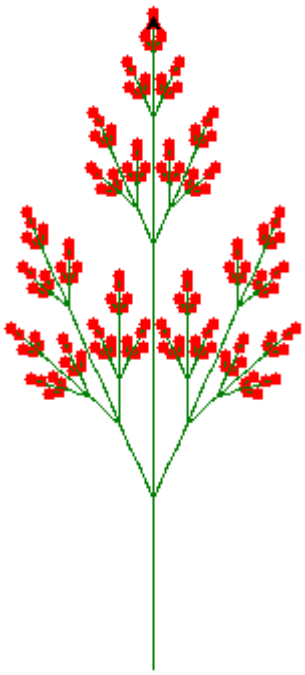


Рисунок 2 — Пример дерева, сгенерированного L –системой

На рисунке 2 представлено дерево, построенное с использованием L – системы после 4 итераций. Отчетливо видна рекурсивная самоподобная структура: каждая ветвь повторяет форму всего дерева в уменьшенном масштабе, что является характерным признаком фрактальных объектов.

Пусть горизонтальные отрезки в визуализации соответствуют длительности звучания, а вертикальные — высоте тона. Такой подход впервые систематически связал фрактальные структуры с музыкальной композицией. Метод стал фундаментом для всех последующих разработок в области алгоритмической музыки. Работа продемонстрировала, что самоподобные математические структуры могут порождать музыкально осмысленные паттерны.

Рассмотрим ключевые существующие решения для генерации музыки с использованием потенциала L −систем.

1. Работа Пшемыслава Прусинкевича (1986). Прусинкевич впервые интерпретировал строки L-систем как музыкальные партитуры по аналогии с черепашьей графикой: горизонтальные отрезки задавали длительность, вертикальные — высоту тона. Этот метод создал систематическую связь между фрактальной геометрией и композицией, став фундаментом для дальнейших исследований алгоритмической музыки.
2. Musical L-Systems Стелиоса Манусакиса (2006). Манусакис создал модульную среду на базе Max/MSP/Jitter, охватывающую все временные масштабы — от волновых форм до структуры произведения — через иерархические сети L-систем. Три метода синтеза (клеточный, слоистый, древовидный) генерировали фрактальные тембры, а ветвления строки интерпретировались как полифонические голоса. Работы автора были отмечены на конкурсе Gaudeamus.
3. L-системы в Symbolic Composer. Специализированная среда алгоритмической композиции, где L-системы работали параллельно с другими генеративными методами. Это позволяло комбинировать фрактальные структуры с классическими техниками в рамках одного проекта, демонстрируя потенциал гибридных подходов и способствуя популяризации алгоритмической композиции среди практикующих авторов.

После детального анализа решений для генерации музыки с использованием потенциала L −систем был получен вывод о том, что перечисленные инструменты остаются преимущественно математическими моделями. Музыка, сгенерированная исключительно этими методами, часто воспринимается слушателем как «генеричная или бездушная». Классические L −системы по своей природе детерминированы: идентичный ввод неизменно порождает идентичный вывод. Однако живая мелодия требует микровариаций — незаметных для глаза, но важных для уха отклонений в темпе, динамике и артикуляции. Чистые L − системы звучат «механически» именно вследствие своей математической точности и отсутствия человеческой небрежности, свойственной исполнительскому искусству.

В рамках нашей исследовательской работы была разработана программа на языке Python с использованием библиотеки pretty_midi, предназначенная для генерации музыкальных последовательностей на основе стохастической L −системы и последующего экспорта результата в формате .midi. В качестве алфавита L −системы использовался набор символов $\{F, +, -, D, d\}$, где F обозначает «проиграть текущую ноту», символы $+$ и $-$ соответствуют движению вверх или вниз, а D и d увеличивают или уменьшают длительность ноты в два раза. Аксиомой служила строка « F ». Дальнейшее развитие системы осуществлялось по стохастическим правилам переписывания, что, аналогично генерации фрактальных растений, позволяло получать различные музыкальные структуры при выборе разных наборов правил.

```
CHORD_PROGRESSION = [
    ("Am", 12.5), ("F", 12.5), ("C", 12.5), ("G", 12.5),
    ("Am", 12.5), ("Dm", 12.5), ("E", 12.5), ("Am", 12.5),
]

AXIOM = "F"
RULES = {
    "F": [
        ("F+F-F", 0.25),
        ("F-F+F", 0.25),
        ("F+dF", 0.15),
        ("F-DF", 0.15),
        ("+F-F", 0.10),
        ("-F+F", 0.10),
    ],
    "+": [("+", 0.7), ("-", 0.3)],
    "-": [("-", 0.7), ("+", 0.3)],
    "D": [("D", 1.0)],
    "d": [("d", 1.0)],
}
```

Рисунок 3 — пример аккордовой последовательности и правил стохастической L −системы

Во избежание атональности и улучшения звучания генерация мелодии осуществлялась с опорой на заранее заданную аккордовую последовательность. На основе текущего аккорда определялся набор допустимых нот, а операции «+» и «−» интерпретировались как перемещение внутри выбранной гармонической структуры. Функция интерпретации представлена ниже на рисунке 4, функции реализации стохастической L −системы на рисунке 5, а на рисунке 6 продемонстрирован фрагмент сгенерированного .midi в piano roll.

```python
def parse_lsystem_to_slots(lsystem_string):
    slots = []
    current_pitch_offset = 0 # текущая высота
    current_duration = 0.5  # начальная длительность (восьмая)
    for char in lsystem_string:
        if char == "F":
            slots.append((current_pitch_offset, current_duration))
        elif char == "+":
            current_pitch_offset = min(9, current_pitch_offset + 2)
        elif char == "-":
            current_pitch_offset = max(-9, current_pitch_offset - 2)
        elif char == "D":
            current_duration = min(2.0, current_duration * 2)
        elif char == "d":
            current_duration = max(0.25, current_duration / 2)
    return slots
```

Рисунок 4 — Интерпретация результата L —системы

```python
def _choose_rule(options):
    total_prob = sum(prob for _, prob in options)
    rand = random.uniform(0, total_prob)
    cumulative = 0
    for replacement, prob in options:
        cumulative += prob
        if rand ≤ cumulative: return replacement
    return options[-1][0]

def generate_lsystem(axiom, rules, iterations):
    s = axiom
    for _ in range(iterations):
        new_s = "".join(_choose_rule(rules[char]) if char in rules else char for char in s)
        s = new_s
        if len(s) > 5000: break # не более 5000 нот
    return s
```

Рисунок 5 — Реализация стохастической L —системы

Рисунок 6 — фрагмент сгенерированного .midi в piano roll

Заключение. В работе исследовано применение L —систем для алгоритмической композиции. Установлено, что детерминированные модели порождают механистичные последовательности, однако использование стохастических правил в разработанной программе на Python с библиотекой pretty_midi позволяет преодолеть это ограничение. Гармоническая привязка к аккордовой прогрессии обеспечивает музыкальную осмысленность генерируемых паттернов при сохранении фрактальной логики. Эксперименты подтвердили эффективность подхода для создания вариативного музыкального материала. Перспективы развития связаны с расширением параметрической модели для управления тембром и динамикой.

Список использованных источников:

1. Линденмайер А. Математические модели для клеточных взаимодействий в развитии / А. Линденмайер // Журнал теоретической биологии. — 1968. — т. 18, № 3. — с. 280–299.

2. Прусинкевич, П. Алгоритмическая красота растений / П. Прусинкевич, А. Линденмайер. — м. : мир, 1990. — 256 с.

3. Прусинкевич, П. Музыкальные l-системы / П. Прусинкевич // Труды международной компьютерной музыкальной конференции (icmc). — 1986. — с. 115–122.

4. Манусакис, С. музыкальные l-системы / С. Манусакис // proceedings of the 2006 international computer music conference. — new orleans, 2006. — с. 363–370.

5. Таубе, Г. Записки с метауровня: введение в вычислительное музыкальное мышление / г. Таубе. — м. : прогресс-традиция, 2004. — 320 с.

6. Raffensperger c. pretty_midi: a python library for working with midi files [электронный ресурс]. — 2019. — режим доступа: https://github.com/craffel/pretty-midi (дата обращения: 21.03.2026).

UDC 004.42:534.2

MUSIC GENERATION USING L – SYSTEMS

Kuzmitski M.S., Sarelo E. K., students
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. The application of L –systems for algorithmic music generation is studied. Existing approaches are reviewed and the limitations of deterministic models are identified. A Python program using the pretty_midi library was developed to implement a stochastic L-system with harmonic alignment to a chord progression.

Keywords. L –system (Lindenmayer system), algorithmic composition, generative music, stochastic grammar, fractal structure, MIDI, Python, pretty_midi, harmonic binding, chord progression.

УДК 512.743.4

АППРОКСИМАЦИЯ СУММОЙ ЭКСПОНЕНТ ДЛЯ НЕЯВНО ЗАДАННОЙ ФУНКЦИИ

Арещенко М.С., Луканский Д.Н., Хадорик М.Д., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Анисимов В.Я. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Во многих физических и экономических задачах данные подчиняются экспоненциальному закону роста, однако в более сложных случаях зависимость описывается суммой нескольких экспонент. Целью нашей работы является решение задачи восстановления неизвестных параметров функции заданной суммой экспонент с известными значениями в дискретных точках в неравномерной сетке. Использовался метод наименьших квадратов, основанный на поиске коэффициентов соответствующего дифференциального уравнения четвёртого порядка, интегрированного дважды. Проведено сравнение этого метода с альтернативными методами. Показано, что он обеспечивает малую ошибку при высокой относительно других методов скорости.

Ключевые слова. Аппроксимация, сумма экспонент, метод наименьших квадратов, дифференциальное уравнение

Наиболее известным методом аппроксимации является предложенный Лежандром и Гауссом метод наименьших квадратов (МНК) [1]. В нашем случае он основан на следующих начальных данных: пусть задано множество точек в неравномерной сетке, от нас требуется построить аппроксимирующую функцию в виде суммы экспонент.

Пусть также известно, что исходная функция $f(x) = C_1 e^{\alpha_1 x} + C_2 e^{\alpha_2 x} + C_3 e^{\alpha_3 x} + C_4 e^{\alpha_4 x}$, где $C_1, C_2, C_3, C_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – искомые параметры. Тогда $f(x)$ является решением дифференциального уравнения вида $y'''' + Ay''' + By'' + Dy' + Ey = 0$, где A, B, D и E – некоторые действительные числа. Это представление сводит нелинейную по коэффициентам $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ задачу поиска показателей к линейной.

Так как в текущей задаче точки задаются неравномерной сеткой, нахождение производных можно проводить путем построения кубического B-сплайна по заданным начальным точкам (x_i, y_i). Дифференцирование B-сплайна позволяет получить непрерывные значения первой и второй производных, необходимые для дальнейших вычислений, а выбор именно B-сплайна обусловлен его свойством локальности. В более простом случае с равномерной сеткой точек можно применить как сплайны, так и разностные формулы для производных k-го порядка [2].

Для определения коэффициентов A, B, D, E дважды проинтегрируем дифференциальное уравнение и получим следующее выражение, верное для каждого действительного x:

$$\begin{aligned} &y''(x) - y''(x_0) - y'''(x_0)(x - x_0) \\ &+A[y'(x) - y'(x_0) - y''(x_0)(x - x_0)] \\ &+B[y(x) - y(x_0) - y'(x_0)(x - x_0)] \\ &+D\left[\int_{x_0}^{x} y\,(t)dt - y(x_0)(x - x_0)\right] \\ &+E\left[\int_{x_0}^{x} ds \int_{x_0}^{s} y\,(t)dt\right] = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Это позволяет использовать вместо $y(x)$ кубические сплайны, обладающие свойством непрерывности для первой и второй производной. В противном случае пришлось бы столкнуться с проблемой высокой ошибки при аппроксимации третьей и четвёртой производной сплайнами.

Поскольку нам не заданы значения производных на границах интервала, а условия $S''(x_0) = 0$ и $S''(x_n) = 0$ могут оказаться ложными, в качестве граничных условий для сплайнов мы используем универсальные условия “отсутствия узла”: $S'''(x_0) = S'''(x_1)$ и $S'''(x_{n-1}) = S'''(x_n)$ [3].

Обозначим левую часть (1) за $\Phi(x, A, B, D, E)$. Для нахождения коэффициентов A, B, D, E достаточно минимизировать сумму квадратов:

$$\sum_{i=0}^{n} \Phi(x_i, A, B, D, E)^2 \tag{2}$$

Вычислим частные производные Φ по A, B, D, E и приравняем их к нулю, получая систему линейных уравнений, решение которой даст искомые коэффициенты:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n}(K_iL_i + AL_i^2 + BM_iL_i + DN_iL_i + ES_iL_i) = 0 \\ \sum_{i=0}^{n}(K_iM_i + AL_iM_i + BM_i^2 + DN_iM_i + ES_iM_i) = 0 \\ \sum_{i=0}^{n}(K_iN_i + AL_iN_i + BM_iN_i + DN_i^2 + ES_iN_i) = 0 \\ \sum_{i=0}^{n}(K_iS_i + AL_iS_i + BM_iS_i + DN_iS_i + ES_i^2) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

С целью сокращения записи использованы следующие обозначения:

$$\begin{cases} K_i = y''(x_i) - y''(x_0) - y'''(x_0)(x_i - x_0) \\ L_i = y'(x_i) - y'(x_0) - y''(x_0)(x_i - x_0) \\ M_i = y(x_i) - y(x_0) - y'(x_0)(x_i - x_0) \\ N_i = \int_{x_0}^{x_i} y\,(t)dt - y(x_0)(x_i - x_0) \\ S_i = \int_{x_0}^{x_i} ds \int_{x_0}^{s} y\,(t)dt \end{cases} \quad (4)$$

Для упрощения вычислений и уменьшения ошибки численного интегрирования двойной интеграл можно заменить одинарным:

$$S_i = \int_{x_0}^{x_i} ds \int_{x_0}^{s} y(t)dt = \int_{x_0}^{x_i} (x_i - t)y(t)dt \quad (5)$$

Теперь мы можем перейти к нахождению показателей экспонент $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, исходя из того, что они будут корнями характеристического уравнения четвёртой степени, которое мы можем решить методом Феррари:

$$\alpha^4 + A\alpha^3 + B\alpha^2 + D\alpha + E = 0 \quad (6)$$

Остаётся найти C_1, C_2, C_3, C_4. Для этого применим МНК для минимизации следующего выражения:

$$\sum_{i=1}^{n}(C_1e^{\alpha_1 x} + C_2e^{\alpha_2 x} + C_3e^{\alpha_3 x} + C_4e^{\alpha_4 x})^2 \quad (7)$$

Приравняем к нулю частные производные по C_1, C_2, C_3, C_4 и составим систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n} C_1e^{2\alpha_1 x_i} + C_2e^{(\alpha_1+\alpha_2)x_i} + C_3e^{(\alpha_1+\alpha_3)x_i} + C_4e^{(\alpha_1+\alpha_4)x_i} = \sum_{i=0}^{n} y_ie^{\alpha_1 x_i} \\ \sum_{i=0}^{n} C_1e^{(\alpha_2+\alpha_1)x_i} + C_2e^{2\alpha_2 x_i} + C_3e^{(\alpha_2+\alpha_3)x_i} + C_4e^{(\alpha_2+\alpha_4)x_i} = \sum_{i=0}^{n} y_ie^{\alpha_2 x_i} \\ \sum_{i=0}^{n} C_1e^{(\alpha_3+\alpha_1)x_i} + C_2e^{(\alpha_3+\alpha_2)x_i} + C_3e^{2\alpha_3 x_i} + C_4e^{(\alpha_3+\alpha_4)x_i} = \sum_{i=0}^{n} y_ie^{\alpha_3 x_i} \\ \sum_{i=0}^{n} C_1e^{(\alpha_4+\alpha_1)x_i} + C_2e^{(\alpha_4+\alpha_2)x_i} + C_3e^{(\alpha_4+\alpha_3)x_i} + C_4e^{2\alpha_4 x_i} = \sum_{i=0}^{n} y_ie^{\alpha_4 x} \end{cases} \quad (8)$$

Из этой линейной системы мы находим последние неизвестные коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4. На этом задача построения аппроксимирующей функции завершена. Отметим также, что для определения

A, B, D, E мы можем также проинтегрировать исходное дифференциальное уравнение четыре раза. В этом случае мы получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} & y(x) - y(x_0) - y'(x_0)(x - x_0) - \frac{y''(x_0)}{2}(x - x_0)^2 - \frac{y'''(x_0)}{6}(x - x_0)^3 \\ & + A\left[\int_{x_0}^{x} y\,(t)dt - y(x_0)(x - x_0) - \frac{y'(x_0)}{2}(x - x_0)^2 - \frac{y''(x_0)}{6}(x - x_0)^3\right] \\ & + B\left[\int_{x_0}^{x} d\,s \int_{x_0}^{s} y\,(t)dt - \frac{y(x_0)}{2}(x - x_0)^2 - \frac{y'(x_0)}{6}(x - x_0)^3\right] \\ & + D\left[\int_{x_0}^{x} d\,s \int_{x_0}^{s} d\,\xi \int_{x_0}^{\xi} y\,(t)dt - \frac{y(x_0)}{6}(x - x_0)^3\right] \\ & + E\left[\int_{x_0}^{x} d\,s \int_{x_0}^{s} d\,\xi \int_{x_0}^{\xi} d\,\tau \int_{x_0}^{\tau} y\,(t)dt\right] = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

где, в целях упрощения вычислений и уменьшения ошибки численного интегрирования двойной, тройной и четверной интегралы можно заменить одинарными:

$$\begin{aligned} & \int_{x_0}^{x} d\,s \int_{x_0}^{s} y\,(t)dt = \int_{x_0}^{x} (x - t)y(t)dt \\ & \int_{x_0}^{x} d\,s \int_{x_0}^{s} d\,\xi \int_{x_0}^{\xi} y\,(t)dt = \int_{x_0}^{x} \frac{(x - t)^2}{2} y(t)dt \\ & \int_{x_0}^{x} d\,s \int_{x_0}^{s} d\,\xi \int_{x_0}^{\xi} d\,\mathrm{t} \int_{x_0}^{\tau} y\,(t)dt = \int_{x_0}^{x} \frac{(x - t)^3}{6} y(t)dt \end{aligned} \tag{10}$$

Дальнейший расчет параметров $C_1, C_2, C_3, C_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ выполняется по той же схеме, что и в случае с двойным интегрированием. Стоит отметить, что при четырехкратном интегрировании отпадает необходимость в использовании сплайнов для нахождения производных, так как итоговое выражение их больше не содержит.Сравним наш метод с ещё одним альтернативным: решение линейной системы, зависящей от четвёртой производной, которая получается, если не интегрировать дифференциальное уравнение.

$$\begin{cases} A\sum_{i=0}^{n} (y_i^{(3)})^2 + B\sum_{i=0}^{n} y_i^{(3)} y_i^{(2)} + D\sum_{i=0}^{n} y_i^{(3)} y_i{}' + E\sum_{i=0}^{n} y_i^{(3)} y_i = -\sum_{i=0}^{n} y_i^{(4)} y_i^{(3)} \\ A\sum_{i=0}^{n} y_i^{(2)} y_i^{(3)} + B\sum_{i=0}^{n} (y_i^{(2)})^2 + D\sum_{i=0}^{n} y_i^{(2)} y_i{}' + E\sum_{i=0}^{n} y_i^{(2)} y_i = -\sum_{i=0}^{n} y_i^{(4)} y_i^{(2)} \\ A\sum_{i=0}^{n} y_i{}' y_i^{(3)} + B\sum_{i=0}^{n} y_i{}' y_i^{(2)} + D\sum_{i=0}^{n} (y_i{}')^2 + E\sum_{i=0}^{n} y_i{}' y_i = -\sum_{i=0}^{n} y_i^{(4)} y_i{}' \\ A\sum_{i=0}^{n} y_i y_i^{(3)} + B\sum_{i=0}^{n} y_i y_i^{(2)} + D\sum_{i=0}^{n} y_i y_i{}' + E\sum_{i=0}^{n} (y_i)^2 = -\sum_{i=0}^{n} y_i^{(4)} y_i \end{cases} \tag{11}$$

Поскольку понадобится аппроксимировать производные вплоть до третьей, сплайн пятой степени приблизит их намного точнее кубического и, соответственно, ошибки будут оказывать большее влияние.

В качестве третьего альтернативного подхода рассмотрим прямую интерполяцию параметров экспоненциальной функции нелинейным методом наименьших квадратов. Оценка параметров осуществляется посредством минимизации функционала невязки:

$$\Phi(\theta) = \sum_{\mathrm{i}=0}^{\mathrm{n}} \rho\left(\mathrm{r_i}(\theta)\right), \quad \mathrm{r_i}(\theta) = \hat{\mathrm{f}}(\mathrm{x_i}, \theta) - \mathrm{y_i} \tag{12}$$

где θ характеризует все искомые параметры $C_1, C_2, C_3, C_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, а в качестве функции потерь можно рассматривать $\rho(r) = r^2$, но для повышения устойчивости к шуму можно использовать сглаженную функцию:

$$\rho(r) = 2\left(\sqrt{1+\frac{r^2}{f^2}} - 1\right) f^2 \tag{13}$$

Минимизация $\Phi(\theta)$ проводится итерационным методом. На k-й итерации при текущем приближении $\theta(k)$ определяется вектор остатков и матрица Якоби:

$$\begin{aligned} r\left(\theta^{(k)}\right) &= \begin{bmatrix} r_0\left(\theta^{(k)}\right) \\ \vdots \\ r_n\left(\theta^{(k)}\right) \end{bmatrix}, \\ J\left(\theta^{(k)}\right) &= \left\{\frac{\partial r_i\left(\theta^{(k)}\right)}{\partial \theta_j}\right\}_{i,j} \end{aligned} \tag{14}$$

Шаг вычисляется из линейной системы вида:

$$\left(J\left(\theta^{(k)}\right)^{\top} J\left(\theta^{(k)}\right) + \lambda I\right) \Delta\theta^{(k)} = -J\left(\theta^{(k)}\right)^{\top} r\left(\theta^{(k)}\right) \tag{15}$$

При $\lambda \to 0$ получается классический метод Гаусса–Ньютона, а при больших λ схема переходит к градиентному спуску, что улучшает устойчивость в случае плохой обусловленности. Такое описание схемы Гаусса–Ньютона и градиентного спуска приводится в алгоритме Левенберга–Марквардта [4]. Мы использовали его модифицированную версию с Trust Region: шаг по модулю ограничен динамически изменяемой константой, которая увеличивается в случае успешного предыдущего шага (уменьшения функционала невязки), а иначе уменьшается.

Четвёртый альтернативный метод, выбранный для сравнения: метод матричных пучков (Matrix Pencil Method), широко используемый в задачах преобразования сигналов. Это алгебраический метод, не требующий начального приближения. Вначале необходима интерполяция на равномерную сетку, поскольку классическая формулировка метода предполагает постоянный шаг дискретизации. Можно воспользоваться уже найденными кубическими сплайнами.

Матрицы Ганкеля $Y1$ и $Y2$ представляют собой сдвинутые на один отсчёт версии одного и того же сигнала, что позволяет выявить экспоненциальную структуру через линейные соотношения.

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{K-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_K \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{L-1} & y_L & \cdots & y_{N-2} \end{bmatrix}, \; Y_2 = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_K \\ y_2 & y_3 & \cdots & y_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_L & y_{L+1} & \cdots & y_{N-1} \end{bmatrix} \tag{16}$$

Здесь L – параметр окна, удовлетворяющий $4 < L < N - 4$, а $K = N - L$. Наша реализация использует стандартное значение $L = [\frac{N}{3}]$.

Для повышения устойчивости к шуму выполняется сингулярное разложение:

$$Y_1 = U\Sigma V^{\top} = \sum_{i=1}^{\min(L,K)} \sigma_i \, u_i v_i^{\top} \tag{17}$$

где $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots$ – сингулярные числа, u_i и v_i – левые и правые сингулярные векторы [5].

Сохраняются только 4 наибольших сингулярных числа, соответствующих сигналу, а малые значения отбрасываются как шум: $U_4 = [u_1, \ldots, u_4], \quad V_4 = [v_1, \ldots, v_4]$.

Соответственно, проецируем исходные матрицы на подпространство сигнала: $Y_1^{(4)} = U_4^{\top} Y_1 V_4, \quad Y_2^{(4)} = U_4^{\top} Y_2 V_4$.

Для суммы экспонент существует линейное соотношение между сдвинутыми версиями сигнала. Это позволяет сформулировать обобщённую проблему собственных значений:

$$Y_2^{(4)} \, v = z \, Y_1^{(4)} \, v \tag{18}$$

Собственные значения z_j связаны с показателями экспонент: $\alpha_j = \frac{\ln(z_j)}{h}$, где h – шаг дискретизации.

После нахождения показателей задача становится линейной относительно амплитуд, которая решается методом наименьших квадратов. Дополнительно проведём с эксперимент, используя пятый по счёту альтернативный метод, которым выступил широкоизвестный метод Прони [6].

Поскольку классическая формулировка метода требует равномерной сетки, исходные данные, заданные на неравномерной сетке, предварительно интерполируются с помощью сплайна на равномерную сетку. После этого рассматривается последовательность значений y в заданных точках, для которой предполагается выполнение линейного рекуррентного соотношения:

$$y_{(k+M)} + a_1 y_{(k+M-1)} + \cdots + a_M y_k = 0 \tag{19}$$

Коэффициенты $a_1, \ldots, a_M$ находятся методом наименьших квадратов из переопределённой системы линейных уравнений. Далее строится характеристический многочлен

$$z^M + a_1 z^{(M-1)} + \cdots + a_M = 0 \tag{20}$$

Корни данного многочлена z_k связаны с показателями экспонент: $\alpha_k = \frac{\ln(z_k)}{h}$, где h – шаг дискретизации.

После нахождения параметров α_k коэффициенты C_kопределяются из линейной задачи наименьших квадратов.

Приступим к сравнительному анализу всех методов. Для этого была получена программная реализация методов в среде JupyterNotebook на языке Python. Разработаны функции для получения N точек на неравномерной сетке на отрезке [0, X] для заданной суммы экспонент и добавления к значениям нормально распределённого шума с заданной дисперсией. В качестве метрики используем среднеквадратическое отклонение значений в заданных изначально точках. Рассмотрим результаты аппроксимации функции $y = 1{,}6e^{-0.25x} + 1{,}1e^{-0.75x} + 0{,}7e^{-1.35x} + 0{,}4e^{-2.2x}$ и исследуем ряд важных характеристик работы методов.

Здесь и далее MPM обозначает метод матричного пучка, Prony – метод Прони, ODE3 – метод наименьших квадратов без двойного интегрирования с аппроксимацией кубическими сплайнами, ODE5 – то же, но аппроксимация происходит сплайнами пятой степени, ODE_integral – описанное в статье решение методом наименьших квадратов с двойным интегрированием и аппроксимацией кубическими сплайнами, ODE_4int – метод с четверым интегрированием дифференциального уравнения, NLS – нелинейный МНК (метод Левенберга–Марквардта с Trust Region).

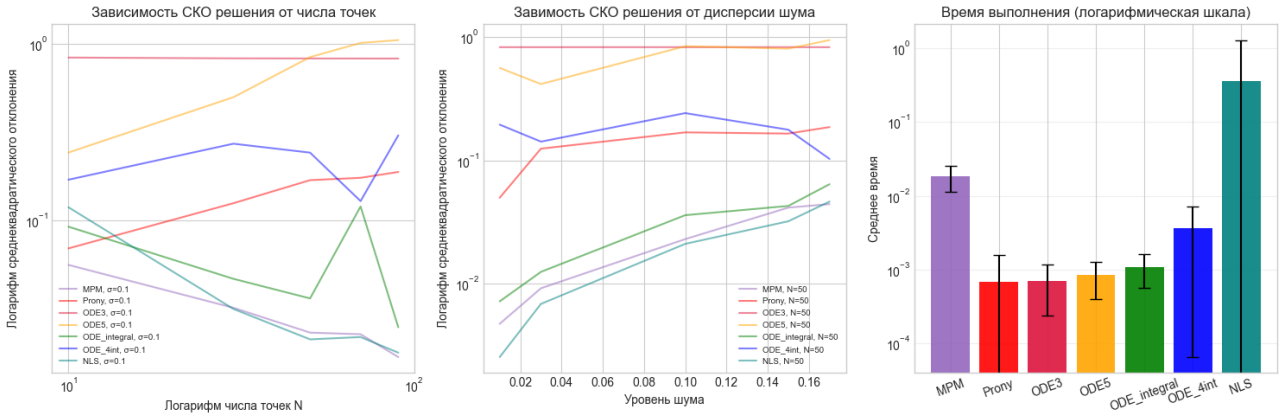


Рисунок 1 – графики исследуемых характеристик для первого примера

Из полученных графиков можно сделать несколько выводов. Во-первых, из-за большой ошибки для аппроксимации производных в МНК без двойного интегрирования точно не подходят кубические сплайны (что понятно, ведь третья производная у таких сплайнов есть кусочно-постоянная функция). Во-вторых, если в этом же методе увеличить степень сплайнов до пятой, то он всё равно заметно проиграет в точности остальным из-за сильной чувствительности к шуму, особенно при аппроксимации производных выше второго порядка. В-третьих, метод Прони и метод четырёхкратного интегрирования показывают несколько худшие результаты при различных условиях по сравнению с методом матричного пучка, методом двойного интегрирования и методом Левенберга-Марквардта. В-четвёртых, при варьировании числа узлов сетки и уровня дисперсии шума результаты трёх вышеуказанных подходов демонстрируют высокую степень близости. Однако по времени выполнения однозначно выигрывает МНК с двойным интегрированием, что видно на третьем графике рисунка 1. Метод решения нелинейной системы работает заметно медленнее остальных, поскольку он не всегда сходится, а если сходится, то за большое число итераций. У функционала в данном методе много локальных минимумов, и получение решения вычислительно дорого. Более того, успех аппроксимации зависит от удачного выбора начального приближения. Было найдено множество тестовых примеров,

для которых подход с NLS находит неоптимальное решение, при этом затрачивая на порядок большее количество времени, а именно: $y = 0{,}8e^{0.7x} + 0{,}4e^{0.9x} + 1{,}5e^{-0{,}5x} + 1{,}2e^{-0.7x}$, $y = 2{,}5e^{0.7x} + 0{,}5e^{0.9x} - 1{,}5e^{3{,}5x} - 0{,}9e^{3{,}1x}$, $y = 0{,}8e^{0.5x} - 0{,}4e^{-0{,}5x} + 1{,}5e^{-1x} - 1{,}2e^{-1.2x}$. Начальное приближение везде совпадало с таковым для первого примера. Рассмотрим значения метрик для $y = 0{,}8e^{0.7x} + 0{,}4e^{0.9x} + 1{,}5e^{-0{,}5x} + 1{,}2e^{-0.7x}$.

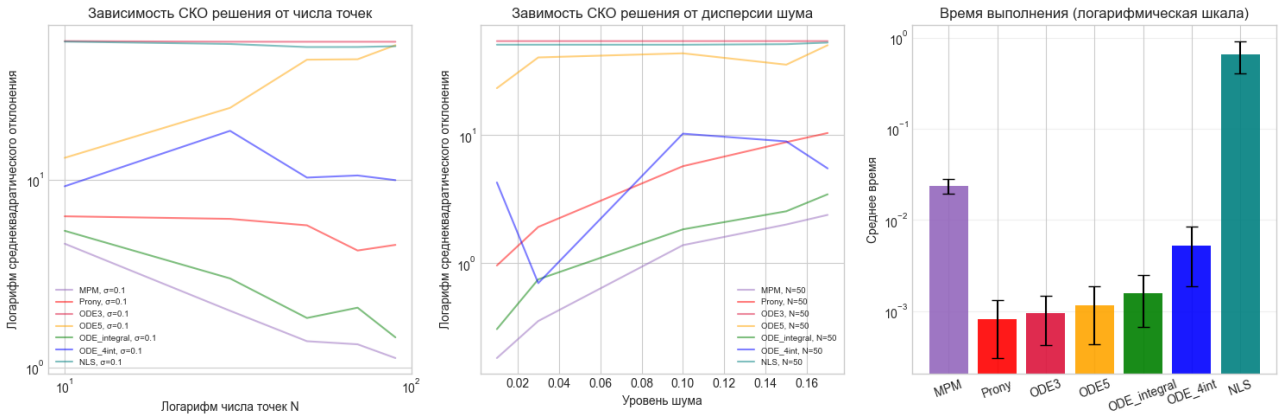


Рисунок 2 – графики исследуемых характеристик для второго примера

Рисунок опять же подтверждает все выводы, приведённые выше, и демонстрирует расходимость для нелинейного МНК. Также был проведён эксперимент с более близким начальным приближением, в результате, NLS начал сходиться, причём достаточно быстро.

При малых значениях показателей экспонент ($y = 0{,}8e^{-2.5x} + 0{,}4e^{-2x} - 1{,}5e^{-3x} - 2{,}5e^{-3.5x}$) метод Прони показал хорошие результаты, сравнимые с МРМ и методом двойного интегрирования. Также СКО приближения, полученного методом Прони и методом без интегрирования, было одним из наименьших именно при условии отсутствия шума в данных.

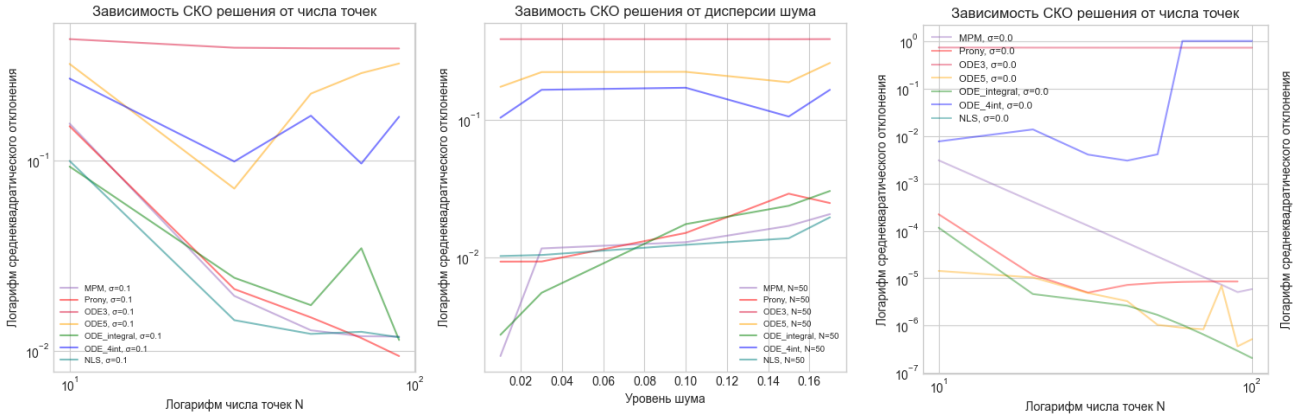


Рисунок 3 – графики исследуемых характеристик для примеров с малыми показателями экспонент, а также при отсутствии шума в данных

Таким образом, ключевым преимуществом метода Прони является высочайшая вычислительная эффективность. Однако он крайне чувствителен к шуму и малому числу точек соответственно, на многих примерах проигрывает методу матричного пучка и методу двойного интегрирования. Кроме того, обязательно требуется интерполяция на равномерную сетку.

Отличительной положительной чертой метода четырёхкратного интегрирования является отсутствие требования вычисления сплайнов для аппроксимации производных, а также некоторое сглаживание шума. Он показал достаточно хорошие результаты при максимальной зашумлённости. Отрицательные свойства: смещение модели из-за неточной аппроксимации производных на границе интервала, а также потенциально высокое число обусловленности линейной системы, в результате чего МНК в некоторых случаях не сходился. Поэтому этот подход часто лучше методов без интегрирования, но хуже двойного интегрирования. В примере $y = 0{,}7e^{0{,}7x} - 0{,}2e^{0{,}9x} + 1{,}5e^{-0{,}5x} - 1{,}2e^{-0{,}7x}$ все методы, кроме двойного интегрирования и метода матричного пучка, показали неудовлетворительные результаты.

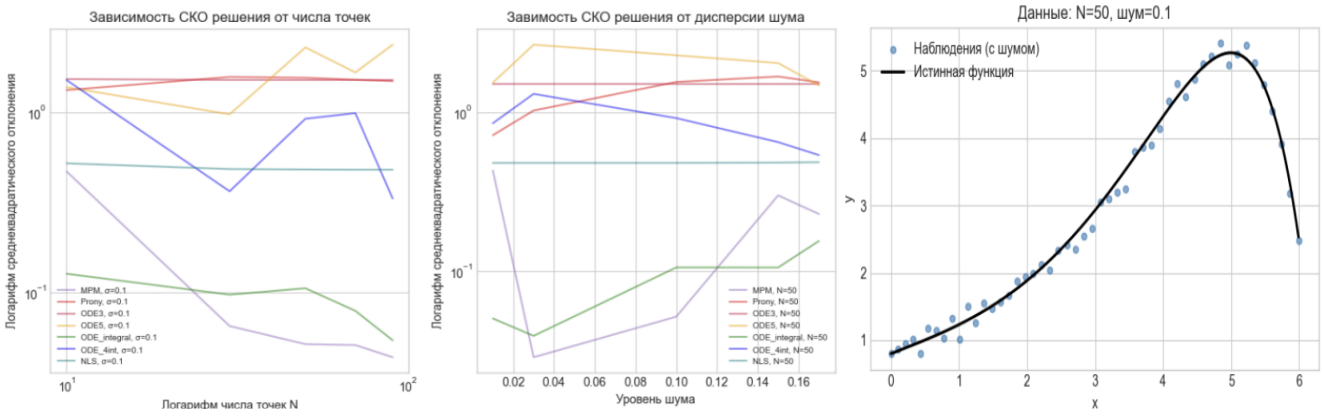


Рисунок 4 – графики исследуемых характеристик для дополнительного примера

Обобщая представленные результаты следует отметить, что предложенный метод решения МНК с двойным интегрированием дифференциального уравнения является достаточно эффективным для решения поставленной задачи, поскольку на разнообразных тестовых примерах он обеспечивает малую ошибку и вычислительную устойчивость при сравнительно низкой временной сложности. Дополнительным преимуществом метода является отсутствия требования равномерности для сетки.

Список использованных источников:

1. Бахвалов Н. С. Численные методы: учеб. пособие для вузов / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 10-е изд., стер. – М.: Лаборатория знаний, 2021. – 640 с.

2. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высш. шк., 2002. – 840 с.

3. Садовничий, В.А. Методы численного дифференцирования / В.А. Садовничий, А.А. Ларионов. – М.: МГУ, 1999. – 184 с.

4. Dennis, J.E. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений / J.E. Dennis, R.B. Schnabel. – Philadelphia: SIAM, 1996. – 378 с.

5. Hua, Y., Sarkar, T.K. Matrix Pencil Method for Estimating Parameters of Exponentially Damped Sinusoids / Y. Hua, T.K. Sarkar. – IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1990. – Vol. 38, № 5. – P. 814–824.

6. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов: учебник / А. Б. Сергиенко. — Санкт-Петербург: Питер, 2002. — 608 с.

UDC 512.743.4

APPROXIMATION BY THE SUM OF EXPONENTIALS FOR AN IMPLICITLY DEFINED FUNCTION

Areshchanka M. S., Lukansky D. M., Khadorik M. D., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Anisimov V.Y. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. In many physical and economic problems, data obeys the exponential growth law, but in more complex cases, the relationship is described by the sum of several exponentials. The purpose of our work is to solve the problem of restoring unknown parameters of a function by a given sum of exponentials with known values at discrete points in an uneven grid. The least squares method was used, based on the search for the coefficients of the corresponding fourth-order differential equation integrated twice. This method is compared with alternative methods. It is shown that it provides a small error at a high speed relative to other methods.

Keywords. Approximation, sum of exponentials, least squares method, differential equation

УДК 517.927

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Василенко Д.В., Халамов Н.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Анисимов В.Я. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация: В данной работе рассмотрены различные проекционные методы решения краевых задач дифференциальных уравнений. Проведено сравнение методов по различным метрикам и выявлены преимущества модификации Малышева обобщенного метода Галеркина по сравнению с классическими методами. Сформулированы рекомендации по выбору метода в зависимости от типа уравнения.

Ключевые слова: невязка, проекция, краевая задача, базис, коэффициенты.

Численные методы решения дифференциальных уравнений играют важную роль в математическом моделировании физических, технических и инженерных процессов. Во многих практических задачах аналитическое решение дифференциальных уравнений либо невозможно получить в явном виде, либо оно оказывается слишком сложным для использования. В таких случаях применяются приближенные методы, позволяющие находить решения с заданной точностью.

Проекционные методы – это численные методы решения дифференциальных уравнений, основанные на поиске приближенного решения в виде конечной линейной комбинации базисных функций (проекция на конечномерное подпространство). Решение удовлетворяет уравнению в среднем (по принципу ортогональности невязки), что позволяет свести дифференциальную задачу к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

К этому классу относятся метод Галеркина, метод коллокаций и метод наименьших квадратов. В методе Галеркина невязка ортогональна базисным функциям, в методе коллокаций она обращается в нуль в выбранных точках, а в методе наименьших квадратов минимизируется норма невязки.

Классические методы требуют больших затрат на вычисления. Для сложных дифференциальных уравнениях это становится серьезным препятствием. М. В. Малышев предложил модификацию, которая позволяет избежать прямого вычисления этих интегралов за счет использования специальных свойств невязки и ее производных. Идея базируется на условии минимизации невязки путем требования, чтобы средняя невязка на отрезке и средние значения ее производных обращались в нуль. Составляется следующая система:

1. $\int_0^1 R_m(x)dx = 0$
2. $\int_0^1 {R'}_m(x)dx = R_m(1) - R_m(0) = 0$
3. $\int_0^1 {R^{(j-1)}}_m(x)dx = {R^{(j-2)}}_m(1) - {R^{(j-2)}}_m(0) = 0$

Интегрирование заменяется вычислением разности производных в точках x = 0 и x = 1.

Были рассмотрены различные типы дифференциальных уравнений. Произведен анализ эффективности различных комбинаций методов, базисов и типов уравнений:

1. Уравнение Пуассона.

$$-U''(x) = \pi^2 * \sin(\pi x)\,;\; U(0) = U(1) = 0;\; x \in (0,1)$$

При выборе тригонометрического базиса, где $\varphi_k(x) = \sin(k\pi x)$ все методы продемонстрировали быструю сходимость, т.к. точное решение данного уравнения $U(x) = \sin(\pi x)$ точно представимо в выбранном тригонометрическом базисе.

Рассматривая полиномиальный базис при разном количестве базисных функций, мы получим различные результаты. С увеличением количества базисных функций среднеквадратичная оценка погрешности, используемая для оценки погрешности, уменьшается.

Приведем графики построенных приближенных решений относительно известного точного решения:

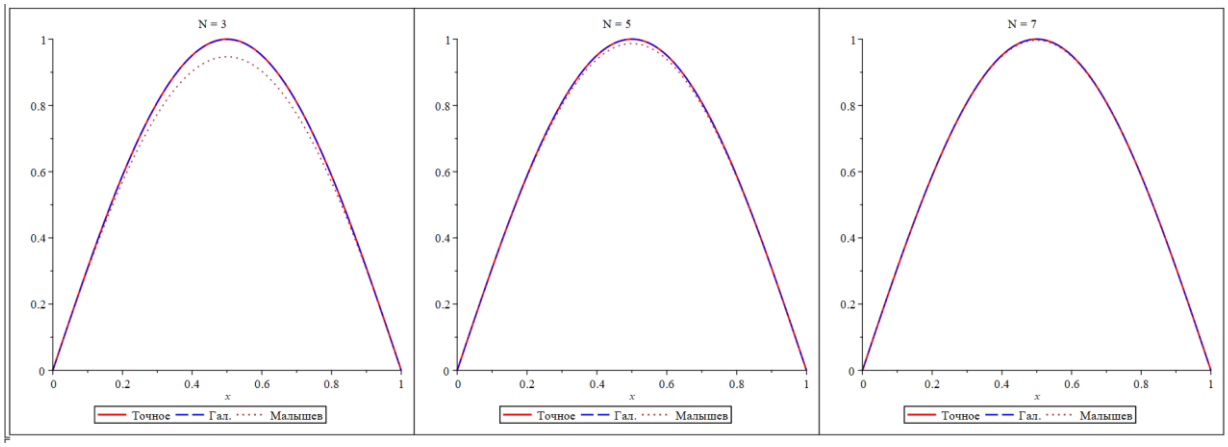


Рисунок 2 – Графики решений различными методами

В результате видно, что все методы проявляют большую точность при увеличении числа базисных функций. Модификация Малышева при малых n даёт несколько более высокую погрешность, однако с ростом числа базисных функций её точность быстро возрастает и становится сопоставимой с другими методами. Метод Галеркина при данном типе уравнения показывает наилучшие результаты, метод коллокации и МНК близки по точности.

2. Осциллирующее ДУ.

$$-U''(x) = 100\sin(10x)\,;\; U(0) = U(1) = 0;\; x \in (0,1)$$

На рассматриваемом примере с сильно осциллирующей правой частью уравнения особенно наглядно проявляется влияние выбора базисных функций на скорость сходимости приближённого решения. Тригонометрический базис демонстрирует высокую эффективность уже при малом числе членов разложения, поскольку его структура естественным образом согласована с волновым характером решения. Полиномиальный базис требует существенно большего числа функций для достижения сопоставимой точности, так как полиномы низких степеней не обладают достаточным количеством точек перегиба для описания высокочастотных колебаний на конечном интервале. Заметное визуальное приближение к точному решению возникает только при увеличении числа базисных функций.

Классические проекционные методы – метод коллокации, метод наименьших квадратов и метод Галеркина – демонстрируют близкие по порядку результаты точности при использовании одинакового базиса. Их объединяет то, что условия аппроксимации накладываются на невязку во всей области определения: либо в интегральном смысле, либо в наборе внутренних точек интервала. Благодаря этому учитывается глобальное поведение решения, включая внутреннюю осциллирующую структуру.

Особый интерес представляет обобщённый метод Галеркина в модификации М.В. Малышева. Данный подход заменяет часть интегральных условий условиями, связанными со значениями производных невязки на границах области, что позволяет существенно упростить вычисления и уменьшить объём интегрирования. В отличие от классического метода Галеркина, условия ортогональности невязки формулируются не полностью в интегральной форме, а частично через граничные соотношения.

Проведённые вычисления показывают, что при использовании устойчивого ортогонального базиса метод Малышева демонстрирует сходимость и обеспечивает уменьшение среднеквадратичной ошибки при увеличении числа базисных функций. Характер сходимости отличается от классических интегральных проекционных методов: поскольку часть условий формируется на границах интервала, метод оказывается более чувствительным к выбору базиса, и для достижения той же точности может потребоваться большее число базисных функций по сравнению с классическим методом Галеркина. Однако выигрыш в вычислительных затратах на формирование матрицы системы делает эту модификацию привлекательной для задач, где требуется многократное решение при различных параметрах.

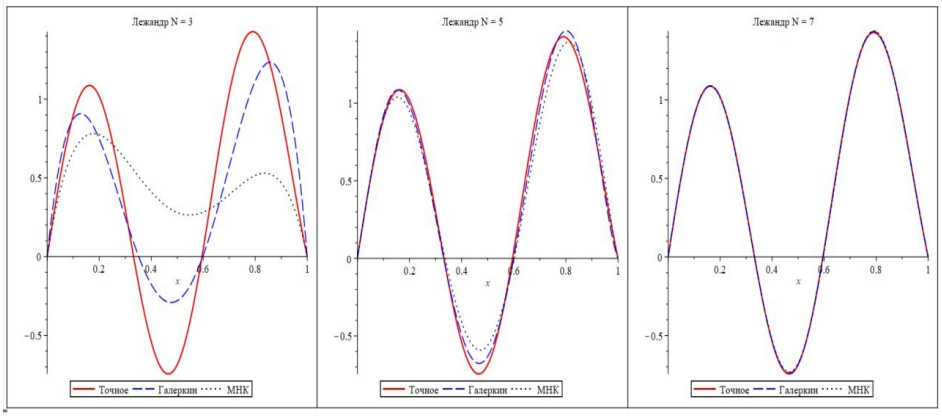


Рисунок 3 – Графики приближенных решений различными методами

Метод Малышева следующим образом работает при увеличении числа базисных функций:

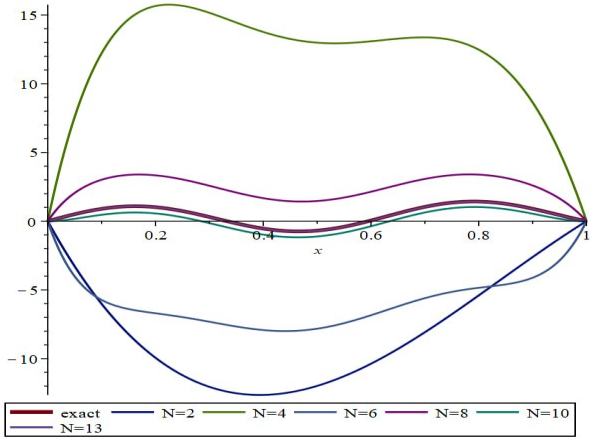


Рисунок 4 – Решение с использованием метода Малышева

3. Уравнение с пограничным слоем.

$$-\varepsilon U''(x) + U' = 1;\ U(0) = U(1) = 0;\ x \in (0,1);\ \varepsilon = 0.01$$

Метод Галеркина продемонстрировал сходимость с увеличением числа базисных функций. Полиномы Чебышева показали преимущество над тригонометрическим базисом для данного класса задач. Модификация Малышева также обеспечила уменьшение погрешности при увеличении числа базисных функций, однако потребовала аккуратного вычисления производных высших порядков. При большом числе базисных функций может наблюдаться рост чувствительности к ошибкам округления, что связано с общим ухудшением обусловленности матрицы системы – это особенность многих проекционных методов при использовании полиномиальных базисов высокого порядка, а не недостаток конкретно метода Малышева. Метод наименьших квадратов показал хорошую устойчивость при приемлемом числе обусловленности.

Таким образом, для уравнений с пограничным слоем метод Галеркина с базисом Чебышева отработал эффективно. Модификация Малышева может быть применима при необходимости снижения вычислительных затрат, но требует контроля точности вычислений производных.

4. Уравнение 4-го порядка.

$$u''''(x) = sin(\pi x), x \in (0,1),$$
$$u(0) = u(1) = 0, u'(0) = u'(1) = 0.$$

Для решения краевых задач второго и четвёртого порядка традиционные методы требуют аккуратного выбора базисных функций, удовлетворяющих всем граничным условиям. В частности, для уравнений четвёртого порядка стандартные полиномиальные базисы оказываются недостаточно гибкими, и необходимо использовать модифицированные функции, которые автоматически удовлетворяют граничным условиям.

Тригонометрический базис автоматически удовлетворяет множественным граничным условиям и показал наилучшую сходимость для всех методов. Все методы продемонстрировали монотонное уменьшение погрешности с увеличением числа базисных функций. Модификация Малышева показала приемлемую точность при заметно меньших затратах на вычисление коэффициентов системы, однако потребовала аккуратного вычисления производных высоких порядков базисных функций. Таким образом, модификация метода Малышева является эффективным компромиссом между точностью решения и сложностью вычислений, особенно для задач с высокими порядками дифференциальных операторов.

N	RMS error
2	2.6726529792e-04
4	1.8636344276e-05
6	7.0001379647e-07
8	1.6525581835e-08
10	1.2126957335e-09

Рисунок 5 – Таблица СКО для уравнения 4-го порядка, решенного методом Малышева

Выбор базисных функций оказывает большое влияние на эффективность всех методов. Полиномы Лежандра показали улучшенную обусловленность для метода Галеркина. Полиномы Чебышева рекомендованы для задач с пограничным слоем. Тригонометрические функции показали существенное преимущество для уравнений с тригонометрическими или периодическими решениями. Выбор базисных функций должен осуществляться в соответствии с характеристиками ожидаемого решения.

Классические методы являются надёжным инструментом для практического применения. Модификация Малышева демонстрирует сопоставимую точность с классическими методами при значительно меньших вычислительных затратах на формирование матрицы системы, что подтверждает теоретическое преимущество метода. Упрощение выкладок за счёт частичной замены интегрирования дифференцированием обеспечивает снижение объёма вычислений.

Выявлены практические преимущества модифицированного метода Галеркина для различных классов задач. Метод показывает хорошую точность для линейных уравнений с полиномиальными базисами при умеренном числе базисных функций. Для задач, где требуется многократное решение систем с различными параметрами (например, при параметрическом анализе), уменьшенные затраты на формирование матрицы дают существенное преимущество в общей производительности.

При этом следует учитывать, что характер сходимости метода Малышева зависит от выбора базиса: для осциллирующих решений может потребоваться большее число базисных функций по сравнению с классическим методом Галеркина. Однако это не является недостатком метода, а представляет собой особенность, обусловленную его постановкой, и компенсируется вычислительной эффективностью.

Предложенный Малышевым подход появился в конце 1950-х годов, когда экономия вычислительных ресурсов имела решающее значение. Замена интегрирования дифференцированием на границах позволяла решать задачи, недоступные классическому методу Галеркина. Несмотря на развитие вычислительной техники, метод не потерял актуальности: он востребован при многократных пересчётах краевых задач и на платформах с ограниченной производительностью. Таким образом, модификация Малышева сочетает в себе как историческую значимость, так и современную практическую ценность.

Получены количественные оценки точности и сходимости для всех комбинаций метод-базис-тип уравнения, что создаёт основу для обоснованного выбора метода в практических приложениях. Результаты исследования могут быть использованы при разработке программного обеспечения для численного решения краевых задач и при выборе методов для конкретных прикладных задач в механике, физике и инженерных дисциплинах.

Список использованных источников:

1. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. – М.: Физматгиз, 1962..

2. Малышев М.В. Приближенное интегрирование линейных дифференциальных уравнений обобщенным методом Бубнова-Галеркина для задач механики грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1959. – № 3. – С. 80-84.

3. Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа. – М.: Гостехиздат, 1950.

4. Таукенова Ф. И., Шхануков-Лафишев М. Х. Разностные методы решения краевых задач для дифференциальных уравнений дробного порядка // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2006. – Т. 46. – №. 10. – С. 1871-1881.

5. Леонов А. И. Проекционные методы решения одного класса интегро–дифференциальных уравнений //Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2004. – №. 1 (2). – С. 112-114.

UDC 517.927

COMPARATIVE ANALYSIS OF PROJECTION METHODS FOR SOLVING BOUNDARY VALUE PROBLEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS

Vasilenko D.V., Khamalov N.A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Anisimov V.Y. – PhD in Physics and Mathematics

Abstract: This paper discusses various projection methods for solving boundary value problems of differential equations. It compares the methods using different metrics and identifies the advantages of the Malyshev generalized Galerkin method over classical methods. The paper provides recommendations for choosing the method based on the type of equation.

Keywords: residual, projection, boundary value problem, basis, coefficients: residual, projection, boundary value problem, basis, coefficients

УДК 004

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ГЕЙМИФИКАЦИИ

Печерский М. Д., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Сиротко С.И. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В условиях стремительного развития информационных технологий возрастает необходимость подготовки квалифицированных специалистов, обладающих не только теоретическими знаниями, но и практическими навыками. Одним из эффективных подходов к повышению качества обучения является геймификация, предполагающая внедрение игровых элементов в образовательный процесс. В статье рассматривается влияние геймификации на подготовку специалистов в сфере информационных технологий, анализируются современные инструменты и платформы, а также их влияние на мотивацию и вовлечённость студентов. Особое внимание уделяется преимуществам и ограничениям использования геймификации в образовательной среде.

Ключевые слова. геймификация, информационные технологии, обучение, мотивация, образовательные платформы.

В условиях стремительного развития информационных технологий возрастает потребность в подготовке высококвалифицированных специалистов, обладающих не только фундаментальными теоретическими знаниями, но и практическими навыками решения профессиональных задач. Современная IT-индустрия требует от выпускников способности к быстрому обучению, адаптации к новым инструментам и технологиям, а также умения эффективно работать в условиях высокой конкуренции.

Однако традиционные методы обучения не всегда обеспечивают необходимый уровень вовлечённости студентов, особенно в дисциплинах, связанных с программированием, алгоритмами и системным проектированием. Это приводит к снижению мотивации и, как следствие, к ухудшению качества усвоения учебного материала.

Понятия «игра», «обучение на основе игр» и «геймификация» нередко трактуются как синонимы. Однако данные подходы имеют существенные различия. Геймификация предполагает использование отдельных элементов игрового дизайна, таких как баллы, уровни, достижения и рейтинги, интегрируемых в образовательный процесс, тогда как полноценные игры представляют собой самостоятельные системы с собственными правилами и целями [1–3].

Согласно ряду исследований, использование геймификации способствует повышению вовлечённости обучающихся и формированию интереса к изучаемому материалу [2, 4]. Данный подход особенно актуален в подготовке специалистов в сфере информационных технологий, где важную роль играют практико-ориентированные и интерактивные методы обучения.

Современная система подготовки специалистов в сфере информационных технологий сталкивается с рядом серьёзных вызовов. Одним из них является быстрое устаревание знаний и технологий, что требует от студентов постоянного обновления компетенций и освоения новых инструментов. Кроме того, обучение в IT-сфере связано с высокой сложностью материала и необходимостью развития практических навыков программирования и алгоритмического мышления.

Традиционные формы обучения, основанные преимущественно на лекционном изложении материала, не всегда обеспечивают достаточный уровень вовлечённости студентов. В условиях пассивного восприятия информации у обучающихся снижается интерес к предмету, что негативно сказывается на качестве подготовки [5].

Дополнительной проблемой является недостаточная мотивация студентов к самостоятельному обучению. Несмотря на наличие большого количества образовательных ресурсов, обучающиеся не всегда эффективно используют их в учебном процессе. Это обуславливает необходимость поиска подходов, способных активизировать учебную деятельность.

Одним из таких подходов является геймификация, предполагающая внедрение игровых элементов в образовательный процесс. Её использование позволяет повысить вовлечённость студентов и сделать обучение более интерактивным [2, 6].

Таким образом, целью данного исследования является анализ влияния геймификации на подготовку специалистов в сфере информационных технологий. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: рассмотреть существующие инструменты геймификации, проанализировать их влияние на образовательный процесс, а также выявить преимущества и ограничения их применения.

Одним из распространённых инструментов геймификации в образовательной среде являются

платформы систем ответа аудитории (Audience Response Systems, ARS). К таким платформам относятся онлайн-сервисы, позволяющие преподавателям проводить интерактивные опросы, тестирования и викторины в режиме реального времени. Наиболее известными примерами являются Kahoot, Quizizz и Quizlet.

В процессе подготовки специалистов в сфере информационных технологий данные платформы используются для проверки знаний по программированию, алгоритмам и другим дисциплинам. Преподаватели могут формировать тестовые задания с выбором ответа, задачами на логику или анализ кода, что позволяет оперативно оценивать уровень понимания материала студентами.

Одним из ключевых преимуществ ARS является высокая степень вовлечённости обучающихся. Элементы соревнования, рейтингов и мгновенной обратной связи стимулируют студентов к активному участию в учебном процессе, так как студенты получают возможность практически мгновенно видеть результаты своих решений и действий [6]. Кроме того, использование подобных платформ способствует развитию самостоятельности обучающихся [4].

Дополнительным преимуществом является возможность адаптации темпа обучения. Студенты могут работать в индивидуальном ритме, а преподаватель — оперативно выявлять пробелы в знаниях и корректировать учебный процесс.

Однако использование платформ ARS имеет и ряд ограничений. Их эффективность зависит от стабильности интернет-соединения, и при технических сбоях проведение занятий может быть затруднено [7]. Кроме того, формат тестирования не всегда позволяет в полной мере оценить практические навыки студентов, что важно для IT-дисциплин.

Также при использовании ARS в больших группах может снижаться вовлечённость отдельных студентов, что требует дополнительной адаптации методики преподавания, например, применения командных форм работы [8].

Геймификация в обучении специалистов в сфере информационных технологий представляет собой внедрение игровых элементов в образовательный процесс с целью повышения эффективности обучения. Данный подход ориентирован на активное участие студентов и формирование практических навыков через выполнение интерактивных заданий.

К основным элементам геймификации относятся системы баллов, уровней, достижений и рейтингов. Эти механики позволяют структурировать учебный процесс, визуализировать прогресс обучающихся и стимулировать их к выполнению заданий [2, 4]. В IT-образовании такие элементы могут использоваться при решении задач по программированию, работе с алгоритмами и освоении новых технологий.

Одним из распространённых подходов является использование платформ, на которых студенты выполняют задания различной сложности с постепенным повышением уровня. Это способствует развитию алгоритмического мышления и навыков самостоятельного поиска решений. Кроме того, возможность отслеживания прогресса позволяет обучающимся более осознанно подходить к процессу обучения [10].

Геймификация также способствует формированию активной учебной среды, в которой студенты вовлекаются в совместную деятельность и обсуждение решений. Это положительно влияет на усвоение материала и развитие командных навыков.

Вместе с тем использование геймификации требует взвешенного подхода. Чрезмерное использование игровых элементов и акцент на системе вознаграждений могут смещать внимание обучающихся с содержания обучения на форму его представления, что может снижать его эффективность [15].

Развитие цифровых технологий способствовало активному внедрению геймификации в образовательные платформы. Геймифицированные онлайн-ресурсы представляют собой веб-приложения и обучающие системы, в которых используются элементы игрового дизайна для повышения эффективности усвоения материала.

В подготовке специалистов в сфере информационных технологий такие ресурсы позволяют сочетать теоретическое обучение с практической деятельностью. Многие платформы предлагают интерактивные задания, симуляции и проектную работу, что способствует формированию прикладных навыков.

Ключевыми элементами геймифицированных онлайн-ресурсов являются системы прогресса, включающие уровни сложности, баллы, достижения и визуализацию результатов. Это позволяет обучающимся отслеживать собственное развитие и получать оперативную обратную связь, что способствует более осознанному усвоению материала [13].

Широкое распространение получили массовые открытые онлайн-курсы (MOOC), предоставляемые платформами edX, Coursera и Udacity. Использование элементов геймификации в рамках таких курсов способствует повышению активности обучающихся и эффективности освоения учебного материала [12].

Дополнительно онлайн-ресурсы могут включать адаптивные уровни сложности, индивидуальные траектории обучения и элементы социального взаимодействия, что особенно важно при изучении IT-дисциплин.

Вместе с тем эффективность геймифицированных ресурсов во многом зависит от качества их реализации и соответствия образовательным целям. Избыточное использование элементов поощрения может снижать внутреннюю мотивацию обучающихся и формировать зависимость от внешних стимулов [13].

Несмотря на широкое применение геймификации в образовательной среде, её использование в подготовке специалистов в сфере информационных технологий сопровождается рядом ограничений.

Одной из основных проблем является зависимость от внешней мотивации. Использование баллов, наград и рейтингов может приводить к тому, что обучающиеся ориентируются преимущественно на получение вознаграждений, а не на освоение знаний. При снижении или отсутствии таких стимулов уровень их вовлечённости может уменьшаться [15].

Кроме того, элементы соревновательности, такие как таблицы лидеров, оказывают неоднозначное влияние на студентов. Для части обучающихся они служат дополнительным стимулом, тогда как для других могут становиться фактором демотивации, особенно при низких результатах.

Существенным ограничением являются и технические факторы. Эффективность применения геймифицированных инструментов зависит от стабильности интернет-соединения и доступности устройств, что может затруднять их использование в образовательном процессе [7].

Также геймификация не всегда подходит для всех типов учебных задач. Сложные теоретические темы требуют более глубокого и структурированного подхода, а чрезмерное упрощение материала может приводить к поверхностному пониманию. Применение геймификации должно учитывать как педагогические, так и технические аспекты, обеспечивая баланс между игровыми элементами и содержанием обучения.

В результате проведённого анализа установлено, что геймификация может эффективно применяться в подготовке специалистов в сфере информационных технологий. Использование игровых элементов способствует организации более интерактивного и практико-ориентированного учебного процесса.

Рассмотренные инструменты, включая системы ответа аудитории и геймифицированные онлайн-ресурсы, позволяют реализовать оперативную обратную связь и структурировать процесс обучения. Это делает возможным более гибкое взаимодействие с обучающимися и адаптацию учебного материала.

В то же время применение геймификации требует учёта существующих ограничений, связанных с особенностями мотивации обучающихся, техническими условиями и спецификой учебных дисциплин.

Таким образом, геймификация может рассматриваться как перспективный инструмент повышения эффективности обучения при условии её обоснованного и сбалансированного использования.

Список литературы:

1. The Gamification of Learning and Instruction: Game-Based Methods and Strategies for Training and Education / John, W. R. // International Journal of Gaming and Computer-Mediated Simulations (IJGCMS), 2012. – P. 81-83.

2. Educational gamification vs. game-based learning: Comparative study / Al-Azawi, R., Al-Faliti, F., & Al-Blushi, M. // International Journal of Innovation, Management, and Technology, 2016. – P. 132-136.

3. Gamification: using game-design elements in non-gaming contexts / Deterding, S., Sicart, M., Nacke, L., O'Hara, K., & Dixon, D. // Proceedings of CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2011. – P. 2425-2428. Vancouver, BC, Canada.

4. What "Gamification" Is and What It's Not / Çeker, E., & Özdaml, F. // European Journal of Contemporary Education, 2017. – P. 221-228.

5. Kahoot! It: Gamification in Higher Education / Tan, A. L. D., Ganapathy, M., & Kaur, M. // Pertanika Journal of Social Sciences & Humanities, 2018. – P. 565-582.

6. Kahoot! It: Gamification in Higher Education / Tan, D., Lin, A., & Kaur, M. // Journal of Social Science & Humanities, 2018. – P. 565–582.

7. A comprehensive survey on machine learning for networking: evolution, applications and research opportunities / Boutaba, R., Salahuddin, M.A., & Liman, N. // J Internet Serv Appl 9, 16, 2018. – P. 1-99.

8. Fun and Engagement in Lecture Halls Through Social Gamification / Mader, S., & Bry, F. // International Journal of Engineering Pedagogy, 2019. – P. 117-136.

9. The Effects Of Clicker-Aided Flipped Classroom Model On Learning Achievement, Physics Anxiety And Students' Perceptions / Aşıksoy, G., & Sorakin, Y. // International Online Journal of Education and Teaching, 2018. – P. 334-346.

10. Gamification in Education / Arnold, B. // Proceedings of American Society of Business and Behavioral Sciences (ASBBS) Conference, 21(1), Las Vegas, 2014.

11. Implementation of The Gamification Concept Using KAHOOT! Among TVET Students: An Observation / Ismail, M., Sa'adan, N., Samsudin, M., Hamzah, N., Razali, N., & Mahazir, I. // Journal of Physics: Conference Series, 1140 (1), 2018. – P. 012-013.

12. Gamification of MOOCs for increasing user engagement / Vaibhav, A., & Gupta, P. // Paper presented at the 2014 IEEE International Conference on MOOC, Innovation, and Technology in Education (MITE), Patiala, Punjab, India, 2014.

13. Gamification in science education: Gamifying learning of microscopic processes in the laboratory / Fleischmann, K., & Ariel, E. // Contemporary Educational Technology, 7(2), 2016. – P. 138-159.

14. The effects of Gamification on engineering lab activities / Kim, E., Rothrock, L., & Freivalds, A. // Paper presented at the 2016 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 12-15 October, United States, 2016.

15. Gamification as an educational technology tool in engaging and motivating students: An analysis review / Sanmugam, M., Mohd Zaid, N., Mohamed, H., Abdullah, Z., Aris, B., & Md Suhadi, S. // Advanced Science Letters, 21(10), 2015. – P. 3337-3341.

UDC 004

THE IMPACT OF GAMIFICATION ON THE TRAINING OF SPECIALISTS IN THE FIELD OF INFORMATION TECHNOLOGY

Piacherskii M.D., master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Sirotko S.I. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. In the context of rapid development of information technologies, there is an increasing demand for highly qualified specialists who possess not only theoretical knowledge but also practical skills. Gamification, which involves the integration of game elements into the educational process, is considered one of the effective approaches to improving learning outcomes. This paper examines the impact of gamification on the training of specialists in the field of information technology. Modern tools and platforms are analyzed, as well as their influence on student motivation and engagement. Particular attention is paid to the advantages and limitations of using gamification in the educational environment.

Keywords: gamification, information technology, education, motivation, educational platforms.

УДК 514.144.14

КРИВЫЕ И ПОВЕРХНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Яковук Н.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе рассмотрены кривые и поверхности второго порядка, их основные уравнения и виды. Показано их применение при решении инженерных задач: построении переходных кривых, расчете зеркал и сопряжении линий.

Ключевые слова. Кривые второго порядка, поверхности второго порядка, эллипс, гипербола, парабола, эллипсоид, параболоид, гиперболоид.

Введение. Аналитическая геометрия связывает геометрические представления с алгебраическими методами, что позволяет удобно описывать и исследовать различные формы. Среди таких объектов важно место занимают кривые и поверхности второго порядка, задаваемые уравнениями второй степени. Кривые второго порядка включают эллипс, гиперболу и параболу — фигуры, которые возникают при сечении конуса плоскостью и обладают характерными геометрическими свойствами. Их пространственным продолжением являются поверхности второго порядка, используемые для описания более сложных форм. Эти объекты находят применение в задачах моделирования, проектирования и анализа, где требуется точное описание геометрии.

Основная часть. Кривые второго порядка задаются уравнением:

Формулы (включая химические) выносят отдельной строкой, отделяя пробельными строками с обеих сторон и нумеруют. Пояснения к формулам размещают без абзацного отступа начиная со строчной буквы, перечисление идет через точку с запятой:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$$

Тип кривой определяется дискриминантом:

$$\Delta = B^2 - 4AC$$

Возможны три случая:
1. Δ < 0 — эллипс.
2. Δ = 0 — парабола.
3. Δ > 0 — гипербола.

После поворота и переноса уравнение приводится к каноническому виду:
Эллипс:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Эллипс имеет фокальное расстояние и эксцентриситет равные:

$$c^2 = a^2 - b^2$$

$$e = \frac{c}{a}$$

где 0 < e < 1.

Гипербола:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Гипербола так же имеет фокальное расстояние и эксцентриситет, которые можно получить по следующим формулам:

$$c^2 = a^2 - b^2$$

$$e = \frac{c}{a}$$

где e > 1.

Парабола:

$$y^2 = 2px$$

Или

$$x^2 = 2py$$

.

Фокус параболы располагается в точке (0, p/2). А директриса находится по формуле:

$$y = -\frac{p}{2}$$

Графики кривых второго порядка можно увидеть на рисунке 1:

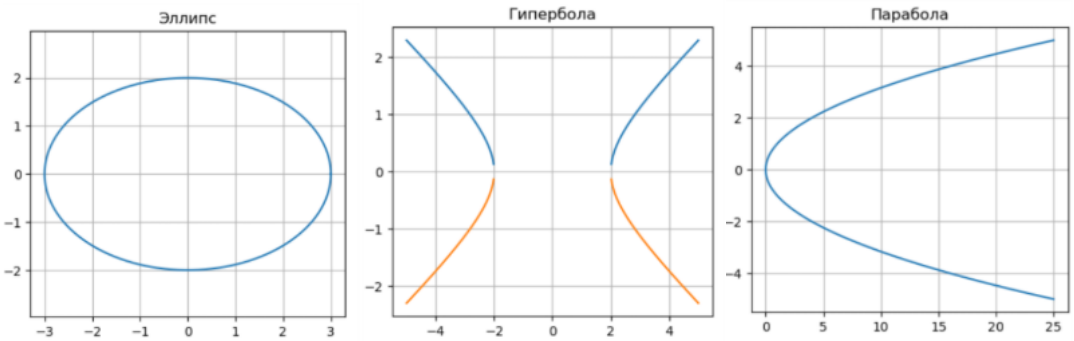


Рисунок 1 – Графики кривых второго порядка, построенных с помощью Python

Поверхности второго порядка имеют общее уравнение:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Exz + Fyz + Gx + Hy + Iz + J = 0$$

После преобразований формулы можно получить канонические формы следующих поверхностей:

Эллипсоид:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Однополостный гиперболоид:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Двуполостный гиперболоид:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1$$

Эллиптический параболоид:

$$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$$

Гиперболический параболоид:

$$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}$$

Графики поверхностей второго порядка представлены на рисунке 2.

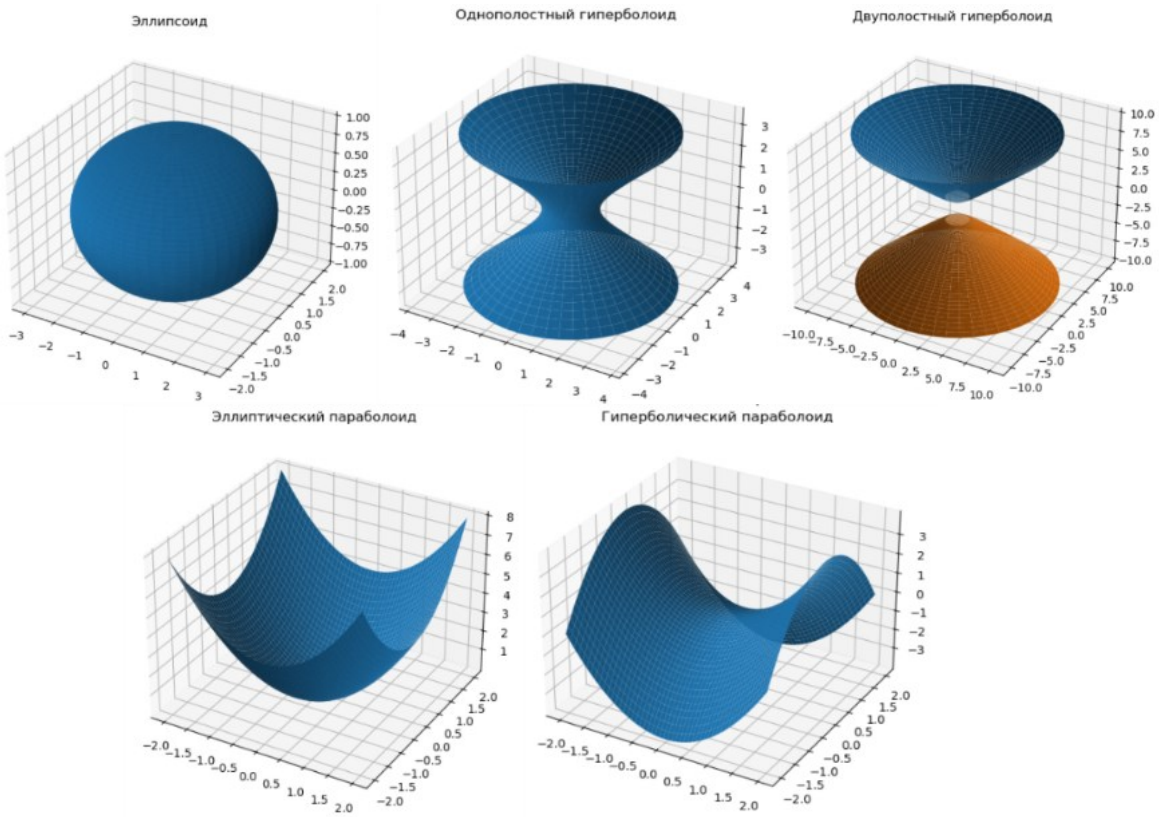


Рисунок 2 – Графики поверхностей второго порядка, построенных с помощью Python

Применение кривых и поверхностей второго порядка.

Постановка задачи. В инженерной практике часто возникает необходимость сопряжения различных криволинейных участков с обеспечением заданных геометрических характеристик: непрерывности кривизны, касания заданного порядка, прохождения через фиксированные точки. В данном разделе рассматриваются три характерные задачи, демонстрирующие применение аппарата кривых второго порядка.

Первая задача связана с проектированием переходной кривой гоночной трассы (клотоиды). Вторая задача посвящена расчету геометрических параметров гиперболического зеркала телескопа. Третья задача рассматривает сопряжение двух окружностей кривой второго порядка, что используется, например, при формировании обводов кузова автомобиля.

Методология исследования. Для решения поставленных задач применяются методы аналитической геометрии. Основными из них являются параметрическое представление кривых, анализ кривизны и условий ее непрерывности, решение систем уравнений, описывающих условия касания и прохождения кривых через заданные точки, а также классификация кривых второго порядка по значению дискриминанта.

Задача 1. Проектирование переходной кривой трассы.

Постановка задачи. При сопряжении прямолинейного участка трассы с круговым поворотом радиуса R = 50 м возникает скачкообразное изменение центростремительной силы, что недопустимо с точки зрения безопасности и комфорта движения. Требуется построить переходную кривую длины L = 60 м, обеспечивающую линейное нарастание кривизны от 0 до 1/R.

Математическая модель. Я использовал клотоиду (спираль Корню), для которой кривизна определяется выражением:

$$k(s) = \frac{s}{A^2}$$

где A – параметр кривой.

Решение. Я учел, что при s = L кривизна должна совпадать с кривизной окружности. Тогда

$$\frac{L}{A^2} = \frac{1}{R}$$

Отсюда получаем

$$A = \sqrt{L \cdot R} = \sqrt{60 \cdot 50} \approx 54{,}77 \text{ м}$$

Координаты точек клотоиды выражаются через интегралы Френеля:

$$x(t) = \int cos(u^2)du$$

$$y(t) = \int sin(u^2)du$$

Численные значения этих интегралов табулированы используются для практических расчетов.

Результат. В результате я определил параметр клотоиды A ≈ 54,77 м, который обеспечивает плавное изменение кривизны и исключает резкие динамические нагрузки.

Для решения задачи в общем виде была разработана следующая программа на языке C++:

```cpp
#include <iostream>
#include <cmath>

// Интеграл cos(u²)
double fresnel_cos(double t, int n = 1000) {
    double h = t / n;
    double sum = 0.0;

    for (int i = 0; i < n; i++) {
        double u1 = i * h;
        double u2 = (i + 1) * h;
        sum += (cos(u1 * u1) + cos(u2 * u2)) * 0.5 * h;
    }
    return sum;
}

// Интеграл sin(u²)
double fresnel_sin(double t, int n = 1000) {
    double h = t / n;
    double sum = 0.0;

    for (int i = 0; i < n; i++) {
        double u1 = i * h;
        double u2 = (i + 1) * h;
        sum += (sin(u1 * u1) + sin(u2 * u2)) * 0.5 * h;
    }
    return sum;
}

int main() {
    double L, R;
    std::cout << "Введите длину переходной кривой L: ";
    std::cin >> L;

    std::cout << "Введите радиус R: ";
    std::cin >> R;

    if (L <= 0 || R <= 0) {
        std::cout << "Ошибка: параметры должны быть положительными\n";
        return 1;
    }

    double A2 = L * R;
    double A = sqrt(A2);

    std::cout << "\nПараметр клотоиды:\n";
    std::cout << "A² = " << A2 << "\n";
    std::cout << "A = " << A << "\n";

    // Ввод параметра t (нормированная длина)
    double t;
    std::cout << "\nВведите параметр t (например 0..2): ";
    std::cin >> t;

    double x = A * fresnel_cos(t);
    double y = A * fresnel_sin(t);

    std::cout << "\nКоординаты точки:\n";
    std::cout << "x = " << x << "\n";
    std::cout << "y = " << y << "\n";

    return 0;
}
```

Рисунок 3 – Код на языке C++ для решения задачи 1 при параметрах, задаваемых пользователем

Задача 2. Расчет гиперболического зеркала телескопа Кассегрена.

Постановка задачи. В телескопе системы Кассегрена вторичное зеркало выполняется в форме выпуклой гиперболы. Один фокус гиперболы совпадает с фокусом главного параболического зеркала, а второй фокус находится в точке формирования изображения. Расстояние между фокусами гиперболы равно 2c = 1,5 м. Расстояние от вершины гиперболы до ближнего фокуса составляет a = 0,5 м.

Математическая модель. Я использовал каноническое уравнение гиперболы и формулу эксцентриситета.

Решение. Из условий получаем

$$c = \frac{1{,}5}{2} = 0{,}75 \text{ м}$$

Тогда из соотношения a, b и c найдем

$$b^2 = c^2 - a^2 = 0{,}75^2 - 0{,}5^2 = 0{,}3125$$

Эксцентриситет гиперболы равен

$$e = \frac{0{,}75}{0{,}5} = 1{,}5$$

Результат. В результате я получил уравнение гиперболы:

$$\frac{x^2}{0{,}25} + \frac{y^2}{0{,}3125} = 1$$

Для решения задачи в общем виде была разработана следующая программа на языке C++:

```cpp
#include <iostream>
#include <cmath>

int main() {
    double c2, a;

    std::cout << "Введите расстояние между фокусами (2c): ";
    std::cin >> c2;

    std::cout << "Введите параметр a: ";
    std::cin >> a;

    double c = c2 / 2.0;

    if (c <= a) {
        std::cout << "Ошибка: должно выполняться c > a\n";
        return 1;
    }

    double b2 = c * c - a * a;
    double b = sqrt(b2);
    double e = c / a;

    std::cout << "\nРезультаты:\n";
    std::cout << "c = " << c << "\n";
    std::cout << "b² = " << b2 << "\n";
    std::cout << "b = " << b << "\n";
    std::cout << "Эксцентриситет e = " << e << "\n";

    std::cout << "\nУравнение гиперболы:\n";
    std::cout << "x^2 / " << a * a << " - y^2 / " << b2 << " = 1\n";

    return 0;
}
```

Рисунок 4 – Код на языке C++ для решения задачи 2 при параметрах, задаваемых пользователем

Задача 3. Сопряжение двух окружностей кривой второго порядка.

Постановка задачи. При проектировании кузова автомобиля необходимо соединить две дуги окружностей единой кривой второго порядка, обеспечив гладкость перехода (касание) в точках сопряжения.

Исходные данные. Окружность 1 имеет радиус R_1 = 100 мм и центр $O_1(0; 0)$. Точка сопряжения M(70; 71,4) лежит на первой окружности. Производная в этой точке равна

$$y`(M) = -\frac{x}{y}$$

$$y`(M) = -\frac{70}{71{,}4} \approx -0{,}98$$

Окружность 2 имеет радиус R_2 = 60 мм и центр $O_2(180; 40)$. Точка сопряжения N(150; 91,6) лежит на первой окружности. Производная в этой точке равна

$$y`(N) = -\frac{x - x_0}{y - y_0}$$

$$y`(N) = -\frac{150 - 180}{91{,}6 - 40} = -\frac{-30}{51{,}6} \approx 0{,}58$$

Математическая модель. Искомая кривая описывается общим уравнением второго порядка. Для упрощения решения я задал условия нормировки, что позволяет получить единственное решение системы уравнений.

Для определения коэффициентов используются следующие условия:

1. Кривая проходит через точку M.
2. Кривая проходит через точку N.
3. В точке M выполняется условие касания, то есть производная совпадает с производной окружности.
4. В точке N также выполняется условие касания.

Производная неявной функции определяется формулой:

$$\mathrm{y`} = -\frac{2\mathrm{Ax} + \mathrm{By} + \mathrm{D}}{\mathrm{Bx} + 2\mathrm{Cy} + \mathrm{E}}$$

Решение. Я подставил координаты точек M и N, а также значения производных, после чего получил систему уравнений. Решив ее (при фиксированных $A = D = 1$), я определил коэффициенты B, C, E и F:

$$A = 1$$

$$B = -2{,}45$$

$$C = 2{,}48$$

$$D = 1$$

$$E = -217{,}72$$

$$F = 10184{,}30$$

Для определения типа кривой вычисляется дискриминант по формуле. Подставляя найденные значения коэффициентов, получаем

$$\Delta = (-2{,}45)^2 - 4 \cdot 1 \cdot 2{,}48 \approx -3{,}80$$

Так как Δ < 0, я сделал вывод, что полученная кривая является эллипсом.

Результат. Получено уравнение эллипса, проходящего через точки M и N и касающегося заданных окружностей. Подобный метод применяется в системах автоматизированного проектирования для построения гладких обводов сложной формы.

Для решения задачи в общем виде была разработана следующая программа на языке C++:

```cpp
#include <iostream>
#include <iomanip>
using namespace std;

int main() {
    double x1, y1, R1, x2, y2, R2;
    cout << "Введите координаты центра первой окружности (x1; y1): "; cin >> x1 >> y1;
    cout << "Введите радиус первой окружности R1 = "; cin >> R1;
    cout << "Введите координаты центра второй окружности (x2; y2): "; cin >> x2 >> y2;
    cout << "Введите радиус первой окружности R2 = "; cin >> R2;

    double xn, yn, xm, ym;
    const double EPS = 0.5;

    cout << "Введите координаты точки сопряжения, лежащей на первой окружности (xn; yn): "; cin >> xn >> yn;

    double dist1 = hypot(xn - x1, yn - y1);
    if (fabs(dist1 - R1) >= EPS) {
        cout << "Ошибка: точка (" << xn << "; " << yn << ") не лежит на первой окружности!" << endl;
        cout << "Расстояние до центра = " << dist1 << ", радиус = " << R1 << endl;
        return 1;
    }

    cout << "Введите координаты точки сопряжения, лежащей на первой окружности (xn; yn): "; cin >> xm >> ym;

    double dist2 = hypot(xn - x2, yn - y2);
    if (fabs(dist2 - R2) >= EPS) {
        cout << "Ошибка: точка (" << xn << "; " << yn << ") не лежит на второй окружности!" << endl;
        cout << "Расстояние до центра = " << dist2 << ", радиус = " << R2 << endl;
        return 1;
    }

    // Производные
    double k1 = -(xm - x1) / (ym - y1);
    double k2 = -(xn - x2) / (yn - y2);

    cout << "y'(M) = " << k1 << endl;
    cout << "y'(N) = " << k2 << endl;

    // Система для B, C, D, E
    double a[4][5];

    // (2)-(1) - убрали F
    a[0][0] = xn * yn - xm * ym;      // B
    a[0][1] = yn * yn - ym * ym;      // C
    a[0][2] = xn - xm;                // D
    a[0][3] = yn - ym;                // E
    a[0][4] = -(xn * xn - xm * xm);   // RHS

    // касание в M
    a[1][0] = xm * k1 + ym;
    a[1][1] = 2 * k1 * ym;
    a[1][2] = 1;
    a[1][3] = k1;
    a[1][4] = -2 * xm;

    // касание в N
    a[2][0] = xn * k2 + yn;
    a[2][1] = 2 * k2 * yn;
    a[2][2] = 1;
    a[2][3] = k2;
    a[2][4] = -2 * xn;

    // дополнительное уравнение (например D = 1 - нормировка)
    a[3][0] = 0;
    a[3][1] = 0;
    a[3][2] = 1;
    a[3][3] = 0;
    a[3][4] = 1;

    int n = 4;

    // Метод Гаусса
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        int maxRow = i;
        for (int k = i + 1; k < n; k++) {
            if (abs(a[k][i]) > abs(a[maxRow][i]))
                maxRow = k;
        }

        // swap
        for (int j = i; j <= n; j++) {
            double tmp = a[i][j];
            a[i][j] = a[maxRow][j];
            a[maxRow][j] = tmp;
        }

        double pivot = a[i][i];

        for (int j = i; j <= n; j++)
            a[i][j] /= pivot;

        for (int k = 0; k < n; k++) {
            if (k == i) continue;

            double factor = a[k][i];
            for (int j = i; j <= n; j++)
                a[k][j] -= factor * a[i][j];
        }
    }

    double B = a[0][4];
    double C = a[1][4];
    double D = a[2][4];
    double E = a[3][4];

    // Находим F
    double F = -(xm * xm + B * xm * ym + C * ym * ym + D * xm + E * ym);

    cout << fixed << setprecision(4);

    cout << "\nКоэффициенты:\n";
    cout << "A = 1\n";
    cout << "B = " << B << endl;
    cout << "C = " << C << endl;
    cout << "D = " << D << endl;
    cout << "E = " << E << endl;
    cout << "F = " << F << endl;

    double delta = B * B - 4 * C;

    cout << "\nΔ = " << delta << endl;

    if (delta < 0)
        cout << "Тип: эллипс\n";
    else if (delta > 0)
        cout << "Тип: гипербола\n";
    else
        cout << "Тип: парабола\n";

    return 0;
}
```

Рисунок 5 – Код на языке C++ для решения задачи 3 при параметрах, задаваемых пользователем

Заключение. В работе рассмотрены основные виды кривых и поверхностей второго порядка, их уравнения и геометрические свойства. Показана эффективность применения аналитической геометрии для решения инженерных задач: построения переходных кривых, расчета зеркал и сопряжения линий. Разработанные программные реализации на C++ подтверждают практическую ценность рассмотренных методов.

Список использованных источников:
1. Атанасян Л.С. Геометрия. – Москва: Просвещение, 2019.
2. Погорелов А.В. Аналитическая геометрия. – Мосва: Наука, 1968.
3. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия. – Москва: Физмалит, 2005.
4. Киселев А.П. Геометрия. – Москва: Физмалит, 2004.

UDC 514.144.14

CURVES AND SURFACES OF THE SECOND ORDER

Yakovuk N.V., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. The article discusses curves and surfaces of the second order, their basic equations and types. It also shows their application in solving engineering problems, such as the construction of transition curves, the calculation of mirrors and matching lines.

Keywords. Second-order curves, second-order surfaces, ellipse, hyperbola, parabola, ellipsoid, paraboloid, hyperboloid.

УДК 524.42.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЛАКТИК И КЛАСТЕРИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОЧЕЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Скробот Д.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Анисимов В.Я. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассматривается моделирование пространственного распределения галактик с использованием пуассоновского и кластерного процесса Неймана–Скотта. Для анализа применяются периодические граничные условия, K-функция Рипли, расстояния до ближайшего соседа и кластеризация DBSCAN.

Ключевые слова. Галактики, пространственное распределение, точечные процессы, пуассоновский процесс, процесс Неймана–Скотта, кластеризация, K-функция Рипли, статистический анализ, моделирование, кластерные структуры, 3D-визуализация, Space Engine, крупномасштабная структура Вселенной.

Пространственное распределение галактик отражает эволюцию крупномасштабной структуры Вселенной и требует статистических моделей, способных описывать как равномерные, так и кластеризованные конфигурации точек [1]. В работе рассматриваются две базовые модели: пуассоновский точечный процесс (полностью случайное размещение) и кластерный процесс Неймана–Скотта, в котором сначала формируются центры кластеров, а затем вокруг них генерируются дочерние точки с гауссовским разбросом.

Для минимизации краевых эффектов наблюдаемый объем задается в виде куба с периодическими граничными условиями. Такая модель эквивалентна трехмерному тору и позволяет корректно оценивать межточечные расстояния в окрестности границ. В реализации использованы параметры: размер ячейки $L = 100$, число точек пуассоновского процесса $N = 10000$, число родительских точек $N_0 = 100$, среднее число потомков $m = 100$, дисперсия кластера $\sigma = 3$. Процедура эксперимента включает генерацию реализаций, применение периодических граничных условий, оценку K-функции на сетке радиусов и расчет распределения расстояний до ближайшего соседа. Для кластеризации используется DBSCAN, а для визуального анализа формируются 3D-сцены и каталоги Space Engine. Реализация на Python обеспечивает воспроизводимость за счет фиксированного генератора случайных чисел и возможность параметрического анализа при изменении σ, N_0 и m. При вычислении расстояний используется периодическая метрика:

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=0}^{3} \min(|\Delta_k|, L = |\Delta_k|)^2}, \quad (1)$$

где Δ_k – разность координат по k-й оси.

Схема периодических граничных условий показана на рисунке 1.

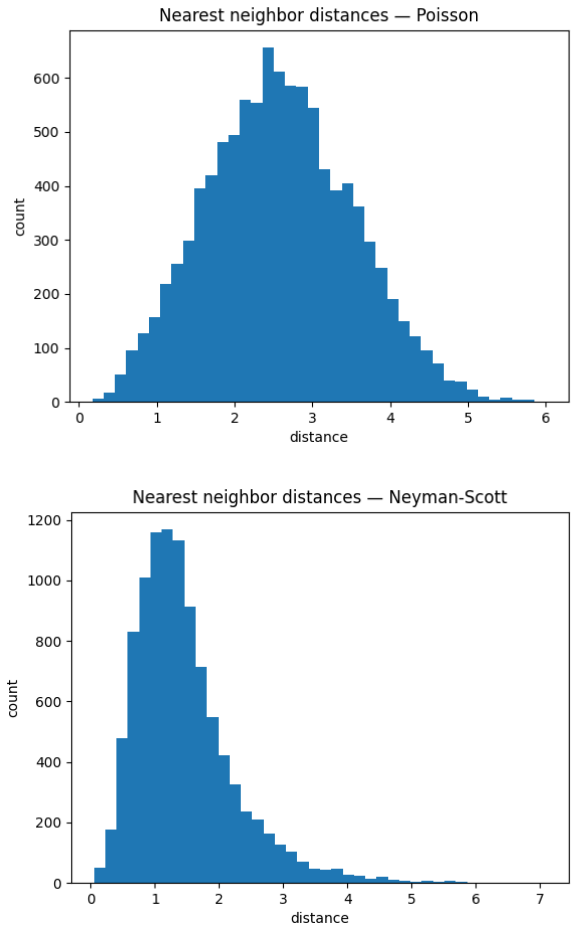


Рисунок 1 – Схематическое представление периодического объема.

Кластеризация оценивается с помощью K-функции Рипли [2]:

$$K(r) = \frac{1}{\lambda}\mathrm{E}[N_r], \tag{2}$$

где λ – интенсивность процесса; N_r – число точек на расстоянии не более r от произвольной точки. Для полностью случайного распределения в трехмерном случае $K_P(r) = \frac{4}{3}\pi r^3$. Дополнительно анализируется распределение расстояний до ближайшего соседа, чувствительное к локальному уплотнению. Для выделения скоплений применяется DBSCAN с параметрами $\varepsilon = 2.5$ и $min_samples = 10$, что соотносится с масштабом кластеров σ [3]. Построение статистик выполняется на полном наборе попарных расстояний с учетом периодичности, что обеспечивает корректное сравнение с моделью полностью случайного распределения. Величины $K(r)$ вычисляются для последовательности радиусов, что позволяет отслеживать переход от локальных структур к крупномасштабной однородности. Параметры DBSCAN подбираются так, чтобы отделять плотные ядра кластеров и сохранять разреженный фон, который интерпретируется как шум или межкластерное пространство.

Полученные результаты показывают, что пуассоновский процесс дает однородное заполнение объема, а эмпирическая $K(r)$ согласуется с теоретической кривой $K_P(r)$. Для процесса Неймана–Скотта наблюдается существенное превышение $K(r)$ над $K_P(r)$ при малых r, что указывает на наличие кластеров. Гистограммы расстояний до ближайшего соседа смещаются в область меньших расстояний, подтверждая локальное уплотнение. Алгоритм DBSCAN выделяет компактные группы и шумовые точки, сохраняя естественную неоднородность распределения. Примеры реализаций пуассоновского и кластерного процессов приведены на рисунке 2, а сравнение K-функций – на рисунке 3.

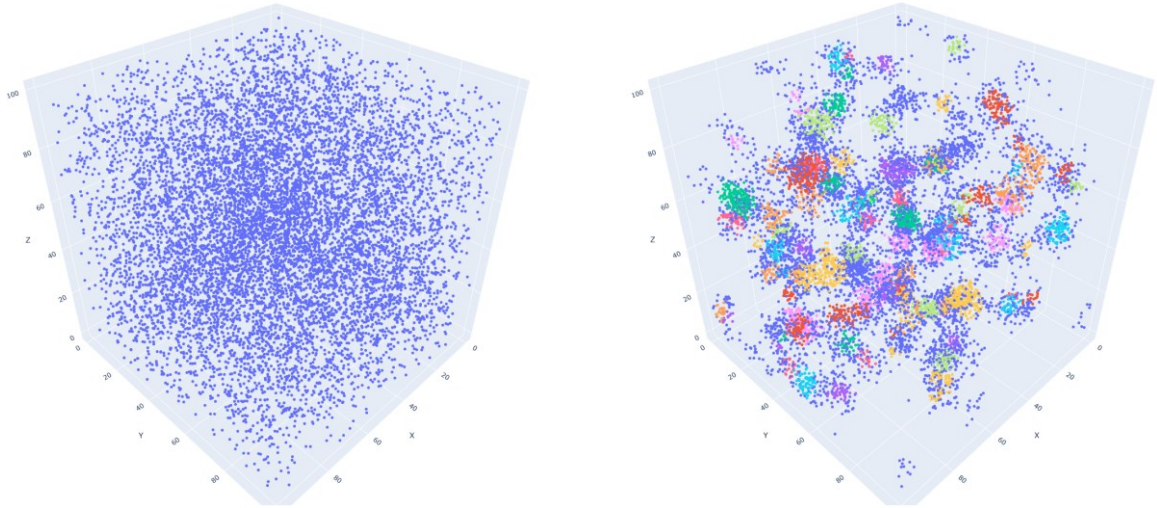


Рисунок 2 – Примеры 3D-реализаций точечных процессов.

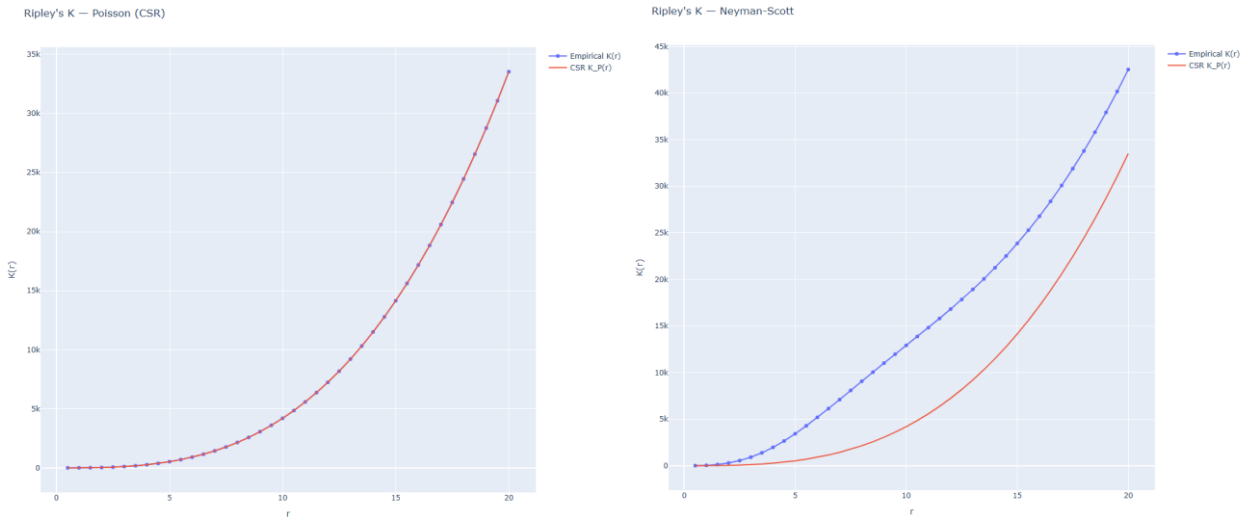


Рисунок 3 – K-функции для двух типов распределений.

Для визуальной проверки реалистичности структуры сформирован каталог для Space Engine, содержащий координаты (RA, Dec, Dist), типы галактик, абсолютные величины и ориентацию. В каталог также включены радиусы и кватернионы ориентации, что позволяет корректно отображать объекты в сцене. Визуализация в 3D подтверждает наличие скоплений и разреженных областей, что качественно согласуется с ожидаемой космической структурой. Итоговые визуализации из Space Engine приведены на рисунке 4.

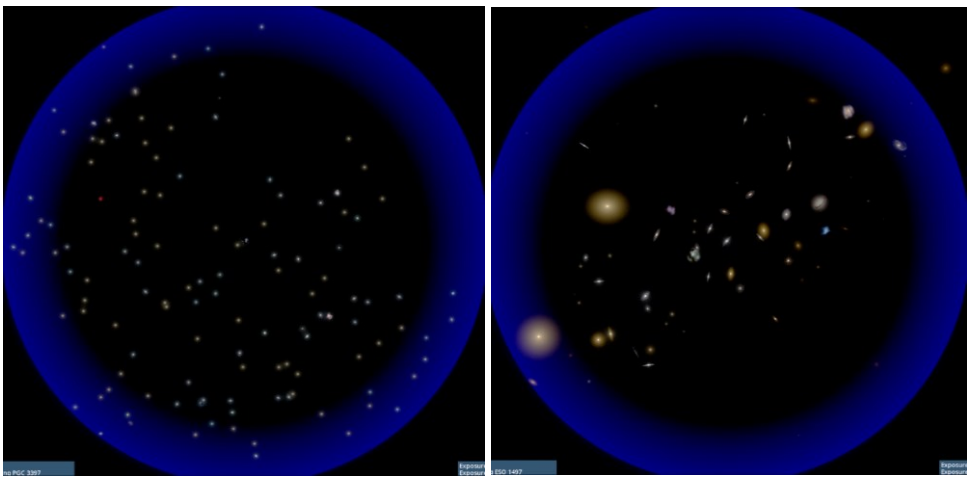


Рисунок 4 – Результат визуализации пуассоновского и кластерного распределений в Space Engine.

Практическая полезность работы заключается в том, что синтетические каталоги позволяют тестировать алгоритмы кластеризации, оценивать чувствительность статистик к параметрам модели, подбирать масштабы кластеров и проверять корректность обработки наблюдательных данных. Подобные модели применимы при подготовке вычислительных экспериментов, валидации программных средств визуализации и обучении методам пространственного анализа. Кроме того, полученный инструментарий можно использовать как основу для калибровки по реальным каталогам и моделирования эффектов наблюдательных ошибок. Практический результат состоит в наличии воспроизводимого конвейера, который объединяет статистический анализ, кластеризацию и визуальную проверку, что удобно для сравнительных исследований и настройки параметров алгоритмов.

Ограничения текущего подхода связаны с упрощенной физической моделью: не учитываются эффекты эволюции во времени, выборка по яркости, систематические искажения расстояний и влияние наблюдательных ошибок. В дальнейшем возможно расширение модели за счет анизотропных кластеров, вариативной интенсивности и сопоставления с реальными обзорными данными.

Таким образом, применение точечных процессов и K-функции Рипли позволяет количественно отличать случайные и кластерные распределения. Процесс Неймана–Скотта адекватно воспроизводит неоднородность галактических скоплений и может использоваться как базовая модель для дальнейшей калибровки по наблюдательным данным. Дополнительные статистические оценки локальных расстояний повышают интерпретируемость результатов и позволяют сравнивать модели между собой.

Список использованных источников:

1. Illian, J. Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns / J. Illian, A. Penttinen, H. Stoyan, D. Stoyan. – Chichester : Wiley, 2008. – 534 p.

2. Ripley, B. D. Modelling spatial patterns // Journal of the Royal Statistical Society. Series B, 1977. – Vol. 39, No. 2. – P. 172–212.

3. Ester, M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // Proceedings of KDD-96. – 1996. – P. 226–231.

UDC 524.42.2

MODELING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF GALAXIES AND CLUSTERING USING POINT PROCESSES

Skrobot D.A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Anisimov V.Y. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. The modeling of the spatial distribution of galaxies is examined using Poisson and Neyman–Scott cluster processes. Periodic boundary conditions, Ripley's K-function, nearest-neighbor distances, and DBSCAN clustering are employed for the analysis.

Keywords. Galaxies, spatial distribution, point processes, Poisson process, Neyman–Scott process, clustering, Ripley's K-function, statistical analysis, modeling, cluster structures, 3D visualization, Space Engine, large-scale structure of the Universe.

УДК 519.8

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИГРОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИГРОВЫХ СТРАТЕГИЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Ярцев А.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Рыкова О.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной работе исследуется сходимость статистических оценок к теоретическим параметрам математического ожидания в азартных играх (европейская рулетка, крэпс, игровые автоматы). На основе метода Монте-Карло реализована программная модель, позволяющая верифицировать закон больших чисел для процессов с отрицательным математическим ожиданием. Проведен сравнительный анализ стратегий с фиксированной ставкой и прогрессивной системы Мартингейла. Показано, что в условиях ограниченного банкролла и лимитов системы, стратегии управления ставками не изменяют фундаментальный показатель «преимущества заведения» (House Edge), а лишь трансформируют распределение вероятностей исходов, увеличивая риск катастрофического убытка.

Ключевые слова. Метод Монте-Карло, закон больших чисел, математическое ожидание, стохастическое моделирование, преимущество заведения, риск банкротства.

Математическое моделирование процессов, характеризующихся наличием случайных факторов, является одним из ключевых направлений развития теории вероятностей, истоки которой восходят к работам Блез Паскаль и Пьер Ферма, посвященным анализу игровых задач [1]. В современных условиях развития вычислительных технологий особое значение приобретает метод Монте-Карло, позволяющий осуществлять статистическое моделирование и получать оценки параметров сложных игровых систем с заданной степенью точности в случаях, когда аналитическое решение является затруднительным либо требует существенных упрощений.

Центральным понятием в анализе игровых систем является математическое ожидание выигрыша $M[X]$, которое в коммерческих азартных играх всегда смещено в пользу организатора. Данная величина, выраженная в процентах, получила название «House Edge» (преимущество заведения) [2]. Однако, несмотря на объективный характер данного свойства, в среде игроков сохраняется устойчивое заблуждение о возможности его преодоления посредством использования различных стратегий управления ставками, включая систему Мартингейла.

Система Мартингейла в своей классической форме представляет собой стратегию, основанную на удвоении ставки после каждого проигрыша, что теоретически гарантирует выигрыш начальной ставки при бесконечном банкролле и отсутствии верхнего лимита ставок [3]. Однако в реальных физических и экономических системах данные условия недостижимы. Это приводит к возникновению риска разорения игрока при достижении предела последовательных проигрышей.

Актуальность данной работы заключается в экспериментальной проверке закона больших чисел [4], согласно которому среднее значение выборки случайных величин при достаточно большом количестве испытаний n стремится к их математическому ожиданию:

$$\lim_{n\to\infty} P\left(\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i - M[X]\right| < \varepsilon\right) = 1,$$

где n – количество испытаний, X_i – результат каждого отдельного испытания, $M[X]$ – теоретическое математическое ожидание, ε – сколь угодно малое положительное число, P – вероятность.

Целью работы является разработка программного комплекса для симуляции различных механик азартных игр и доказательство того, что статистические результаты на длительной дистанции неизбежно сходятся к теоретически предсказанному отрицательному значению, независимо от применяемых игровых стратегий.

Теоретические модели исследуемых игр. В данном разделе рассматриваются математические модели трёх типов игровых механик, реализованных в программном комплексе. Для каждой модели определяется вероятностное пространство и рассчитывается теоретическое значение математического ожидания выигрыша $M[X]$ на основе которого вычисляется показатель преимущества заведения (House Edge, HE) по формуле:

$$HE = -M[X] \cdot 100\%.$$

1) Модель европейской рулетки

Европейская рулетка представляет собой классическую стохастическую систему с дискретным распределением вероятностей на множестве исходов $\Omega = \{0,1,2,\dots,36\}$. Наличие сектора «зеро» (0) создает асимметрию, обеспечивающую преимущество организатора [5].

При ставке на равные шансы (например, на красный цвет) вероятность выигрыша $P(W)$ и проигрыша $P(L)$ составляют:

– $P(W) = \frac{18}{37} \approx 0{,}4865$;

– $P(L) = \frac{19}{37} \approx 0{,}5135$.

Математическое ожидание при единичной ставке:

$$M[X] = 1 \cdot P(W) + (-1) \cdot P(L) = \frac{18}{37} - \frac{19}{37} = -\frac{1}{37} \approx -0{,}0270.$$

Таким образом, теоретический HE для данной модели составляет 2,70%.

2) Модель игры в кости (Craps: Pass Line)

Ставка Pass Line в Craps является наиболее математически сбалансированной. Вероятностное пространство исходов при броске двух идеальных шестигранных костей состоит из 36 комбинаций. Вероятность выпадения суммы i обозначается как $P(S = i)$.

Процесс игры делится на два этапа:

1) Стадия «Come Out Roll» (Первый бросок)

На этом этапе возможны три сценария:

– **natural (Мгновенный выигрыш)**: сумма 7 или 11, $P(WIN_{CO}) = P(7) + P(11) = \frac{6}{36} + \frac{2}{36} = \frac{8}{36} = \frac{2}{9} \approx 0{,}2222$;

– **craps (Мгновенный проигрыш):** сумма 2, 3 или 12, $P(LOSS_{CO}) = P(2) + P(3) + P(12) = \frac{1}{36} + \frac{2}{36} + \frac{1}{36} = \frac{1}{9} \approx 0{,}1111$;

– **point (Установка «Точки»):** любая другая сумма (4, 5, 6, 8, 9, 10). $P(Point = i)$ – вероятность того, что игра перейдет во вторую стадию с установленным числом i.

2) Стадия «Point Phase» (Игра на выбывание)

Если установлена точка i, игрок продолжает бросать кости. Раунд длится до тех пор, пока не выпадет либо само число i (**выигрыш**), либо число 7 (**проигрыш**). Все остальные суммы игнорируются.

Вероятность выиграть, имея точку i, рассчитывается по формуле условной вероятности:

$$P(Win|Point = i) = \frac{P(i)}{P(i) + P(7)}.$$

3) Расчет полной вероятности выигрыша

Полная вероятность выигрыша $P(W)$ определяется как сумма вероятности мгновенного выигрыша и суммы вероятностей выигрыша на этапе «Point» для каждого возможного значения точки:

$$P(W) = P(WIN_{CO}) + \sum_{i \in \{4,5,6,8,9,10\}} \big(P(Point = i) \cdot P(Win|Point = i)\big).$$

Подставим значения в таблицу:

Точка (i)	$P(Point = i)$	$P(Win\|Point = i)$	Произведение
4 или 10	$2 \cdot \frac{3}{36} = \frac{1}{6}$	$\frac{3}{3+6} = \frac{1}{3}$	$\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{18}$
5 или 9	$2 \cdot \frac{4}{36} = \frac{2}{9}$	$\frac{4}{4+6} = \frac{2}{5}$	$\frac{2}{9} \cdot \frac{2}{5} = \frac{4}{45}$
6 или 8	$2 \cdot \frac{5}{36} = \frac{5}{18}$	$\frac{5}{5+6} = \frac{5}{11}$	$\frac{5}{18} \cdot \frac{5}{11} = \frac{25}{198}$

Итоговая вероятность выигрыша:

$$P(W) = \frac{2}{9} + \left(\frac{1}{18} + \frac{4}{45} + \frac{25}{396}\right) \approx 0{,}2222 + 0{,}2707 = 0{,}49(29).$$

4) House Edge (HE)

Математическое ожидание выигрыша при ставке в 1 условную денежную единицу (выплата 1 к 1):

$$M[X] = \big(1 \cdot P(W)\big) + \Big(-1 \cdot \big(1 - P(W)\big)\Big) = 0{,}4929 - 0{,}5070 = -0{,}0142.$$

Преимущество заведения (House Edge):

$$HE = -M[X] \cdot 100\% = 1{,}42\%.$$

В различных источниках значение варьируется от 1.41% до 1.42% из-за округления периодических дробей, в программной реализации используется 1.41%.

3) Модель сбалансированного игрового автомата (Slot Machine)

В отличие от классических настольных игр, где вероятность диктуется физическими свойствами объектов (37 секторов рулетки или 36 комбинаций костей), параметры игрового автомата в данной работе определяются программно-заданным распределением. Реализованная модель имитирует трехбарабанный слот с набором из $N = 3$ уникальных символов на каждом барабане.

Если предположить, что выпадение каждого символа равновероятно, то общее число комбинаций составляет $N^3 = 3^3 = 27$. Количество выигрышных комбинаций (джекпотов), где все три символа совпадают, равно $N = 3$ (в нашем случае, [0,0,0], [1,1,1], [2,2,2]).

Следовательно, базовая вероятность джекпота P_{base} составляет:

$$P_{base} = \frac{N}{N^3} = \frac{1}{N^2} = \frac{1}{9} \approx 0{,}1111 \text{ (или } 11{,}11\%).$$

Для обеспечения фиксированной доходности казино (в программной реализации $HE = 5\%$) вводится механизм «фильтрации» выигрышей. Реальная вероятность джекпота P_{real} рассчитывается как доля от базовой, исключающая математическое ожидание прибыли заведения:

$$P_{real} = P_{base} \cdot (1 - HE) = 0{,}1111 \cdot 0{,}95 \approx 0{,}105(5) \approx 10{,}56\%.$$

Эта разница в $0{,}55\%$ ($11{,}11\% - 10{,}56\%$) представляет собой так называемую «зону принудительного проигрыша» – ситуации, когда символы на барабанах совпали визуально, но программный алгоритм не засчитывает выигрыш в пользу удержания маржи заведения [5].

Чтобы игра оставалась математически сбалансированной при заданном HE, множитель выплаты M за джекпот должен соответствовать уравнению:

$$M[X] = (P_{real} \cdot M) + ((1 - P_{real}) \cdot (-1)) = -HE$$

Подставим значения для нахождения M:

$$(0{,}1056 \cdot M) - (1 - 0{,}1056) = -0{,}05;$$
$$0{,}1056 \cdot M - 0{,}8944 = -0{,}05;$$
$$0{,}1056 \cdot M = 0{,}8444;$$
$$M = \frac{0{,}8444}{0{,}1056} \approx 7{,}996.$$

В программной реализации значение округляется до целого числа 8x. Таким образом, при ставке в 1 условную денежную единицу, игрок получает 8 условных денежных единиц в случае успеха, что при вероятности $10{,}56\%$ в точности обеспечивает преимущество заведения в 5%.

Описанная модель характеризуется высокой дисперсией. В отличие от рулетки, где игрок проигрывает небольшие суммы часто, в слотах игрок теряет ставку в $89{,}44\%$ случаев, ожидая редкого события с высоким коэффициентом выплаты. Это создает иллюзию «близости выигрыша», что является важным психологическим аспектом азартных игр.

Метод Монте-Карло. Для верификации теоретических моделей, описанных выше, в работе использован метод Монте-Карло. Выбор данного метода обусловлен необходимостью анализа поведения стохастических систем на большой дистанции, где аналитический расчет дисперсии и риска разорения становится громоздким [4].

В программном комплексе реализован алгоритм, выполняющий $N = 10\,000$ (в программной реализации можно задать любое число N) независимых итераций (спинов/раундов) для каждой игры. Метод позволяет:

1) Визуализировать сходимость среднего выигрыша к математическому ожиданию (закон больших чисел).

2) Оценить реальное распределение прибыли и убытков в условиях высокой дисперсии (особенно для игровых автоматов).

3) Статистически подтвердить, что «House Edge» проявляется не как мгновенный отъем средств, а как детерминированная тенденция на длительном интервале.

Анализ стратегии Мартингейла. Особое внимание в работе уделено исследованию прогрессивной системы ставок – стратегии Мартингейла. Алгоритм стратегии формализован следующим образом:

– Начальная ставка b_0;

– В случае проигрыша на шаге n, следующая ставка $b_{n+1} = b_n \cdot 2$;

– В случае выигрыша возврат к b_0.

Математический анализ в рамках симуляции подтверждает «стратегию Мартингейла» [3]: несмотря на то, что вероятность выигрыша в отдельной серии высока, стратегия не изменяет математическое ожидание игры ($M[X] < 0$). В условиях симуляции были введены реалистичные ограничения, которые есть на практике в большинстве случаев:

– Лимит банкролла – конечная сумма средств игрока;

– Лимит стола (Max Bet) – ограничение максимальной ставки.

Результат программной реализации. В данном разделе представлены результаты вычислительного эксперимента, проведенного с использованием разработанного программного обеспечения. Тестирование проводилось на выборке из 10 000 итераций для каждого игрового процесса.

Анализ статистических показателей европейской рулетки и игры в кости. На рисунках 1-2 представлены примеры одной симуляции для европейской рулетки и игры в кости.

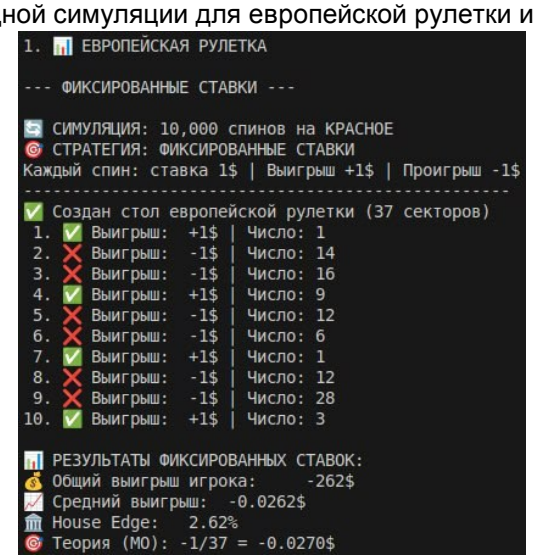


Рисунок 1 – Вывод программы для европейской рулетки (фиксированные ставки)

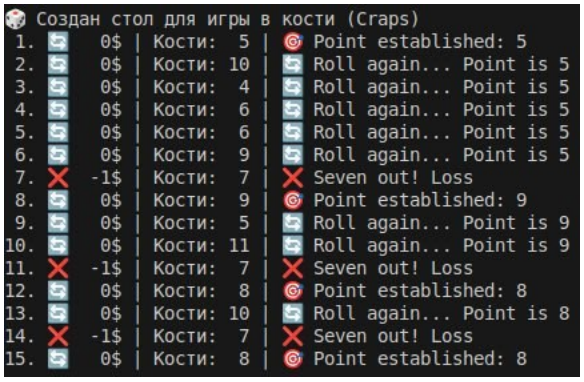


Рисунок 2 – Вывод программы для игры в кости

В ходе симуляции рулетки средний убыток на спин составил $-0{,}0262$ условных денежных единиц, что соответствует преимуществу заведения $HE = 2{,}62\%$. Полученное значение демонстрирует высокую степень сходимости с теоретическим параметром ($2{,}70\%$), относительная погрешность составила менее 3%. В игре в кости (Craps) итоговый результат ($HE = 0{,}85\%$, см. рис. 4), также подтверждает отрицательное математическое ожидание, заложенное в алгоритм, хоть и с относительной погрешностью в $39{,}72\%$ для данного тестового примера.

Верификация модели игрового автомата. Моделирование слотов (см. рис. 3) подтверждает корректность реализованного алгоритма «фильтрации» джекпотов.

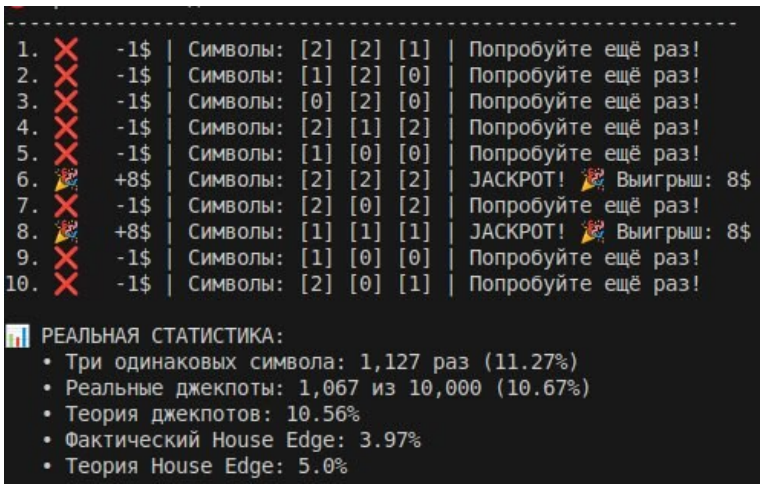


Рисунок 3 – Вывод программы для игрового автомата

Несмотря на то, что комбинаторно три одинаковых символа выпали в 11.27% случаев ($P_{base} \approx 11{,}11\%$), реальное количество выплаченных джекпотов составило 10.67%, что соответствует

заданному целевому значению $P_{real} \approx 10{,}56\%$. Это доказывает эффективность программного удержания House Edge даже в высокодисперсионных моделях.

Сравнительный анализ стратегий и закон больших чисел. Для оценки эффективности систем управления ставками была проведена сравнительная симуляция (см. рис. 4).

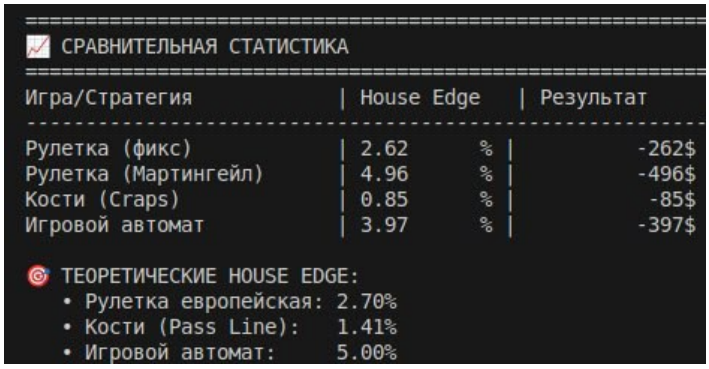


Рисунок 4 – Вывод программы для сравнительной статистики

Результаты показывают, что использование стратегии Мартингейла привело к более существенному итоговому убытку (в 496 условных денежных единиц) по сравнению с убытком с фиксированными ставками (в 262 условных денежных единиц). Это объясняется тем, что прогрессивное увеличение ставок при отрицательном математическом ожидании лишь ускоряет финансовое истощение банкролла на длинной дистанции.

Доказательством статистической достоверности полученных данных является таблица сходимости (см. рис. 5).

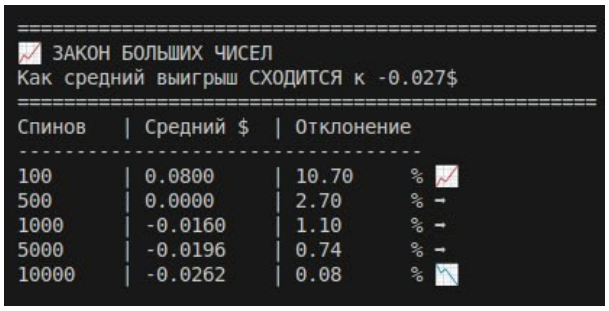


Рисунок 5 – Вывод программы для закона больших чисел

Как видно из таблицы на рисунке 5, на малых выборках (n = 100) наблюдаются значительные амплитуды отклонений (10.7%), однако при увеличении объема выборки до n = 10 000 экспериментальное значение демонстрирует сходимость к теоретическому показателю (отклонение сокращается до 0.08%). Данный результат является прямой эмпирической валидацией закона больших чисел.

Заключение. В ходе выполнения данной работы был разработан программа на языке программирования Python, позволивший провести стохастическое моделирование трех различных типов игровых механик: европейской рулетки, игры в кости и сбалансированного игрового автомата. Применение метода Монте-Карло с объемом выборки в 10 000 итераций обеспечило получение достоверных данных, которые подтверждают совпадение результатов опыта с теоретическими расчетами математического ожидания

Экспериментально зафиксированные показатели «преимущества заведения» (House Edge) для рулетки (2,62%), игры в кости (0,85%) и игрового автомата (3,97%) подтверждают корректность реализованных алгоритмов. Анализ динамики результатов наглядно продемонстрировал действие закона больших чисел: при увеличении числа испытаний относительное отклонение среднего выигрыша от теории снизилось с 10,7% до 0,08%. Это доказывает, что на линной дистанции любые случайные отклонения исчезают, и банкролл игрока неизбежно уходит в минус.

Сравнительный анализ систем управления ставками выявил, что прогрессивные стратегии, включая систему Мартингейла, не способны изменить фундаментальное математическое ожидание игры. В условиях ограниченного банкролла и лимитов ставок такие системы лишь концентрируют риск, превращая постепенное сокращение средств в вероятность мгновенного и полного разорения. Подтверждено, что ни одна стратегия ставок не может преодолеть заложенное в правила преимущество организатора.

Таким образом, результаты проведённой работы позволяют заранее предсказать неизбежность потери денег игроком. Ставки в играх, где шансы изначально на стороне игорного заведения, лишены смысла с точки зрения теории вероятностей, математической статистики и логики. Казино работает как чётко настроенная детерминированная система с заранее определённым преимуществом самого заведения в любой игровой модели, поэтому участие в подобных играх ведёт к гарантированным убыткам, особенно в долгосрочной перспективе.

Список использованных источников:

1. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах / В. Феллер ; пер. с англ. Ю. В. Прохорова. – М. : Мир, 1984. – Т. 1. – 528 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lib.ysu.am/open_books/43743_1.pdf. – Дата доступа: 05.04.2026.

2. Thorp, E. O. The Mathematics of Gambling / E. O. Thorp. – New York : Lyle Stuart, 1984. – 161 p.

3. Ширяев, А. Н. Вероятность – 1 [Электронный ресурс] / А. Н. Ширяев. – М. : МЦНМО, 2007. – 552 с. – Режим доступа: http://www.booksshare.net/books/physics/shiryaev-an/1957/files/veroyatnost1957.pdf. – Дата доступа: 05.04.2026.

4. Соболь, И. М. Метод Монте-Карло [Электронный ресурс] / И. М. Соболь. – М. : Наука, 1973. – 312 с. – Режим доступа: https://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Sobol1973ru.pdf. – Дата доступа: 05.04.2026.

5. Ethier, S. N. The Doctrine of Chances: Probabilistic Aspects of Gambling / S. N. Ethier. – Berlin : Springer Science & Business Media, 2010. – 816 p.

UDC 519.8

STATISTICAL MODELING OF GAME PROCESSES AND EVALUATION OF GAMING STRATEGIES' EFFICIENCY BY THE MONTE CARLO METHOD

Yartsev A.A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Rykova O. V. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This paper examines the convergence of statistical estimates to theoretical parameters of mathematical expectation in gambling games (European roulette, craps, slot machines). Based on the Monte Carlo method, a software model has been implemented that allows for the verification of the law of large numbers for processes with negative mathematical expectation. A comparative analysis of fixed-bet strategies and the Martingale progressive system is conducted. It has been shown that under limited bankrolls and system limits, betting strategies do not change the fundamental house edge, but merely transform the probability distribution of outcomes, increasing the risk of catastrophic losses.

Keywords: Monte Carlo simulation, law of large numbers, mathematical expectation, stochastic modeling, house edge, risk of bankruptcy.

УДК 004.056

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПАРОЛЕЙ К ЦЕЛЕВОМУ ПОДБОРУ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ ЦИФРОВОГО ПРОФИЛЯ

Живица Н.А., Мазепин Я.Д., Гормаш П.Е., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Рыкова О.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе исследуется разрыв между теоретической и практической стойкостью пользовательских паролей, возникающий в условиях доступности цифрового профиля атакующему. Показано, что формальный критерий информационной энтропии не учитывает предсказуемость паролей, построенных из персональных данных – имен, дат рождения, никнеймов. Предложена трехэтапная модель построения персонализированного словаря (ранжирование, токенизация, применение мутационных правил), реализованная и апробированная с использованием Elcomsoft System Recovery. Анализ архитектуры хранения учетных данных в Windows 10 и Windows 11 показал, что защищенность системы принципиально зависит от наличия активного модуля TPM 2.0. Приведены актуальные статистические данные, пригодные для оценки масштаба проблемы, и сформулированы практические критерии стойкости пароля к целевому подбору.

Ключевые слова. Безопасность паролей, атака по словарю, цифровой профиль, энтропия, токенизация, мутации, информационная безопасность.

Пароль остается основным средством аутентификации пользователей в подавляющем большинстве информационных систем. Классическая оценка его стойкости основывается на понятии информационной энтропии: чем длиннее пароль и шире используемый алфавит, тем больше комбинаций требуется проверить для его восстановления. Эта модель, однако, предполагает случайный и равновероятный выбор символов, что принципиально расходится с реальным поведением людей. Подавляющее большинство паролей – особенно тех, которые вводятся вручную, – не случайны: в их состав входят имена, клички животных, значимые даты, никнеймы и другие персональные данные. Когда атакующий располагает такими сведениями, теоретическая оценка стойкости теряет практический смысл.

Это подтверждается статистически. Исследование Kaspersky 2024 года, охватившее 193 миллиона паролей из реальных утечек, показало, что 45% из них взламываются менее чем за одну минуту при использовании «умных» алгоритмов подбора, а 77% – менее чем за один год. При этом всего 19% паролей содержат признаки действительно стойкой комбинации, а 57% включают хотя бы одно словарное слово. Пропасть между теоретической и реальной стойкостью объясняется именно эксплуатацией человеческих паттернов: «умная» атака за одну минуту взламывает в 4,5 раза больше паролей, чем чистый перебор, – за счет того, что наиболее вероятные варианты проверяются первыми [1].

Информационная энтропия пароля вычисляется по формуле:

$$H = L * \log_2(N),$$

где L – длина пароля, N – мощность алфавита.

Для пароля длиной 8 символов из строчных букв латиницы: $H = 8 * \log_2 26 \approx 37{,}6$ бит, что соответствует порядка $2 * 10^{11}$ комбинаций. Для перебора с высокопроизводительным оборудованием это занимает несколько часов. Пароль с буквами всех регистров, цифрами и спецсимволами при той же длине 8 символов теоретически потребует до 14 часов, а при длине 12 символов – десятков тысяч лет.

Между тем данные расчеты полностью теряют смысл, как только паролю присваивается структура, обусловленная персональными данными. Пароль вида «alex1998» формально содержит 8 символов из буквенно-цифрового алфавита и описывается значением $H \approx 41$ бит. Однако если атакующему известно, что пользователя зовут Алексей и он 1998 года рождения, этот пароль проверяется в числе первых сотен вариантов персонализированного словаря. Реальная энтропия подобного пароля стремится к нулю вне зависимости от формальных показателей.

По данным опроса Bitwarden (2025, n > 2300), 36% пользователей включают в пароль информацию, публично доступную в социальных сетях, что и создает предпосылки для эффективных целевых атак [2].

Рисунок 1 – Статистика Bitwarden «Где еще эта личная информация может появиться в интернете?»

Целевая атака с использованием профиля строится в три последовательных этапа:

1) Сбор и ранжирование данных. Персональный профиль формируется из аккаунтов в социальных сетях, мессенджеров, баз данных утечек, а при наличии физического доступа к устройству – непосредственно с него. При сборе фиксируется не только сам элемент данных, но и контекст его использования: как часто встречается имя или дата, в каком написании они присутствуют, насколько они характерны для конкретного человека. Собранные данные ранжируются по вероятности вхождения в пароль: дата рождения самого пользователя имеет более высокий приоритет, чем дата рождения двоюродного брата; основной никнейм важнее редкого игрового псевдонима, возможно выбранного случайно [3].

2) Токенизация. Персональные данные нельзя использовать в словаре в необработанном виде – их необходимо преобразовать в токены, то есть нормализованные минимальные единицы, которые могут входить в пароль. В процессе нормализации все символы приводятся к нижнему регистру, знаки препинания и спецсимволы удаляются, а составные строки разделяются: логин «alex.ivanov» преобразуется в два токена – «alex» и «ivanov». Для русскоязычной аудитории добавляются варианты транслитерации кириллицы и уменьшительные формы имен – например, «Александр» дает токены «alex», «sasha», «san», «sha». Учитываются также смешанные варианты, когда часть слова записана кириллицей, а часть – латиницей [3].

3) Мутации и маски. На основе нормализованного словаря токенов строятся маски – структурные шаблоны будущего пароля – и мутации – правила преобразования самих токенов. Маски задают структуру: «токен + две цифры», «токен + год», «токен + !». Мутации дополнительно изменяют токен: делают первую букву заглавной, переводят все в верхний регистр, добавляют числовой суффикс. Для русскоязычных пользователей наиболее характерны: заглавная первая буква (Alex), добавление года или двух цифр в конец (alex1998, alex88), добавление восклицательного знака (alex!), а также паттерн «ФамилияГод» (Ivanov1998). Замены по «хакерским» правилам l33t, напротив, среди русскоязычных пользователей встречаются значительно реже, чем в англоязычной среде [3].

Результатом является компактный словарь, который за счет мутаций расширяется до миллионов реалистичных вариантов. При этом применение более двух-трех групп мутаций одновременно нецелесообразно: объем словаря растет экспоненциально, тогда как вероятность успеха перестает расти. Следует также отметить, что все примененные правила должны фиксироваться для обеспечения воспроизводимости атаки.

Академическое исследование Murray и Malone (Entropy, 2020) количественно подтвердило этот эффект: утечка паролей лишь 1% пользователей сервиса дает достаточно информации о паттернах, чтобы потенциально скомпрометировать более 84% остальных аккаунтов того же сервиса. Персональные паттерны, таким образом, не только снижают стойкость конкретного пароля, но и создают системную уязвимость на уровне сервиса [4].

Влияние архитектуры Windows на реализацию атак. Стойкость пароля в контексте атаки нельзя рассматривать в отрыве от системы, в которой он хранится. В Windows 10 при использовании учетной записи Microsoft Account хэш пароля кэшируется локально и не защищается модулем TPM. Атакующий, получив образ системного раздела, извлекает хэш и проводит офлайновую атаку без каких-либо ограничений числа попыток – и с исключительно высокой скоростью перебора. При этом восстанавливается именно пароль к учетной записи Microsoft Account, который открывает доступ не только к компьютеру, но и к OneDrive, Hotmail, а также к депонированным ключам восстановления BitLocker.

Аналогичная уязвимость присутствует при входе по PIN-коду в системах без активного TPM: цифровые PIN-коды взламываются перебором за секунды, а образ системного раздела без TPM

переносится на произвольный компьютер и разблокируется на нем. Только четвертый из протестированных сценариев – перенос раздела с активным TPM на другой компьютер с активным TPM – соответствует заявленной Microsoft модели безопасности [5].

В Windows 11 с активным TPM 2.0 ситуация принципиально иная. PIN-код и данные Windows Hello хранятся и проверяются исключительно внутри модуля TPM; любое изменение конфигурации аппаратной части или загрузка с внешнего носителя приводят к тому, что TPM не выдает необходимый ключ. Новый тип учетных записей с беспарольным входом (passwordless) не хранит хэша пароля на диске вовсе, что делает офлайновую атаку на него технически невозможной [6]. Это принципиально изменяет предпосылки для применения персонализированных атак: без доступа к хэшу злоумышленник лишен объекта атаки вне зависимости от качества собранного профиля пользователя.

Таблица 1 – Возможность взлома паролей в различных ситуациях.

Сценарий	Хэш пароля на диске	Офлайновая атака
Windows 10, TPM отсутствует или выключен	Да	Возможна
Windows 10, TPM активен	Да	Возможна
Windows 11, TPM выключен	Да	Возможна
Windows 11, TPM активен, passwordless	Нет	Невозможна

На практике ситуацию осложняет то, что на настольных компьютерах TPM по умолчанию нередко отключен в настройках UEFI BIOS. На ноутбуках и планшетах TPM, как правило, активирован по умолчанию, что обеспечивает более высокий уровень защиты без вмешательства пользователя.

Роль ИИ в эволюции атак на пароли и противодействие на уровне экосистемы. Классические атаки на основе словарей и брутфорса существенно усилились с применением технологий машинного обучения. В 2025 году 85,6% распространенных паролей взламываются ИИ-инструментами менее чем за 10 секунд, тогда как годом ранее аналогичный показатель требовал значительно большего времени. Общее число кибератак с применением ИИ возросло на 72% по сравнению с 2024 годом; атаки с использованием скомпрометированных учетных данных (credential stuffing) стали наиболее распространенным вектором – 22% всех подтвержденных взломов в 2025 году. Объем похищенных учетных данных в первой половине 2025 года достиг 3,8 миллиарда, а стоимость одного инцидента, связанного с компрометацией учетных данных, составила в среднем 4,81 миллионов долларов США.

Принципиально новый аспект современных атак состоит в том, что ИИ-модели перешли от перебора к предсказанию: модель, обученная на миллиардах пар «профиль-пароль» из утечек, не перебирает комбинации, а генерирует вероятные кандидаты на основе поведенческих паттернов конкретного пользователя. Это делает модель токенизации, описанную выше, не гипотетической угрозой, а уже реализованной практикой злоумышленников. Объем скомпрометированных паролей вырос на 160% в 2025 году, в том числе за счет инфостилеров, которые автоматически извлекают учетные данные непосредственно с устройства пользователя.

Эволюция защитных механизмов: от пароля к паролю. Ответом на нарастающую угрозу служит не усложнение паролей, а отказ от них как класса. Ключевым стандартом становится FIDO2 / WebAuthn – протокол, в котором аутентификация основана на криптографической паре ключей: закрытый ключ хранится исключительно на устройстве пользователя (в TPM или защищенном анклаве) и никогда не передается по сети, что делает фишинг и целевой подбор технически неприменимыми. Федеральный стандарт NIST SP 800-63B прямо указывает на недостаточность сложности как критерия стойкости и рекомендует проверку паролей по спискам скомпрометированных значений [7]. Пассключи (passkeys) – практическая реализация этого стандарта – продемонстрировали трехкратное превосходство над паролями по успешности входа и восьмикратное – над связкой «пароль + MFA».

Microsoft последовательно переводит Windows 11 на архитектуру без паролей. В ноябре 2025 года вышло обновление с нативной поддержкой менеджеров пассключей (1Password, Bitwarden) в качестве плагин-провайдеров – создание, хранение и использование пассключей стало возможным непосредственно в системе без браузерных расширений. В марте 2026 года Microsoft перевела Passkey Profiles и Synced Passkeys в статус общей доступности (GA) для Microsoft Entra ID, автоматически включив их для всех тенантов без предварительной настройки. Параллельно ведется публичный предпросмотр Microsoft Entra Passkeys on Windows, где FIDO2-ключ хранится в контейнере Windows Hello и защищен биометрией или PIN-кодом, а ключевым свойством является невозможность извлечь закрытый ключ с устройства даже при полном доступе к образу диска.

Вместе с тем переход не является быстрым или повсеместным. По данным опросов, 43% специалистов по ИТ называют пассключи «слишком сложными», а реальная доля корпоративных входов без пароля не превышает 10% по состоянию на конец 2025 года. Это означает, что для

подавляющего большинства систем парольная аутентификация останется актуальной в среднесрочной перспективе, а задача моделирования стойкости паролей к целевому подбору сохраняет свою практическую значимость.

Практическая апробация модели: Elcomsoft System Recovery. Для верификации теоретической модели целевого подбора был использован инструмент компьютерной криминалистики Elcomsoft System Recovery (ESR) – программный комплекс, разработанный компанией Elcomsoft и предназначенный для восстановления доступа к учетным записям Windows, извлечения парольных хэшей и сбора криминалистических улик с заблокированных систем. ESR поставляется в виде загрузочного образа (esrx64.iso / esrx86.iso), на основе которого с помощью утилиты ESRBOOT создается загрузочный USB-носитель.

После записи образа целевой компьютер загружается с внешнего накопителя в среде Windows PE – облегченной версии Windows, полностью изолированной от основной системы и обеспечивающей доступ к дискам в режиме «только для чтения» по умолчанию. Это гарантирует криминалистическую чистоту: данные на исследуемом диске не изменяются в ходе анализа, а создаваемые образы дисков подписываются цифровой подписью и сохраняются в формате E01 – стандарте де-факто в компьютерной криминалистике.

Поддерживаются режимы загрузки BIOS, UEFI x64 и UEFI x32, что обеспечивает совместимость как с современным оборудованием, так и с устаревшими платформами. Современные системы используют UEFI x64 по умолчанию; BIOS-режим предназначен для устаревших ПК, а UEFI x32 – для тонких клиентов на платформах Intel Atom [8].

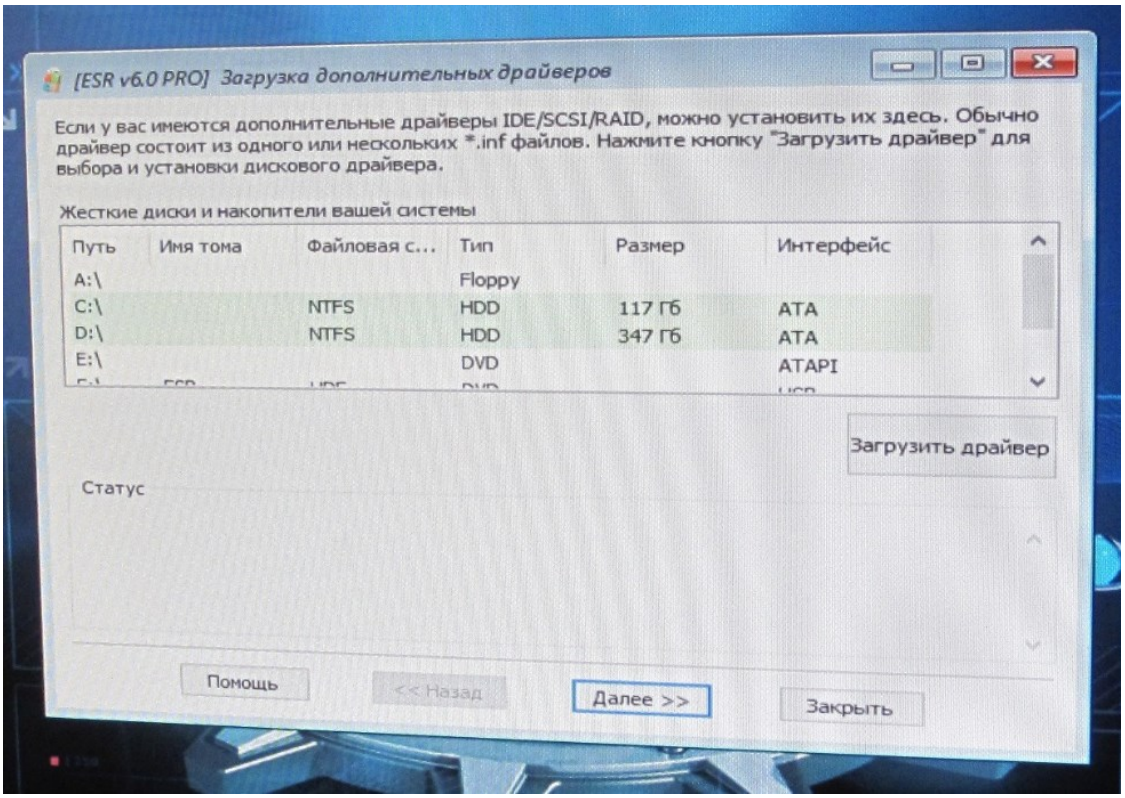


Рисунок 2 – Вид интерфейса утилиты на начальном этапе загрузки

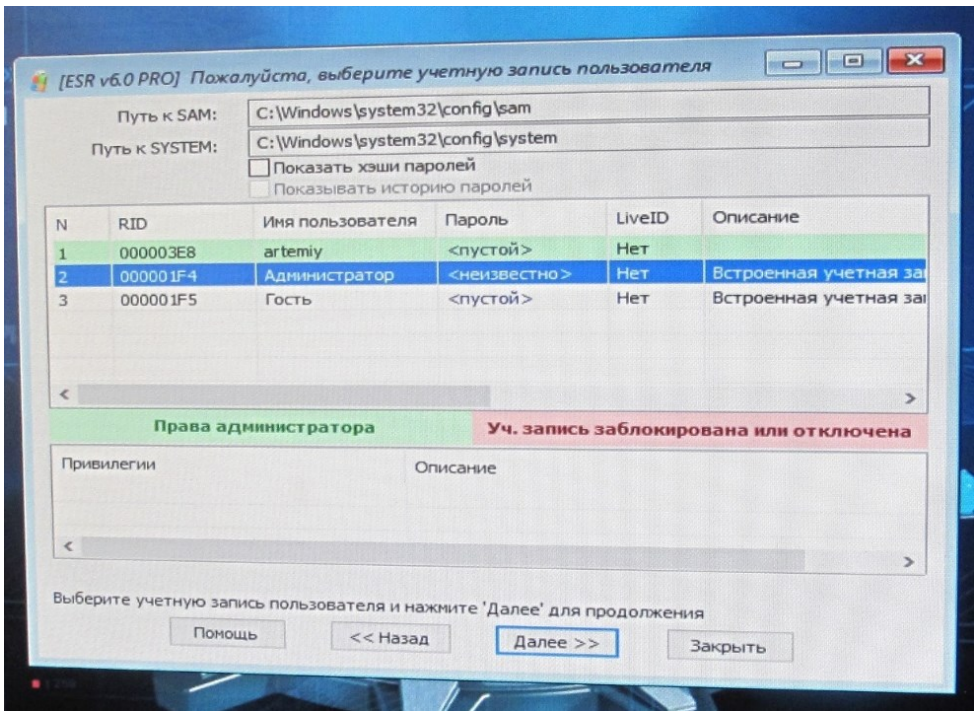


Рисунок 3 – Вид интерфейса утилиты на этапе выбора учетной записи

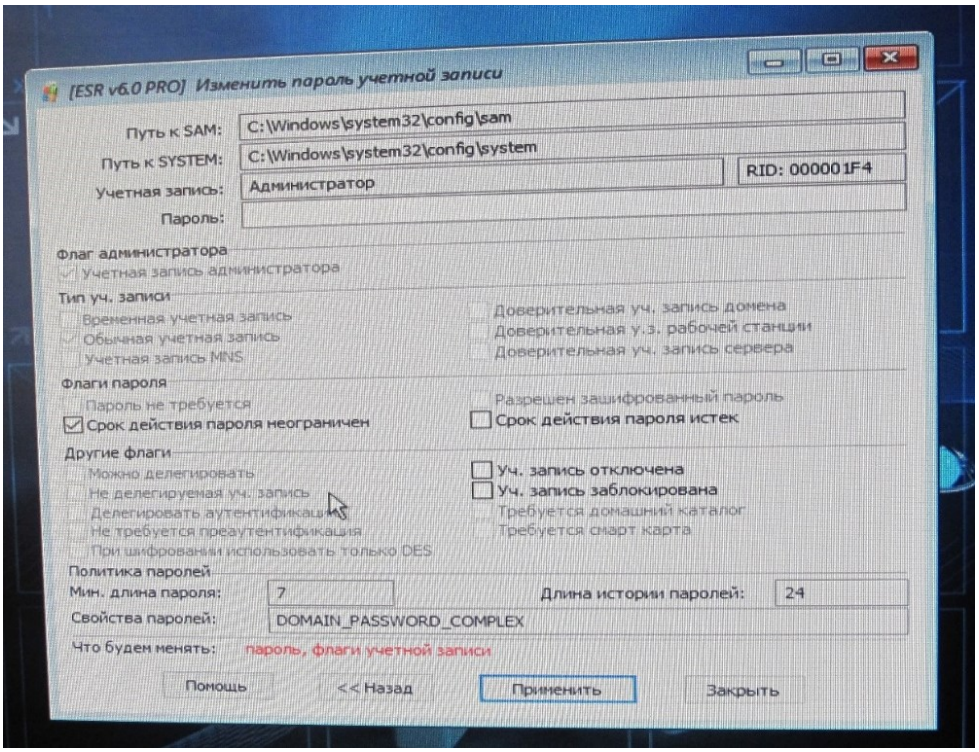


Рисунок 4 – Вид интерфейса утилиты на этапе изменения пароля

Ключевой функцией ESR в контексте исследования является извлечение хэшей паролей из системных файлов реестра Windows. База данных учетных записей хранится в файлах SAM и SYSTEM, расположенных в %WINDIR%\System32\config. В активной системе эти файлы заблокированы операционной системой и недоступны для прямого чтения, однако при загрузке с внешнего носителя блокировка отсутствует, и ESR извлекает хэши в автоматическом режиме.

Программа поддерживает два типа хэшей:

1) LM-хэш – устаревший механизм, применявшийся до Windows Vista. Принципиальная уязвимость LM: пароль делится на две половины по 7 символов, каждая хэшируется независимо, а

регистр символов игнорируется. Это снижает пространство перебора до $26^7 \approx 8 * 10^9$ комбинаций для каждой половины – значительно меньше, чем для полного NTLM-пароля.

2) NTLM-хэш – актуальный механизм для всех современных версий Windows. Хэш вычисляется по алгоритму MD4 от Unicode-представления пароля без соли, что делает атаку на нескольких пользователей одновременно столь же быстрой, как атаку на одного: из-за отсутствия соли одинаковые пароли дают одинаковые хэши.

Принципиально важно, что для доменных учетных записей ESR извлекает хэши DCC (Domain Cached Credentials) – кэшированные учетные данные домена, сохраненные локально для обеспечения входа при отсутствии связи с контроллером домена. Начиная с версии 8.35, для каждой категории (SAM, Active Directory, DCC) доступны отдельные настройки парольных атак [9].

Методы восстановления паролей в ESR. После извлечения хэшей ESR предлагает следующие методы атаки:

1) Полный перебор (brute force) – последовательная проверка всех комбинаций заданного алфавита и длины. Применяется при отсутствии информации о пароле.

2) Атака по словарю – перебор вариантов из заранее подготовленного файла. Именно в этом режиме реализуется модель персонализированного словаря: файл с токенами цифрового профиля пользователя загружается как словарь, к которому применяются правила мутаций.

3) Атака по маске – перебор по заданному шаблону структуры пароля (например, ?u?l?l?l?d?d?d?d – заглавная буква, три строчных, четыре цифры).

4) Гибридная атака – комбинация словаря и маски; токены профиля проверяются в сочетании с числовыми суффиксами или спецсимволами.

5) Групповая атака (добавлена в версии 8.35) – автоматизированная последовательность нескольких мини-атак, включая проверку паролей, уже найденных в системе.

Скорость атаки на NTLM-хэши без соли позволяет проверять сотни миллионов вариантов в секунду на современном GPU. Это означает, что 8-символьный пароль из строчных букв ($\alpha = 26$, $L = 8$) исчерпывается примерно за 5 секунд – в полном соответствии с данными таблицы времен взлома, приведенными ранее.

Демонстрация целевой атаки по профилю. В ходе практической апробации была проведена атака по словарю, построенному по модели токенизации: из условного профиля пользователя (имя, год рождения, никнейм) сгенерирован словарь из ~50 000 вариантов с применением трех групп мутаций. Хэш NTLM для тестовой учетной записи Windows 10 (система без активного TPM) был извлечен через ESR за несколько секунд после загрузки с USB-носителя.

Результат – целевая атака восстановила пароль Alex1998! в числе первых нескольких тысяч проверенных вариантов, тогда как чистый брутфорс того же 9-символьного пароля из смешанного алфавита потребовал бы нескольких часов. Это эмпирически подтверждает центральный тезис работы: наличие цифрового профиля сокращает реальную стойкость пароля на несколько порядков – вне зависимости от его формальной энтропии.

Ограничения ESR в контексте модели. Практика использования ESR выявила границы применимости описанной модели. В системах Windows 11 с активным TPM 2.0 ESR успешно загружается, однако не может получить хэш пароля учетной записи типа passwordless – объект атаки отсутствует как таковой. Для систем с зашифрованными дисками BitLocker ESR извлекает метаданные шифрования, которые затем передаются в Elcomsoft Distributed Password Recovery для подбора пароля к самому тому. Таким образом, эффективность персонализированной атаки напрямую определяется конфигурацией целевой системы, а не только качеством собранного профиля пользователя.

Заключение. Формальная энтропия является необходимым, но недостаточным критерием оценки стойкости пароля. В условиях, когда атакующий располагает цифровым профилем пользователя, реальное пространство перебора сокращается с экспоненциального до нескольких тысяч вариантов – вне зависимости от теоретически высокой энтропии. Предложенная трехэтапная модель (ранжирование/токенизация/мутации) формализует этот процесс и объясняет, почему «умные» алгоритмы подбора опережают чистый перебор в 4-5 раз. Практическая апробация модели средствами Elcomsoft System Recovery подтвердила: хэш NTLM-пароля извлекается из незащищенной системы за секунды, а целевая атака по персонализированному словарю восстанавливает пароль на несколько порядков быстрее полного перебора. Архитектурные особенности Windows 10 без TPM дополнительно упрощают реализацию офлайновой атаки, тогда как переход на Windows 11 с активным TPM 2.0 и беспарольными учетными записями устраняет саму возможность такой атаки. По данным NIST SP 800-63B, сложность пароля сама по себе не является достаточным критерием защиты – необходима проверка по спискам скомпрометированных значений. Практическое применение результатов работы состоит в необходимости дополнить существующие метрики оценки паролей показателем сопротивляемости персонализированным атакам, а политики парольной безопасности – прямым запретом на использование элементов цифрового профиля пользователя.

Список использованных источников:

1. Kaspersky studies 193 million passwords, finds 45% could be cracked in less than a minute [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://usa.kaspersky.com/about/press-releases/kaspersky-studies-193-million-passwords-finds-45-could-be-cracked-in-less-than-a-minute. – Дата доступа: 12.03.2026.

2. World Password Day Global Survey 2025 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://bitwarden.com/resources/world-password-day-2024/. – Дата доступа: 26.02.2026.

3. Murray, H. Convergence of Password Guessing to Optimal Success Rates / H. Murray, D. Malone // Entropy. – 2020. – Vol. 22, No. 4. – P. 378. – DOI: 10.3390/e22040378.

4. Афонин, О. Перебор паролей: как профиль пользователя превращается в словарь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://blog.elcomsoft.ru/2025/11/perebor-parolej-kak-profil-polzovatelya-prevrashhaetsya-v-slovar/. – Дата доступа: 05.03.2026.

5. Афонин, О. Windows 11: TPM, новый тип учетных записей и логин без пароля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://blog.elcomsoft.ru/2022/03/windows-11-tpm-novyj-tip-uchyotnyh-zapisej-i-login-bez-parolya/. – Дата доступа: 09.03.2026.

6. Stallings, W. Cryptography and Network Security: Principles and Practice / W. Stallings. – 8th ed. – Boston: Pearson, 2020. – 832 p.

7. Grassi, P.A. Digital Identity Guidelines: Authentication and Lifecycle Management. NIST Special Publication 800-63B / P.A. Grassi [и др.]. – Gaithersburg: NIST, 2020. – Режим доступа: https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/63/b/upd2/final. – Дата доступа: 11.03.2026.

8. Афонин О. Elcomsoft System Recovery [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elcomsoft.ru/esr.html. – Дата доступа: 19.03.2026.

9. Elcomsoft System Recovery 8.35: поддержка системной базы SRUM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elcomsoft.ru/news/868.html. – Дата доступа: 20.03.2026.

10. Афонин О. LM, NTLM и PIN-коды Windows Hello: сравнение безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://blog.elcomsoft.ru/2022/08/lm-ntlm-i-pin-kody-windows-hello-sravnenie-bezopasnosti/. –Дата доступа: 20.03.2026.

UDC 004.056

MODELLING USER PASSWORD RESISTANCE TO TARGETED GUESSING UNDER DIGITAL PROFILE CONDITIONS

Zhivitsa N.A., Mazepin Y.D., Gormash P.E., Revyako K.P. students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Rykova O. V. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This paper investigates the gap between the theoretical and practical strength of user passwords in the presence of a digital profile available to the attacker. It is demonstrated that the formal criterion of information entropy fails to account for the predictability of passwords constructed from personal data — names, dates of birth, and usernames. A three-stage model for building a personalised dictionary (ranking, tokenisation, and mutation rules) is proposed, implemented, and validated using Elcomsoft System Recovery. An analysis of credential storage architecture in Windows 10 and Windows 11 reveals that system security fundamentally depends on the presence of an active TPM 2.0 module. Current statistical data characterising the scale of the problem are presented, and practical criteria for password resistance to targeted guessing are formulated.

Keywords. Password security, dictionary attack, digital profile, entropy, tokenization, mutations, information security.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА A* И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ

Тюшкевич Ф.И., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. тех. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматривается алгоритм поиска пути A* который нашёл применение в различных областях программирования, принцип его работы и преимущества перед алгоритмом Дейкстры, а также его модификации. Предложены наглядные примеры работы алгоритма A* и его модификаций.

Поиск пути – это задача нахождения наилучшего, оптимального маршрута от одной точки до другой в графе, сетке или любом другом дискретном пространстве. Алгоритмы поиска пути определяют, как наиболее эффективно добраться из пункта А в пункт Б, учитывая при этом стоимость перемещения и препятствия. Данная задача часто встречается в современном мире, например: в навигаторах и компьютерных играх.

Один из наиболее известных алгоритмов поиска пути это – алгоритм Дейкстры, однако он не является наиболее эффективным для задач поиска в больших пространствах поскольку обходит очень большое количество вершин. Для того чтобы значительно сократить время поиска используется алгоритм A*, который меняет приоритет вершин для изменения порядка их обработки [1].

Суть алгоритма A* заключается в использовании двух множеств: открытого и закрытого. Под открытым множеством подразумеваются вершины, которые уже были обнаружены, но ещё не были обработаны. Именно из открытого множества выбирается следующая вершина для обработки. Под закрытым же множеством подразумеваются вершины, которые уже были обработаны. Выбор следующей вершины для обработки осуществляется с помощью функции

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1),$$

где g(n) – стоимость пути минимальной стоимости от начальной вершины до некоторой вершины n, h(n) – стоимость пути минимальной стоимости от вершины n до цели. Значение h(n) берётся как наиблагоприятнейший исход (на пути нет никаких препятствий или существует прямой путь от вершины до цели) [2].

Благодаря использованию эвристики поиск пути направляется в более перспективном направлении существенно сокращая количество посещённых вершин по сравнению с алгоритмом Дейкстры, что хорошо видно на рисунке 1.

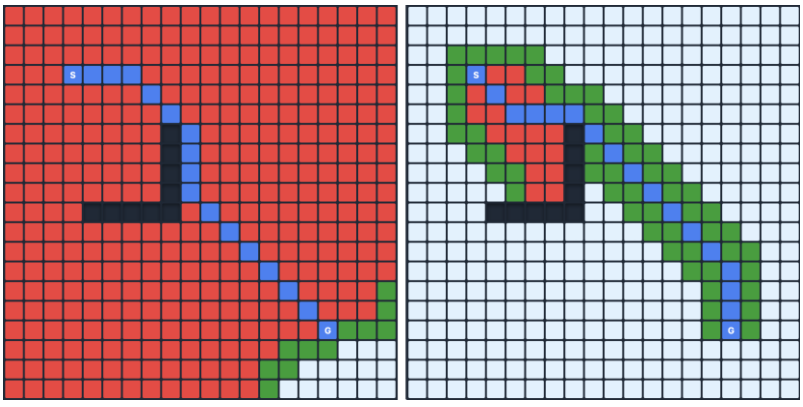


Рисунок 1 – Схема препятствий (чёрный), посещённых узлов (красный), узлов открытого множества (зелёный), пути из s в g (синий) для алгоритма Дейкстры (слева) и A* (справа) на примере двумерной сетки

В примере из рисунка 1 количество посещённых вершин для алгоритма Дейкстра составило 365, а для A* 34, при этом оба алгоритма нашли разные пути одинаковой стоимости (стоимость перехода по диагонали в данном примере была взята равной 1.41).

Несмотря на то, что A* способен находить оптимальный путь при использовании допустимой эвристики, на практике часто необходимо пожертвовать оптимальностью найденного решения ради повышения скорости работы. В таких случаях применяются различные модификации A*.

Один из вариантов такой модификации это взвешенный A*. Если h(n) — допустимая эвристическая функция, то во взвешенной версии поиска A* используется $h_w(n) = \varepsilon * h(n)$, $\varepsilon > 1$ в качестве эвристической функции, и поиск A* выполняется как обычно (что в итоге происходит быстрее, чем при

использовании h, поскольку расширяется меньше вершин). Найденный алгоритмом поиска пути может иметь стоимость не более чем в ε раз больше, чем стоимость пути с наименьшей стоимостью в графе [3]. Пример работы алгоритма представлен на рисунке 2.

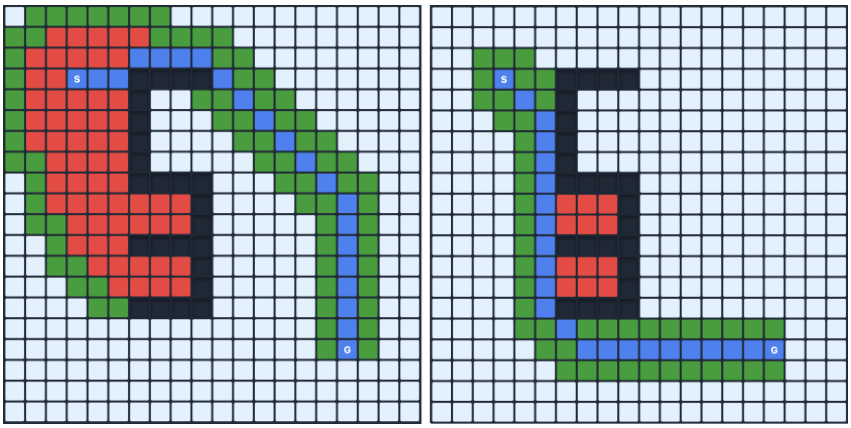


Рисунок 2 – Схема препятствий (чёрный), посещённых узлов (красный), узлов открытого множества (зелёный), пути из s в g (синий) для алгоритма A* (слева) и взвешенного A* при ε = 2 (справа) на примере двумерной сетки

Другой модификацией, которая уже гарантирует оптимальность найденного пути, является двунаправленный A*. В случае этого алгоритма поиск ведётся сразу с двух вершин (начальной и целевой). Важным условием завершения работы алгоритма является следующий критерий: алгоритм завершает работу тогда и только тогда, когда доказано, что найденный путь имеет минимальную возможную стоимость:

$$d \leq \max(\min fs(n), \min fg(n)) \quad (2),$$

где d – стоимость текущего найденного пути минимальной стоимости, а min fs(n) и min fg(n) – минимальное значение функции f среди всех вершин текущего открытого множества начальной и целевой вершин соответственно. Невыполнение этого критерия может привести к нахождению не самого оптимального пути.

В итоге алгоритм A* по праву можно считать одним из наиболее эффективных и универсальных алгоритмов поиска пути. Благодаря сочетанию точности и использования эвристической информации, он позволяет находить решения в широком классе задач. Применение A* или его модификаций в подходящей ситуации может значительно улучшить производительность программы.

Список использованных источников:

1. Wagner Dorothea; Willhalm Thomas. Speed-up techniques for shortest-path computations. STACS. / Massachusetts Institute of Technology, 2007. — С. 27 - 29.

2. Нильсон Н. Искусственный интеллект: методы поиска решений = Problem-solving Methods in Artificial Intelligence / Пер. с англ. В. Л. Стефанюка; под ред. С. В. Фомина. — М.: Мир, 1973. — С. 68 - 70.

3. A search algorithm – Wikipedia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/A*_search_algorithm.*

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КОЖИ ЛИЦА И ГЛАЗ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Михалко А.Н., Филон Д.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Анисимов В.Я. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе представлена разработка программы для автоматизированной диагностики состояния кожи лица и глаз на основе методов компьютерного зрения и глубокого обучения. Система реализует детекцию лица и глаз, классификацию дерматологических и офтальмологических состояний с использованием классификатора на базе сверточной нейронной сети MobileNetV2, а также формирование текстового медицинского заключения с применением локальной LLM Llama3.

Актуальность работы обусловлена ростом интереса к телемедицинским технологиям и необходимости создания инструментов предварительной автоматической диагностики. Кожные заболевания и воспалительные процессы глаз являются одними из наиболее распространённых патологий, требующих своевременного выявления.

Целью исследования является разработка интеллектуальной системы, способной автоматически анализировать фотографию лица пользователя, выявлять потенциальные признаки заболеваний кожи и глаз и формировать понятное текстовое заключение для пациента.

Архитектура системы включает несколько функциональных модулей: модуль детекции лица и глаз, модуль предварительной обработки изображений, модуль классификации состояния кожи, модуль классификации состояния глаз, модуль генерации результата на основании классификатора с помощью локальной LLM Llama3.

Первичным этапом обработки изображения является автоматическая локализация лица и глаз пользователя. Для этого применяется алгоритм компьютерного зрения на основе каскадов Хаара, обеспечивающий быстрое обнаружение объектов на изображении. Модуль выделяет область лица, после чего внутри неё выполняется поиск глаз. В результате формируются координаты ограничивающих прямоугольников и вырезаются соответствующие фрагменты изображения как показано на рисунке 1. Данный этап позволяет исключить фоновые элементы и сосредоточить дальнейший анализ исключительно на релевантных анатомических областях, повышая устойчивость и точность классификации.

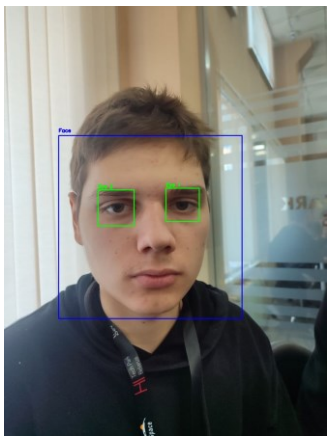


Рисунок 1 – Результат работы алгоритма компьютерного зрения на основе каскадов Хаара

После локализации лица и глаз выполняется этап препроцессинга данных, направленный на приведение изображений к формату, удобному для анализа, посредством отделения глаз от лица, то есть глаза вырезаются из общей области лица, чтобы анализировать их отдельно.

Далее изображение передается сверточной нейронной сети на базе MobileNetV2, выделения карты признаков и подготовки данных посредством разворачивания карты признаков в вектор и передачи классификатору. Использование на этом этапе сверточной модели помогает уменьшить входной вектор для классификатора и не повредить пространственное отношение на изображении, что поможет при последующей классификации. Архитектура модели изображена на рисунке 2.

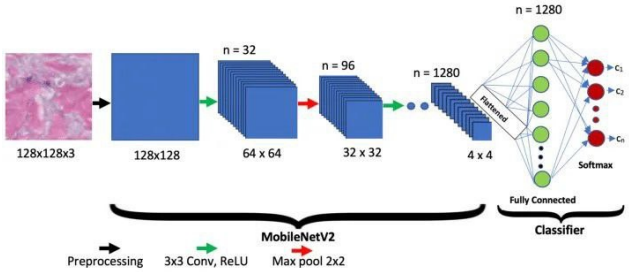


Рисунок 2 – Архитектура модели MobileNetV2

В качестве классификатора выступает **многослойный персептрон**, состоящий из входного слоя скрытого и выходного. Изначальный вектор проходит через **полносвязный скрытый слой с 128 нейронами и функцией активации ReLU. В** регуляризации применяется **Dropout с вероятностью 0.3**, предотвращающий переобучение. На выходе находится **слой с softmax**, формирующий вероятности для каждого класса: для кожи лица это шесть классов — «Acne», «Actinic Keratosis», «Basal Cell Carcinoma», «Eczemaa», «Normal» и «Rosacea», для глаз — три класса — «Normal», «Infected», «Puffed». Каждое значение в выходном векторе отражает **признак классификации**, то есть вероятность того, что изображение соответствует конкретному состоянию кожи или глаз.

Затем данные классификатора передаются с помощью HTTP-запроса локальной LLM Llama3 развернутой в Docker контейнере, которая уже на основании работы классификатора формирует структурированное заключение, включая краткую интерпретацию выявленного состояния и рекомендации по дальнейшим действиям.

Программная реализация выполнена на языке Python с использованием фреймворка Flask. Разработанное REST API обеспечивает приём изображений, обработку данных, выполнение предсказаний и возврат структурированного JSON-ответа, содержащего результаты анализа, а также разработано веб приложение для получения результата в более удобной форме как показано на рисунке 2.

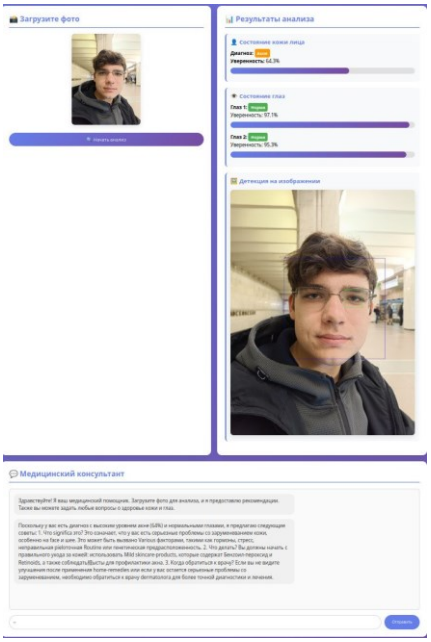


Рисунок 2 – Демонстрация веб приложения

Разработанное решение может быть использовано в системах дистанционного мониторинга здоровья, мобильных медицинских приложениях и платформах телемедицины в качестве инструмента предварительной оценки состояния пациента.

Список использованных источников:

1. MobileNetV2: Hugging Face Transformers Documentation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/mobilenet_v2/ – Дата доступа: 22.02.2026.

2. Ollama Documentation: Ollama. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.ollama.com/ – Дата доступа: 22.02.2026.

3. Perceptron: Wikipedia. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Perceptron – Дата доступа: 22.02.2026.

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ОТ АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ К АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМАМ

Косяков М.М, студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Марков А.Н. – старший преподаватель

Аннотация. В работе представлен теоретический анализ эволюции методов балансировки нагрузки в распределенных системах – от аппаратных устройств к программно-определяемым и адаптивным алгоритмам с элементами машинного обучения. Рассмотрены предпосылки появления аппаратных балансировщиков, их ограничения при росте масштабов систем, а также переход к программным решениям в условиях виртуализации и облачных вычислений. Отдельное внимание уделено адаптивным подходам и перспективам применения машинного обучения для прогнозирования нагрузки. Показано, что эволюция методов приводит не к последовательной смене подходов, а к формированию гибридных и многокритериальных механизмов, учитывающих противоречивость показателей эффективности и контекстно-зависимый выбор стратегий.

Балансировка нагрузки является одним из ключевых механизмов обеспечения устойчивости и эффективности функционирования распределенных систем. В условиях увеличения числа пользователей, роста объемов сетевого трафика и усложнения архитектуры сервисов задача рационального распределения запросов между множеством вычислительных узлов приобретает критическое значение. От качества реализации механизмов балансировки напрямую зависят показатели доступности, отказоустойчивости, времени отклика и общего уровня производительности системы. В высоконагруженных информационных системах даже незначительное перераспределение трафика может существенно повлиять на стабильность работы сервисов.

Первоначально задачи балансировки нагрузки решались с использованием специализированных аппаратных устройств. Такие решения устанавливались в структуре сетевой инфраструктуры и выполняли функцию централизованного распределения входящих запросов. Аппаратный балансировщик анализировал сетевые пакеты и перенаправлял их на один из серверов, входящих в пул обработки. Он также осуществлял регулярную проверку доступности серверов и автоматически исключал из обработки узлы, не отвечающие на контрольные запросы. Подобный подход широко применялся в корпоративных центрах обработки данных и крупных интернет-порталах.

Аппаратные балансировщики обеспечивали высокую производительность благодаря специализированной архитектуре и оптимизированной обработке сетевых соединений. Они могли выполнять завершение защищенных соединений, снижая нагрузку на серверы приложений, а также поддерживали механизмы закрепления пользовательской сессии за конкретным сервером. Однако при росте числа пользователей и расширении сервисов возникали существенные ограничения. Масштабирование требовало модернизации оборудования или внедрения дополнительных устройств, что сопровождалось значительными финансовыми затратами. Кроме того, централизованный характер архитектуры увеличивал риск возникновения единой точки отказа, несмотря на использование резервирования.

С переходом к виртуализированным средам и облачным технологиям балансировка нагрузки стала реализовываться преимущественно программными средствами. Программные балансировщики развертываются на стандартных серверах или в виртуальных машинах и могут масштабироваться вместе с инфраструктурой. Примерами таких решений являются Nginx и HAProxy, которые широко используются в веб-инфраструктурах различного масштаба – от небольших сервисов до глобальных платформ.

В программных балансировщиках реализуются различные алгоритмы распределения запросов, которые условно можно разделить на статические и динамические. К статическим относятся методы, не учитывающие текущее состояние системы. Наиболее простым из них является циклический алгоритм, при котором каждый новый запрос направляется на следующий сервер по очереди. Данный подход эффективен при однородной конфигурации узлов и относительно стабильной нагрузке.

Развитием статических методов стали динамические алгоритмы, учитывающие отдельные параметры функционирования серверов. К ним относятся алгоритмы с весовыми коэффициентами, отражающими относительную производительность узлов, а также методы, ориентированные на текущее количество активных соединений. Учет числа соединений позволяет частично учитывать распределение нагрузки в реальном времени и снижать вероятность перегрузки отдельных серверов.

С развитием микросервисной архитектуры структура распределенных систем стала значительно сложнее. Вместо единого приложения система включает множество взаимосвязанных сервисов, каждый из которых может масштабироваться независимо. В такой архитектуре балансировка нагрузки требуется не только на внешнем уровне, но и внутри самой системы.

Оркестрационные платформы, такие как Kubernetes, автоматизировали процесс масштабирования сервисов в зависимости от показателей загрузки. При увеличении нагрузки система

может создавать дополнительные экземпляры приложения, после чего механизм балансировки автоматически включает их в обработку трафика. Это обеспечивает динамическое расширение инфраструктуры без вмешательства администратора. В таких условиях балансировка становится тесно связанной с мониторингом состояния узлов и механизмами автоматического управления ресурсами.

Современный этап развития характеризуется появлением и распространением адаптивных алгоритмов, способным учитывать совокупность параметров состояния системы. Учет одного показателя не всегда позволяет адекватно оценить реальное состояние вычислительного узла. Помимо числа соединений анализируются загрузка процессора, использование памяти, сетевые задержки, частота ошибок и время отклика. На основе этих показателей формируется интегральная оценка состояния узла, позволяющая гибко регулировать объем направляемого на него трафика. Если один из серверов начинает демонстрировать увеличение времени отклика, система может временно снизить его долю в общем распределении, тем самым предотвращая перегрузку.

Однако переход к многопараметрической адаптации порождает фундаментальную проблему: отсутствие единого интегрального критерия эффективности. Адаптивный алгоритм вынужден решать задачу многокритериальной оптимизации, где требования минимизации времени отклика, максимизации утилизации ресурсов, обеспечения отказоустойчивости и энергоэффективности могут вступать в противоречие. Более того, в распределенных системах различной природы приоритеты меняются: для базы данных критична задержка, для потоковой обработки – пропускная способность, для edge-вычислений – энергопотребление узлов. Именно поэтому динамические и статические алгоритмы сохраняют свою область применения там, где предсказуемость и детерминизм важнее адаптивности. Ключевая тенденция современного этапа – не замена одних методов другими, а формирование гибридных схем, позволяющих переключаться между стратегиями в зависимости от текущего профиля нагрузки и заданных бизнес-приоритетов.

Дополнительным направлением развития является внедрение методов машинного обучения для прогнозирования нагрузки и повышения эффективности управления ресурсами. В распределенных системах часто наблюдаются повторяющиеся временные закономерности: увеличение активности в вечерние часы, в выходные дни или в период проведения рекламных кампаний. Анализ исторических данных позволяет построить модель, способную предсказывать будущие пики нагрузки. Это дает возможность заранее масштабировать инфраструктуру и корректировать параметры балансировки до возникновения критической ситуации. Таким образом, система переходит от реактивного к проактивному управлению.

Эволюция методов балансировки нагрузки выступает отражением более широкой трансформации распределенных вычислительных архитектур – от жестко централизованных аппаратных решений к гибким, программно управляемым и интеллектуально адаптирующимся механизмам. Балансировка нагрузки перестала быть исключительно сетевой функцией и стала неотъемлемым элементом комплексного управления распределенной вычислительной инфраструктурой.

Выводы. Проведенный теоретический анализ показал, что развитие методов балансировки нагрузки в распределенных системах обусловлено изменением архитектурных подходов и ростом требований к масштабируемости и устойчивости сервисов. Аппаратные решения заложили основу для построения высокопроизводительных инфраструктур, однако их ограничения способствовали переходу к программным средствам. Развитие облачных технологий и микросервисной архитектуры привело к интеграции балансировки с системами автоматического масштабирования и мониторинга. Ключевой тенденцией развития является не последовательная смена методов, а формирование гибридных и многокритериальных механизмов балансировки. Адаптивные алгоритмы требуют компромисса между противоречивыми показателями эффективности, что предполагает переход к многокритериальным моделям принятия решений. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой методов динамического назначения весов критериям в гибридных балансировщиках и оценкой устойчивости таких систем при резких изменениях профиля нагрузки.

Список использованных источников:

1. Tanenbaum, A. S. Distributed Systems: Principles and Paradigms / A. S. Tanenbaum, M. Van Steen. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2007. – 686 p.

2. Harchol-Balter, M. Performance Modeling and Design of Computer Systems: Queueing Theory in Action / M. Harchol-Balter. – Cambridge : Cambridge University Press, 2013. – 576 p.

3. Cardellini, V. Dynamic Load Balancing on Web-Server Systems / V. Cardellini, M. Colajanni, P. S. Yu // IEEE Internet Computing. – 1999. – Vol. 3, No. 3. – P. 28–39.

4. Марков, А. Н. Проблема балансировки нагрузки облачных вычислений / А. Н. Марков // Компьютерные системы и сети: материалы 55-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 127–128.

5. Марков, А. Н. Анализ работы балансировщика нагрузки сервиса видео-конференц-связи / А. Н. Марков, А. И. Парамонов // Цифровая трансформация. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 43–51.

6. Документация Nginx [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nginx.org. – Дата доступа: 02.04.2026.

7. Документация Kubernetes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kubernetes.io. – Дата доступа: 02.04.2026.

ИНТЕЛЛЕКТУРАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ КОНДИТЕРСКОЙ НА ОСНОВЕ ТЕГОВ И СЕМАНТИЧЕСКИХ ЭМБЕДДИНГОВ

Рысник А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В работе разработано приложение интеллектуальной системы рекомендаций для кондитерской продукции на основе тегов и семантических эмбеддингов. Реализован механизм анализа описаний десертов и пользовательских предпочтений с использованием API моделей искусственного интеллекта и методов обработки естественного языка. Система формирует персонализированные рекомендации и обеспечивает удобный поиск и подбор кондитерских изделий.

В современных системах электронной коммерции и цифровых сервисах важную роль играют рекомендательные системы, позволяющие персонализировать взаимодействие пользователя с ассортиментом продукции [1]. Особенно актуальной данная задача является для предприятий общественного питания и кондитерских, где разнообразие продукции требует удобных инструментов для подбора товаров в соответствии с предпочтениями клиентов.

В данной работе рассматривается разработка интеллектуальной системы рекомендаций для кондитерской продукции на основе тегов и семантических эмбеддингов. Предлагаемый подход основан на анализе текстовых описаний десертов и их характеристик с использованием методов обработки естественного языка [2]. Для формирования векторных представлений используется API моделей искусственного интеллекта, позволяющее получать семантические эмбеддинги текстовых данных.

В разработанной системе каждому кондитерскому изделию сопоставляется набор тегов, отражающих основные характеристики продукта, такие как вкус, состав, тип десерта и дополнительные особенности. Текстовые описания десертов преобразуются в векторное пространство, что позволяет определять семантическую близость между различными позициями ассортимента. На основе полученных представлений реализуется алгоритм формирования рекомендаций.

Система позволяет анализировать предпочтения пользователя и предлагать десерты, наиболее близкие по характеристикам к ранее выбранным или интересующим его позициям. Использование семантических эмбеддингов обеспечивает более точный учет смыслового сходства между описаниями продуктов по сравнению с традиционными методами поиска [3].

Разработанное приложение реализовано в виде веб-системы с использованием фреймворка Django [4]. Данный фреймворк обеспечивает построение серверной части приложения, обработку пользовательских запросов и управление данными системы. Серверная логика отвечает за обработку информации о кондитерских изделиях, формирование тегов, получение семантических эмбеддингов через API моделей искусственного интеллекта и вычисление сходства между объектами. Для хранения информации об ассортименте продукции и характеристиках десертов используется база данных, интегрированная с веб-приложением.

Разработанная система поддерживает возможность динамического обновления рекомендаций при изменении пользовательских предпочтений или добавлении новых позиций в ассортимент. Использование тегов позволяет структурировать информацию о продукции и облегчает процесс поиска схожих десертов. Семантические эмбеддинги обеспечивают более глубокий анализ текстовых описаний по сравнению с традиционными методами сопоставления ключевых слов, что позволяет выявлять скрытые смысловые связи между различными кондитерскими изделиями.

Практическое применение разработанного решения может способствовать повышению удобства выбора продукции и улучшению пользовательского взаимодействия с ассортиментом кондитерских изделий. Реализованная интеллектуальная система рекомендаций может быть использована в цифровых сервисах кондитерских и предприятий общественного питания для повышения эффективности представления продукции и поддержки выбора клиентов.

Список использованных источников:

1. Николаев К.С. Обзор современных рекомендательных систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nauteh-journal.ru/files/4868c712-597d-4323-b3e5-5998e81a2c4e. – Дата доступа: 15.03.2026.

2. Natural Language Processing : A Textbook with Python Implementation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/375744928_Natural_Language_Processing_A_Textbook_with_Python_Implementation – Дата доступа: 16.03.2026.

3. Компьютерная лингвистика и автоматическая обработка текстов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://istina.msu.ru/publications/book/804183340/. – Дата доступа: 17.03.2026

4. Веб-фреймворк Django (Python) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn_web_development/Extensions/Server-side/Django. – Дата доступа: 18.03.2026.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЛИЧНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЕЙМИФИКАЦИИ И АНАЛИЗА БИОРИТМОВ

Таргонский Д.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматриваются проблемы формирования самодисциплины в условиях цифровой среды. Проведен анализ рынка трекеров привычек и выявлены их ограничения в части персонализации под биоритмы. Предложена концепция веб-приложения «FocusFlow», интегрирующего методы геймификации (система Focus Coins) и анализа циркадных ритмов («Энергетическая карта»). Описаны функциональные требования и механизмы верификации выполнения задач для предотвращения самообмана. Реализация системы направлена на повышение долгосрочной вовлеченности и продуктивности пользователей на основе поведенческой психологии.

Современный мир характеризуется стремительным развитием информационных технологий и беспрецедентным ростом объёма доступной информации, что влечет за собой устойчивую тенденцию к снижению способности людей к длительной концентрации внимания и самодисциплине. Многочисленные исследования подтверждают, что формирование новых поведенческих паттернов сопряжено с систематическими трудностями. По данным Европейского центра профилактики и контроля заболеваний (ECDC), средняя продолжительность удержания новой привычки у взрослых составляет от 18 до 66 дней, при этом пик отказов от выполнения поставленных целей приходится на 2–4 неделю. Мета-анализы показывают, что от 40 % до 70 % людей прекращают программы изменения поведения в течение первых 30–45 дней, а около 92 % долгосрочных резолюций не выполняются.

Фундаментальными причинами столь низкой успешности являются истощение внутренней мотивации («эффект новизны»), а также игнорирование индивидуальных биологических ритмов. Современная хронобиология доказывает, что попытки навязать одинаковый распорядок дня людям с разными хронотипами («сова», «жаворонок») приводят к хронической усталости и быстрому выгоранию. Кроме того, согласно модели B.J. Fogg, поведение является производной от мотивации, способности и триггера. Большинство традиционных подходов требуют чрезмерных усилий на старте и не обеспечивают должного эмоционального подкрепления, что в условиях сокращения средней продолжительности фокусировки до 8 секунд делает долгосрочную самоорганизацию критически сложной задачей.

Рынок цифровых инструментов для повышения продуктивности демонстрирует динамичный рост: в 2025 году его совокупный объём превысил 8,5 млрд долларов США с прогнозируемым ростом 11,8–13,2 % ежегодно. Однако анализ ведущих программных продуктов выявил ряд существенных функциональных пробелов.

Приложение Habitica предлагает выдающуюся глубину геймификации, превращая рутину в ролевую игру, однако страдает от визуальной и когнитивной перегруженности, полностью игнорирует циркадные ритмы и не имеет механизмов верификации выполнения задач . Решение Forest эффективно для краткосрочной концентрации (техника Pomodoro), но функционально ограничено и не поддерживает долгосрочный классический трекинг привычек. Бесплатный инструмент Loop Habit Tracker предоставляет мощный аналитический аппарат, но абсолютно лишен геймификации и эмоциональных стимулов, что снижает мотивацию на длинной дистанции . Многофункциональный планировщик TickTick перегружен функциями, где трекинг привычек выступает лишь вторичным модулем без учета индивидуальной энергетики. Приложение Streaks делает успешный акцент на визуализации непрерывных цепочек (стриков), но является полностью платным, закрытым решением без социальных элементов и защиты от самообмана.

Таким образом, ни одно из лидирующих приложений не предлагает комплексного подхода, объединяющего учет индивидуальных биоритмов, оптимальную геймификацию и механизмы повышения достоверности вводимых данных. Как следствие, средний показатель удержания пользователей (retention rate) на 30-й день в категории редко превышает 10–15 %

В качестве ответа на выявленные недостатки разработано кроссплатформенное веб-приложение, позиционируемое как целостная экосистема для управления поведением. Центральным инновационным элементом системы является модуль «Энергетическая карта». На основе опроса о хронотипе и субъективной оценке энергии система строит динамический график суточной продуктивности и интеллектуально рекомендует оптимальное время для выполнения конкретных привычек, минимизируя физиологическое сопротивление.

Второй ключевой аспект — ненавязчивая геймификация второго поколения. Разработана внутренняя экономика на базе валюты «Focus Coins» (FC), начисляемой за соблюдение рекомендаций и поддержание непрерывных серий (стриков). Заработанные баллы могут быть потрачены во

встроенном магазине на «Дни отдыха» (защита от сброса прогресса) или временные множители наград.

Для решения проблемы фальсификации прогресса внедрен модуль честного трекинга (Anti-Cheat). Система требует обязательного прикрепления подтверждающих артефактов (текстовых заметок) при отметке задачи, что значительно повышает уровень саморефлексии и доверия к накопленной статистике.

Архитектурно система реализована по модели Single Page Application (SPA) с перспективой масштабирования до Progressive Web App (PWA). Клиентская часть построена на библиотеке React с использованием Redux Toolkit для управления состоянием и Chart.js для визуализации метрик. Серверная логика реализована на платформе Node.js (фреймворк Express). В качестве хранилища данных выбрана документоориентированная СУБД MongoDB, оптимизированная для хранения динамических структур. Интерактивность в реальном времени обеспечивается протоколом WebSocket (Socket.io).

Для наглядной демонстрации конкурентных преимуществ разработанного продукта составлена таблица 1 для сравнения по ключевым критериям, востребованным целевой аудиторией.

Таблица 1 – Сравнительный анализ ведущих аналогов и разрабатываемого решения

Критерий	**Habitica**	**Forest**	**Loop Habit Tracker**	**Streaks**	**Разрабатываемое решение FocusFlow5**
Учет биоритмов и хронотипа	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Интегрирован (Energy Map)
Глубина геймификации	Избыточная (RPG)	Средняя (таймер)	Отсутствует	Низкая (цвета)	Сбалансированная (Focus Coins)
Верификация выполнения	Нет	Ограничена	Нет	Нет	Обязательная (Anti-Cheat модуль)
Поддержка PWA	Нет	Нет	Нет	Нет	Да (полная кроссплатформенность)
Модель монетизации	Freemium	Платная	Полностью бесплатная	Платная	Рекламная (бесплатно)

Проект ориентирован на массовый рынок стран СНГ с использованием рекламной модели монетизации (интеграция баннеров рекламных сетей), исключающей финансовые барьеры для пользователей.

Совокупный объем инвестиций в разработку (включая оплату труда команды из четырех специалистов, отчисления на социальные нужды и накладные расходы) составляет 20 103,04 руб.

При прогнозируемой аудитории в 20 000 активных пользователей в первый год и консервативном среднем доходе с пользователя (ARPU) 0,75 руб. в месяц, расчетный прирост чистой прибыли составит 48 000 руб.

Выводы. Разработанное приложение «FocusFlow» решает проблему удержания мотивации через персонализацию под биоритмы пользователя и механизмы подтверждения прогресса. Использование стека Node.js и React обеспечивает кроссплатформенность. Система является эффективным инструментом формирования привычек в условиях высокой информационной нагрузки.

Список использованных источников:

1.Clear, J. Atomic Habits: An Easy & Proven Way to Build Good Habits / J. Clear. – New York : Avery, 2018. – 320 p.

2. Roenneberg, T. Internal Time: Chronotypes, Social Jet Lag, and Why You're So Tired / T. Roenneberg. – Cambridge : Harvard University Press, 2012. – 272 p.

3. Геймификация в продуктах: как сделать приложение, в которое хочется возвращаться [Электронный ресурс] // Хабр. – Режим доступа: https://habr.com/ru/articles/874788/. – Дата доступа: 15.03.2026.

4. Fogg, B. J. Tiny Habits: The Small Changes That Change Everything / B. J. Fogg. – Boston : Houghton Mifflin Harcourt, 2019. – 320 p.

5. Чайка, В. Г. Биоритмы и работоспособность человека / В. Г. Чайка. – М. : Просвещение, 2014. – 156 с.

6 Психология привычек: механизмы формирования и коррекции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://psychology.journal.com/habits. – Дата доступа: 15.03.2026.

7 .Райхлин, Г. Node.js в действии. 2-е изд. / Г. Райхлин, К. Кантелон. – СПб. : Питер, 2018. – 432 с.

8. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов : утв. Минэкономики РБ. – Минск, 2023. – 45 с.

9. ROI: расчет и интерпретация показателей в ИТ-сфере [Электронный ресурс] // Экономический вестник. – Режим доступа: https://econ.vestnik.by/roi-it. – Дата доступа: 15.03.2026.

АРХИТЕКТУРА NON-AUTOREGRESSIVE СИНТЕЗА РЕЧИ С CTC-ВЫРАВНИВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ДВУХЭТАПНОГО ПАЙПЛАЙНА

Бекарев С.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Калугина М.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе представлена модульная архитектура синтеза речи, комбинирующая методы автоматического распознавания речи для получения точного выравнивания текста и аудио с non-autoregressive генерацией акустических признаков. Для преодоления проблем нестабильности attention-механизмов, характерных для seq2seq моделей семейства Tacotron, разработан двухэтапный пайплайн: на первом этапе обучается CTC-based модель распознавания речи, после чего алгоритм Витерби применяется для извлечения строгого монотонного alignment между символами текста русского языка и кадрами мел-спектрограммы. Полученные временные метки используются для обучения отдельного DurationPredictor (предиктор длительности), предсказывающего количество фреймов для каждого входного символа. Акустическая модель на основе расширенных эмбеддингов генерирует логарифмированные мел-спектрограммы (80 мел-фильтров).

Современные системы синтеза речи демонстрируют стремительное развитие в направлении создания естественно звучащей речи, однако переход от лабораторных прототипов к промышленным внедрениям сопряжен с фундаментальными проблемами стабильности генерации. Традиционные end-to-end архитектуры, опирающиеся на механизм внимания (attention) для неявного выравнивания текста и акустических признаков, несмотря на высокое качество результата, характеризуются непредсказуемостью поведения при обучении: нестабильность монотонности alignment, пропуск символов и характерные артефакты воспроизведения затрудняют их применение в задачах, критичных к надежности. Особую сложность представляет адаптация таких систем к морфологически богатым языкам, таким как русский, где фонетическая реализация графем существенно зависит от позиции ударения.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью преодоления принципиального ограничения attention-based моделей, связанного с отсутствием гарантий монотонности отображения последовательности символов во временную ось. Существующие подходы требуют сложных эвристик (guided attention loss, windowing) и тонкой настройки гиперпараметров, при этом процесс обучения остается восприимчивым к сбоям на сложных фонетических конструкциях. Для русского языка, где длительность звуков сильно варьируется в зависимости от ударения, отсутствие явного контроля над временной разверткой текста приводит к неестественной ритмике и дефектам произношения, что ограничивает применимость технологий в синтезаторах речи профессионального уровня.

В связи с этим перспективным направлением является отказ от неявного alignment в пользу явного моделирования длительности фонем на основе предварительного выравнивания текста и аудио. Применение методов автоматического распознавания речи (ASR) с CTC-loss [1] и алгоритмов динамического программирования (Viterbi) [2] для извлечения точных временных меток позволяет декомпозировать задачу на управляемые этапы: сначала определение оптимального пути alignment, затем предсказание длительности на основе полученных данных, и наконец генерация акустических признаков. Подобная модульная архитектура обеспечивает стабильность обучения и контролируемую генерацию, сохраняя при этом высокое качество синтеза.

В данной работе приведены результаты разработки non-autoregressive пайплайна синтеза речи, идея которого заключается в использовании CTC-выравнивания для обучения DurationPredictor и последующей генерации мел-спектрограмм акустической моделью без привлечения механизма attention. В основе подхода лежит двухэтапная схема: обучение ASR-модели (CNN с Conv1D) на корпусе RUSLAN [3] с последующим применением алгоритма Витерби для получения строгого монотонного alignment (CER 9%), на базе которого обучается предиктор длительности, и акустическая модель на архитектуре энкодер-декодер с дилатационными свертками, работающая с графемной записью текста с явной маркировкой ударений.

На первом этапе реализована система автоматического распознавания речи (ASR) на архитектуре сверточной нейронной сети с одномерными свертками (Conv1D). Модель обучается с использованием CTC-loss (Connectionist Temporal Classification), который обеспечивает дифференцируемое выравнивание последовательностей различной длины без явного указания временных границ. Для получения строгого монотонного alignment применяется алгоритм Витерби, находящий оптимальный путь через матрицу posterior probabilities методом динамического программирования. Достигнутая точность распознавания составляет CER 9%, что является достаточным для извлечения надежных временных меток.

Полученный alignment используются для обучения DurationPredictor — полносвязной нейронной сети, предсказывающей количество фреймов мел-спектрограммы для каждого входного символа. На вход подаются эмбеддинги графем (включая варианты с ударением) без дополнительных позиционных

кодировок или контекстуальных признаков. Обучение проводится с функцией потерь MSE, минимизирующей среднеквадратичное отклонение предсказанной длительности от эталонной, полученной из Viterbi-alignment.

Акустическая модель построена по энкодер-декодерной схеме с использованием дилатационных сверток (dilated 1d convolutions). Архитектура включает блоки последовательного downsampling (для сжатия временного разрешения и увеличения рецептивного поля) и upsampling (восстановление исходной длины последовательности). Данная структура обеспечивает эффективное моделирование долгосрочных зависимостей в акустических данных при фиксированной длине входной последовательности, определяемой выходом DurationPredictor. Модель генерирует логарифмированные мел-спектрограммы, минимизируя MSE относительно оригинальных акустических признаков (оригинальной мел-спектрограммы).

Оценка качества производилась по метрикам: MSE предсказания длительности (кадры), MSE реконструкции мел-спектрограммы, а также субъективно — по разборчивости и естественности речи, синтезированной алгоритмом Гриффина-Лима (Griffin-Lim) [4]. Ниже представлена таблица с результатами оценки.

Таблица 1 – Результаты оценки модульного подхода генерации акустических признаков

Критерий оценки	Результат модели
CER (ASRModel)	9%
RMSE (DurationPredictor)	7.14
MSE (AcousticModel)	0.26
Разборчивость речи	выше среднего
Естественность речи	средняя

Вследствие проведения экспериментов также установлено, что предлагаемый модульный подход обеспечивает устойчивое обучение в условиях отсутствия предварительной фонемной транскрипции. Базовая Tacotron-модель продемонстрировала нестабильность attention-механизма даже при использовании teacher forcing и guided attention loss (несходимость attention-механизма). Альтернативный метод с линейным растягиванием текста в эмбединговом пространстве символов и soft-DTW loss, хотя и обеспечил сходимость, показал существенно более высокие значения MSE при генерации акустических признаков, что объясняется неспособностью линейной интерполяции адекватно моделировать нелинейные соответствия между текстовой и акустической последовательностями.

Предлагаемая архитектура достигла приемлемого для vocoder-free синтеза (синтез с помощью алгоритма Griffin-Lim), обеспечивая разборчивость текста при характерном «роботизированном» тембре, связанном с отсутствием фазовой информации. Отсутствие артефактов перескока букв подтверждает корректность использования явного CTC-выравнивания и Viterbi-алгоритма.

Проведенное исследование подтвердило, что декомпозиция задачи синтеза речи на этапы выравнивания, предсказания длительности и генерации акустических признаков является эффективной альтернативой end-to-end подходам. Использование графемной записи с маркировкой ударения позволяет обходиться без фонематора.

Список использованных источников:

1. Breaking down the CTC Loss [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://ogunlao.github.io/blog/2020/07/17/breaking-down-ctc-loss.html – Дата доступа: 18.03.2026

2. Распознавание речи [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/c/c3/Digital_Signal_Processing%2C_lecture_6.pdf – Дата доступа: 18.03.2026

3. Hugging Face [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://huggingface.co/datasets/Gzaborey/ruslan-dataset – Дата доступа: 18.03.2026

4. PyTorch Documentation [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://docs.pytorch.org/audio/2.8/generated/torchaudio.transforms.GriffinLim.html – Дата доступа: 18.03.2026

АЛГОРИТМЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В КООПЕРАТИВНО-СОРЕВНОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

Гулис А.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Калугина М.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В докладе приведены результаты сравнительного анализа алгоритмов глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL) применительно к задаче управления автономными агентами в кооперативно-соревновательной среде. Оценка эффективности алгоритмов выполнена на базе актуального клиента многопользовательской игры Tanks Blitz в формате боя «2 на 2» с учетом жестких ограничений пропускной способности среды.

Современные методы искусственного интеллекта демонстрируют выдающиеся результаты в задачах управления автономными системами [1], однако перенос теоретических моделей в реальные приложения сопряжен с рядом инженерных ограничений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания интеллектуальных агентов – автономных систем принятия решений –, способных действовать в средах с частичной наблюдаемостью и разреженными наградами, где традиционные алгоритмы с жестко заданной логикой неэффективны. В связи с этим, задачей работы является определение наиболее эффективного подхода, обеспечивающего стабильную сходимость к оптимальной политике поведения агентов в кооперативно-соревновательной среде. Особую значимость представляет проблема совместного выбора алгоритма обучения (On-policy или Off-policy) и архитектуры нейронной сети, обеспечивающей баланс между сэмпл-эффективностью и стабильностью обучения при жестком лимите вычислительных ресурсов.

В качестве испытательного полигона использовался не упрощенный симулятор, а реальный игровой клиент, взаимодействие с которым реализовано через высоконагруженный WebSocket-интерфейс. Это приводит к критическим ограничениям:

1 Низкая пропускная способность. На вычислительном кластере (24 ядра CPU, GPU RTX 4080 Super) параллельно запускается около 30 экземпляров игры, что суммарно дает генерацию лишь около 300 шагов в секунду. Это на порядки меньше, чем в стандартных RL-бенчмарках (Atari, MuJoCo).

2 Разреженная терминальная награда. Победа достигается только при полном уничтожении команды противника. Вероятность случайного выполнения этой задачи на старте обучения стремится к нулю.

3 Частичная наблюдаемость (POMDP). Агенту доступна лишь локальная информация. Механики «тумана войны» и циклов перезарядки нарушают марковское свойство среды, требуя от нейросети наличия памяти.

Для решения поставленной задачи спроектирована распределенная асинхронная архитектура. Агенты обучаются в режиме разделения параметров [2], управляясь одной нейросетью. Сбор данных организован по принципу Actor-Learner [3], что позволяет отделить генерацию опыта на CPU от обучения на GPU.

Входные данные представляют собой вектор признаков, включающий не только относительную геометрию, но и данные массива виртуальных лучевых сенсоров. Агент испускает 8 лучей (вперед, назад, влево, вправо, по диагоналям) на дистанцию 50 метров, что позволяет определять препятствия и укрытия без использования ресурсоемких сверточных сетей (CNN).

Для стабилизации обучения в условиях разреженных наград применен метод формирования вознаграждения на основе потенциалов (Potential-Based Reward Shaping, PBRS) [4]. В ходе эксперимента выявлен эффект «взлома вознаграждения» (Reward Hacking) [5]: при поощрении только за урон агенты обучались стрелять в землю рядом, избегая сложного прицеливания. Проблема была решена введением коэффициента дистанции, с которым увеличивалась награда при попадании по противнику с увеличением дистанции, что перенастраивало агентов на тактику дальнего боя.

В ходе исследования были протестированы и модифицированы четыре алгоритмических подхода.

В качестве базового решения был выбран On-policy подход. Первоначальные эксперименты в статичных дуэлях «1 на 1» показали быструю сходимость алгоритма ввиду низкой сложности задачи. Однако масштабирование до динамичного формата «2 на 2» потребовало внедрения стратегии Curriculum Learning [6]. Суть метода заключалась в поэтапном увеличении дистанции появления команд: от ближнего боя, где контакт с противником гарантирован, до дальних дистанций, требующих сложного маневрирования и прицеливания. Был использован алгоритм PPO [7] с применением строгих практик реализации (ортогональная инициализация, нормализация входов) [8].

PPO продемонстрировал высочайшую стабильность и выработал тактику точного прицеливания. Однако из-за On-policy природы алгоритм требует сброса собранных данных после каждого обновления

весов. В условиях низкой пропускной способности это привело к неприемлемому времени обучения, сделав метод экономически нецелесообразным для дальнейшего масштабирования.

Для повышения сэмпл-эффективности был осуществлен переход к Off-policy методам. Первоначальные тесты выявили проблемы: попытка применить нормализацию наград PopArt [9] в условиях разреженных наград привела к деградации градиентов из-за околонулевой дисперсии. Базовая версия Discrete SAC [10] оказалась неустойчива: из-за обилия нулевых наград дисперсия нормализатора PopArt стремилась к нулю, а энтропийный коэффициент «взрывался», превращая политику в случайный шум. Для решения проблемы был внедрен алгоритм SDSAC [11], специально разработанный для стабилизации обучения в дискретных средах. Ключевой особенностью является использование Double-Average Q-learning (целевое значение вычисляется как среднее двух Q-сетей (критиков)), что устраняет проблему недооценки (underestimation bias), характерную для стандартного минимума. Дополнительно был внедрен горизонт планирования.

Отказ от пессимистичной оценки Q-функции и увеличение горизонта планирования обеспечили плавное снижение энтропии. SDSAC успешно сформировал тактику защитного позиционирования, существенно превзойдя PPO по скорости сходимости.

Для компенсации частичной наблюдаемости был внедрен алгоритм R2D2 (Recurrent Replay Distributed DQN) [12], использующий LSTM-память и обучение на последовательностях. Наличие памяти позволило агентам эффективно использовать укрытия и контролировать дистанцию во время перезарядки. Однако рекуррентная природа привела к появлению поведенческих артефактов – цикличные микро-движениях корпуса.

Наиболее перспективным направлением стала реализация гибридного агента [13], где управление шасси и контроль орудия остаются дискретным, а наведение башни – непрерывными. Это потребовало разработки функции потерь сети стратегии (актора) с двумя независимыми регуляторами энтропии. Архитектура нейросети была перепроектирована и включала два независимых выходных слоя: первый отвечал за выбор дискретных действий, а второй для непрерывных. Дополнительно было реализовано маскирование: при повреждении модуля поворота башни выходы нейросети обнуляются, чтобы не тратить значительную долю шагов на заведомо невозможные команды и исключить некорректные градиенты.

Гибридный подход обеспечил наилучшую точность стрельбы. Для обеспечения надежности обучения дискретной части агента в гибридную модель были успешно интегрированы механизмы из ранее протестированного алгоритма SDSAC.

Проведённое исследование показало, что математический аппарат алгоритма оказывает определяющее влияние на формируемую тактику. Для сред с низкой пропускной способностью оптимальным компромиссом являются Off-policy. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем управления автономными роботами.

Сравнение подходов показало, что PPO лучше сохраняет стабильность и формирует аккуратное прицеливание, но в условиях ограниченной пропускной способности оказывается слишком дорогим по времени. Off-policy алгоритмы, напротив, быстрее накапливают полезный опыт и устойчивее масштабируются при низкой скорости генерации данных, однако требуют более тщательной настройки вознаграждения и стабилизационных приёмов.

Список использованных источников:

1. Sutton, R. S. Reinforcement Learning: An Introduction / R. S. Sutton, A. G. Barto. – 2nd ed. – Cambridge, MA : The MIT Press, 2018. – 552 p.

2. Revisiting Parameter Sharing in Multi-Agent Deep Reinforcement Learning [Электронный ресурс] / J. K. Terry [et al.] // arXiv, 2020. – arXiv:2005.13625. – DOI: 10.48550/arXiv.2005.13625.

3. IMPALA: Scalable Distributed Deep-RL with Importance Weighted Actor-Learner Architectures / L. Espeholt [et al.] // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (PMLR), 2018. – Vol. 80. – P. 1407–1416.

4. Policy Invariance Under Reward Transformations: Theory and Application to Reward Shaping / A. Y. Ng, D. Harada, S. Russell // Proceedings of the Sixteenth International Conference on Machine Learning (ICML), 1999. – P. 278–287.

5. Concrete Problems in AI Safety [Электронный ресурс] / D. Amodei // arXiv, 2016. – DOI: 10.48550/arXiv.1606.06565.

6. Curriculum Learning for Reinforcement Learning Domains: A Framework and Survey / S. Narvekar [et al.] // Journal of Machine Learning Research, 2020. – Vol. 21(181). – P. 1–50.

7. Proximal Policy Optimization Algorithms [Электронный ресурс] / J. Schulman [et al.] // arXiv, 2017. – arXiv:1707.06347. – DOI: 10.48550/arXiv.1707.06347.

8. What Matters for On-Policy Deep Actor-Critic Methods? A Large-Scale Study [Электронный ресурс] / M. Andrychowicz [et al.] // International Conference on Learning Representations (ICLR), 2021. – arXiv:2006.05990. – DOI: 10.48550/arXiv.2006.05990.

9. Multi-Task Deep Reinforcement Learning with PopArt / M. Hessel [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019. – P. 3796–3803. – DOI: 10.1609/AAAI.V33I01.33013796.

10. Soft Actor-Critic for Discrete Action Settings [Электронный ресурс] / P. Christodoulou // arXiv, 2019. – arXiv:1910.07207. – DOI: 10.48550/arXiv.1910.07207.

11. Revisiting Discrete Soft Actor-Critic [Электронный ресурс] / H. Zhou // arXiv, 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2209.10081.

12. Recurrent Experience Replay in Distributed Reinforcement Learning / S. Kapturowski, G. Ostrovski, J. Quan, R. Munos, W. Dabney // International Conference on Learning Representations (ICLR) (Poster), 2019.

13. A Hybrid SAC Algorithm: Advantage-Guided Soft Actor-Critic / C. Chen, X. Deng // MSCE '25: Proceedings of the 2025 International Conference on Management Science and Computer Engineering, 2025. – P. 459–462. – DOI: 10.1145/3760023.3760100.

ЭМОЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ КНИГОТОРГОВЛИ С ИНТЕГРАЦИЕЙ AI-АНАЛИЗА ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Жгутов Е.Д., *студент*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. Представлена эмоционально-ориентированная платформа для книготорговли, предназначенная для повышения качества персонализации при выборе литературы. Разработка сочетает в себе функции электронной коммерции с интеграцией алгоритмов обработки естественного языка для анализа пользовательских предпочтений. Программное средство обеспечивает формирование рекомендаций на основе эмоционального контекста и поисковых запросов, что способствует созданию уникального клиентского опыта.

Современные книготорговые платформы, такие как «ЛитРес» и Amazon Books, предлагают пользователям широкий ассортимент литературы, однако механизмы рекомендаций в них зачастую ограничены анализом жанровой принадлежности, популярности или истории покупок. Такой подход не учитывает эмоциональное состояние читателя, его настроение в момент выбора книги и глубинные смысловые предпочтения. В результате пользователь сталкивается с необходимостью самостоятельного просмотра большого количества позиций, что снижает эффективность поиска и негативно сказывается на пользовательском опыте. Разрабатываемая платформа призвана решить данную проблему путем внедрения алгоритмов обработки естественного языка, позволяющих интерпретировать эмоциональную окраску запросов и текстов.

Программное средство реализует следующие ключевые модули: каталог книг с развитой системой фильтрации; модуль аутентификации и управления пользователями с ролевой моделью (гость, покупатель, менеджер, администратор); корзина и оформление заказов; система сбора и хранения отзывов; AI-модуль анализа предпочтений; административная панель для управления каталогом, заказами и модерации контента.

Архитектура приложения построена по монолитному принципу с использованием паттерна Model-View-Template (MVT), реализованного в Django. Такой подход обеспечивает простоту разработки и развертывания на начальном этапе, при этом оставляя возможность для последующего масштабирования и выделения отдельных компонентов.

Ключевой особенностью разрабатываемой платформы является механизм взаимодействия пользователя с AI-модулем. Пользователь может описать свое настроение или желаемую эмоцию от книги в свободной текстовой форме (например, «грустная, но со счастливым концом», «хочу посмеяться», «что-то загадочное и атмосферное»). Система анализирует запрос, извлекает эмоциональные характеристики и сопоставляет их с профилями книг, сформированными на основе анализа текстов отзывов и аннотаций. В результате пользователь получает подборку изданий, максимально соответствующих его запросу.

Преимущества разрабатываемого программного средства:

– персонализированный подход к каждому пользователю за счет анализа эмоционального контекста запросов;

– интуитивно понятный механизм поиска книг по настроению, не требующий знания конкретных авторов или жанров;

– объединение функций интеллектуального помощника и торговой платформы в едином пространстве;

– возможность накопления и анализа пользовательских данных для постоянного улучшения качества рекомендаций;

– масштабируемая архитектура, позволяющая расширять функциональность по мере развития проекта.

Согласно экономическим расчётам, проект обладает высокой рентабельностью и эффективностью, что позволяет его внедрение на рынке в качестве конкурентоспособного продукта.Проект построен на следующем технологическом стеке: Python, Django, PostgreSQL, JavaScript, HTML, CSS, Bootstrap.Таким образом, разрабатываемая эмоционально-ориентированная платформа представляет собой инновационное решение в сфере книготорговли, сочетающее классическую функциональность интернет-магазина с передовыми технологиями искусственного интеллекта.

Список использованных источников:

1. Литрес – сервис электронных и аудиокниг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.litres.ru. – Дата доступа: 15.03.2026.

2. Best sellers & more: Books. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.amazon.com. – Дата доступа: 15.03.2026.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЛЮКОЗО-ИНСУЛИНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ДИАБЕТЕ ПЕРВОГО ТИПА

Лишик К.Я., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Гламаздин И.И. – старший преподаватель

Аннотация. Предлагаемое веб-приложение предназначено для моделирования глюкозо-инсулинового взаимодействия у пациентов с сахарным диабетом первого типа и автоматизации процессов, связанных с оценкой их состояния. Программный комплекс объединяет функции ввода данных пациента, описание внешних воздействий, прогнозирования уровня глюкозы и визуализации результатов, обеспечивая удобный доступ к ним через веб-интерфейс. Основное назначение программного комплекса – выполнять моделирование на основе системы дифференциальных уравнений и использовать полученные результаты для анализа состояния пациента.

Введение. Математическое моделирование биологических процессов является важной задачей, находящейся на стыке медицины, математики и информационных технологий. Особое значение оно приобретает при исследовании хронических заболеваний, таких как сахарный диабет, где точность прогнозирования и корректность принимаемых решений напрямую влияют на состояние пациента. В условиях роста числа пациентов с сахарным диабетом первого типа возрастает необходимость в разработке программных средств, позволяющих анализировать и прогнозировать динамику глюкозо-инсулинового взаимодействия [1]. Предлагаемый программный комплекс основан на математической модели Hovorka [2], представляющей собой систему из десяти нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, в которой в качестве внешних воздействий рассматривают инсулиновые дозы и приемы пациентом углеводной пищи. Математическая модель состоит из подсистемы глюкозы (абсорбция, распределение и утилизация), подсистемы инсулина (абсорбция, распределение и утилизация) и подсистемы действия инсулина (действие инсулина на перенос, удаление и эндогенное производство глюкозы).

Основная часть. Предлагаемое веб-приложение предназначено для моделирования глюкозо-инсулинового взаимодействия у пациентов с сахарным диабетом первого типа и автоматизации процессов, связанных с оценкой их состояния. Программный комплекс объединяет функции ввода данных пациента, описание внешних воздействий, прогнозирования уровня глюкозы и визуализации результатов, обеспечивая удобный доступ к ним через веб-интерфейс. Основное назначение программного комплекса – выполнять моделирование на основе системы дифференциальных уравнений и использовать полученные результаты для анализа состояния пациента.

Приложение ориентировано как на пациентов, так и на медицинские учреждения. Для пациентов система предоставляет возможность вводить данные о приёме пищи, инъекциях инсулина и получать прогноз изменения уровня глюкозы. Для врачей-эндокринологов предусмотрен доступ к истории наблюдений, результатам моделирования и инструментам анализа, что позволяет корректировать параметры модели и принимать обоснованные решения. Использование веб-технологий обеспечивает доступ к системе через браузер без необходимости установки дополнительного программного обеспечения.

Программное средство объединяет функции моделирования, хранения и анализа данных в единой системе. Оно представляет собой веб-ориентированное решение, обеспечивающее удобный контроль параметров как пациентами, так и врачами, и позволяет повысить эффективность контроля состояния при сахарном диабете первого типа. Архитектура веб-приложения создается с использованием современных технологий: Python и Django для серверной логики, математических вычислений (решений системы нелинейных дифференциальных уравнений) и реализации веб-интерфейса, PostgreSQL для хранения данных, а также JavaScript и библиотеки визуализации для наглядного отображения графиков и прогнозов. Такая архитектура обеспечит устойчивую работу системы, масштабируемость и возможность интеграции дополнительных модулей в будущем. Структура базы данных спроектирована с учётом хранения информации о пациентах, параметрах моделирования, результатах расчётов и истории изменений. База данных обеспечивает логическую целостность, надёжность и быстрый доступ к данным для анализа и визуализации. Интуитивно понятный пользовательский интерфейс обеспечивает удобный ввод данных, наглядное представление результатов, прогнозирование состояния и возможность работы пользователям с разным уровнем подготовки.

Функциональная модель программного средства описывает основные возможности системы и взаимодействие пользователей с её компонентами. Она отражает структуру выполняемых системой функций и служит основой для дальнейшей детализации вариантов использования и функциональных требований. Веб-приложение использует ролевую модель доступа, в рамках которой пользователи разделяются на несколько категорий в зависимости от выполняемых задач. Такой подход позволяет

разграничить права доступа, повысить безопасность системы и обеспечить удобство работы для различных типов пользователей. Каждая роль в системе представляет собой абстракцию, объединяющую пользователей с одинаковыми правами доступа и сценариями работы. Роль определяет набор доступных функций и операций, которые пользователь может выполнять в системе. В программном средстве выделены основные роли: пациент, врач и администратор. Каждая из ролей взаимодействует с системой по-разному и выполняет собственные функции, связанные с использованием возможностей программного средства. Функциональная модель программного средства может быть представлена в виде диаграммы вариантов использования (Use Case Diagram) в нотации UML, которая позволяет наглядно отразить взаимодействие пользователей с системой и определить основные сценарии её применения. Использование данной диаграммы даёт возможность формализовать требования к системе, выделить ключевые функции и определить границы взаимодействия между пользователями и программным средством.

Варианты использования являются важным инструментом анализа и проектирования программного средства, поскольку позволяют описать типовые сценарии взаимодействия пользователей с системой. Они отражают последовательность действий пользователя и соответствующие реакции системы, что даёт возможность формализовать поведение программного средства и определить его функциональные границы. Рассмотрение вариантов использования особенно эффективно при применении ролевой модели доступа. Такой подход позволяет не только упростить проектирование системы, но и обеспечить её безопасность за счёт разграничения прав доступа к функционалу и базы данных системы. Каждый из рассмотренных вариантов использования включает последовательность действий пользователя и соответствующие отклики системы, что позволяет формализовать поведение приложения в различных сценариях. Описание вариантов использования служит основой для последующего определения функциональных требований и разработки архитектуры системы.

Заключение. Математическая модель глюкозо-инсулинового взаимодействия в модели Hovorka использует десять динамических переменных, поведение которых описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. В результате проведения вычислительных экспериментов получены основные характеристики глюкозо-инсулинового взаимодействия в теле пациента. Особый интерес представляют динамические прогнозы уровня глюкозы, по которым вычисляются основные характеристики сахарного диабета первого типа, а именно средние значения, разброс по интервалам значений, длительность (по времени) превышения уровней глюкозы и т.д.

Список использованных источников:

1. Карпелов, *В.А. Математическое моделирование системы регулирования гликемии у пациентов с сахарным диабетом /* Карпелов *В.А., Филлипов Ю.И., Тарасов Ю.В., Боярский М.Д., Майоров А.Ю., Шестакова М.В., Дедов И.И. // Вестник РАМН. – 2015. – № 70(5). – С. 549–560 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.15690/ vramn.v70.i1441. – Дата доступа: 27.03.2026*

2. Hovorka, R. Nonlinear model predictive control of glucose concentration in subjects with type 1 diabets / Hovorka R., Canonico V., Chassin L.J. and etc // Physiological measurement. – 2004. – Vol. 25 (4). – P. 905–920 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.1088/0967-3334/25/4/010. – Дата доступа: 27.03.2026

СЕРВИС ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ АВТОМОБИЛЯ И ОЦЕНКИ ЕГО СТОИМОСТИ

Артиш В.О., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. Представлено программное средство для автоматического распознавания марки и модели автомобиля по изображению с последующей оценкой его рыночной стоимости на основе EfficientNet для выделения признаков и CatBoost для регрессии. Для повышения интерпретируемости применён метод Grad-CAM++, позволяющий визуализировать значимые области изображения.

В условиях развития цифровых технологий возрастает потребность в интеллектуальных системах, способных автоматически анализировать визуальные данные и извлекать из них прикладную информацию. Одной из актуальных задач является распознавание автомобилей по изображениям и оценка их рыночной стоимости, что особенно востребовано на вторичном автомобильном рынке.

Решение данной задачи осложняется высокой степенью сходства между различными моделями автомобилей и влиянием внешних факторов, таких как освещение, ракурс и качество изображения, что требует применения моделей машинного обучения, устойчивых к искажениям входных данных.

Функциональные возможности разработанного программного средства включают:

- прием изображения автомобиля;
- предварительную обработку изображений (масштабирование, нормализация);
- автоматическое распознавание марки и модели автомобиля;
- визуализацию значимых для распознавания областей изображения;
- сбор и обработку актуальных рыночных данных;
- формирование признаков и прогнозирование стоимости автомобиля;
- вывод результатов пользователю.

Для решения задачи распознавания используется архитектура EfficientNet, представляющая собой семейство сверточных нейронных сетей, основанных на принципе Compound Scaling. В отличие от традиционного масштабирования моделей, при котором увеличивается только один из параметров (глубина, ширина или разрешение), EfficientNet использует согласованное масштабирование всех трёх параметров. Это позволяет более эффективно использовать вычислительные ресурсы и достигать высокой точности при меньшем количестве параметров [1].

Преимуществом EfficientNet является использование базовой архитектуры MBConv (Mobile Inverted Bottleneck Convolution) и механизма Squeeze-and-Excitation, что способствует более эффективному выделению значимых признаков. Благодаря этому модель демонстрирует высокую обобщающую способность и устойчивость к вариативности входных изображений, что критически важно при распознавании автомобилей в реальных условиях.

Задача оценки стоимости автомобиля формализуется как задача регрессии и решается с использованием алгоритма градиентного бустинга CatBoost. Данный алгоритм основан на построении ансамбля решающих деревьев, где каждая последующая модель корректирует ошибки предыдущих. Особенностью CatBoost является поддержка категориальных признаков без необходимости их предварительного кодирования [2].

Для повышения интерпретируемости результатов применяется метод Grad-CAM++, являющийся развитием метода Grad-CAM. Он основан на использовании градиентов целевого класса по отношению к картам признаков сверточной сети и позволяет более точно определять вклад каждого пикселя изображения в итоговое решение модели. В отличие от базовой версии, Grad-CAM++ учитывает более сложные зависимости и обеспечивает лучшую локализацию значимых областей [3].

Использование Grad-CAM++ позволяет визуализировать области изображения, на которые модель опирается при классификации, что повышает прозрачность работы системы и доверие со стороны пользователя.

В результате разработанное решение демонстрирует высокую точность распознавания автомобилей и приемлемую ошибку прогнозирования стоимости. Использование современных методов компьютерного зрения и машинного обучения позволяет создать эффективный инструмент, обладающий практической значимостью и потенциалом дальнейшего развития.

Список использованных источников:

1. Что такое EfficientNet? Краткий обзор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ultralytics.com/ru/blog/what-is-efficientnet-a-quick-overview.

2. CatBoost [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/otus/articles/778714.

3. Grad-CAM++: White Box Explainability for Image Classification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://blog.aiensured.com/gradcam-plus-plus.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АССИСТЕНТ КОД-РЕВЬЮ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ В PULL REQUEST

Поборцева У.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы ручного код‑ревью в современных командах разработки и обосновывается необходимость автоматизации анализа изменений в Pull Request. На основе анализа предметной области, статистических данных и существующих инструментов предложена архитектура автоматизированного ассистента код‑ревью, использующего статический анализ и методы интеллектуальной обработки кода. Представлены ключевые функции системы и её область применения.

Рост сложности программных систем, увеличение объёмов кода и ускорение релизных циклов приводят к повышению нагрузки на разработчиков, выполняющих код‑ревью. Согласно исследованиям, ошибки, допущенные на этапе сбора требований и ревью, составляют до 60 % всех дефектов проекта, а на выполнение ревью уходит от 20 до 40 % рабочего времени разработчиков. Среднее время ожидания первого ответа ревьюера составляет 4–12 часов, а полный цикл ревью – от одного до трёх дней [1].

Ручной анализ кода подвержен человеческому фактору, требует высокой квалификации и значительных временных затрат. Это создаёт объективную необходимость внедрения автоматизированных инструментов, способных снизить трудоёмкость процесса и повысить качество программных решений.

Код‑ревью является ключевым этапом обеспечения качества программного обеспечения. Его цели включают выявление ошибок, повышение читаемости кода, соблюдение архитектурных требований и предотвращение накопления технического долга. Однако ручное ревью имеет ряд ограничений: высокая трудоёмкость, зависимость от квалификации ревьюера, повторяемость замечаний (например, замечания по стилю кода, форматированию и дублированию), перегрузка специалистов при большом количестве Pull Request, задержки, влияющие на скорость релизов.

Статистические исследования подтверждают, что значительная часть времени ревью уходит на рутинные операции, которые могут быть автоматизированы. Автоматизация позволяет сократить длительность ревью на 20–40 % и уменьшить количество пропущенных ошибок.

Для оценки текущего уровня автоматизации были рассмотрены три класса инструментов:

1 Статический анализатор. Статические анализаторы представляют собой инструменты, выполняющие детерминированный анализ исходного кода на основе заранее определённых правил. SonarQube является типичным представителем этого класса. Преимущества: широкий охват правил для различных языков, наличие метрик качества (дублирование, сложность, покрытие тестами) [2]. Недостатки: анализ выполняется на уровне кода, SonarQube анализирует изменения в PR, но его анализ остаётся статическим и не учитывает семантический контекст или логику изменений; нет выявления сложных логических ошибок, выходящих за рамки статических правил. Данный тип анализаторов не использует машинное обучение для интеллектуальной обработки кода.

2 Сервис автоматического ревью, интегрирующийся с GitHub. Примером такого сервиса может являться Codacy. Он хорошо справляется с рутинными проверками, автоматически запускает проверку для каждого Pull Request, его легко настроить, но данный сервис ограничен статическими правилами и генерирует много малозначимых замечаний из-за большого количества правил по стилю и отсутствия семантического анализа [3].

3 Основанной на искусственном интеллекте SAST‑решение, на примере Snyk Code. Данное решение эффективно выявляет уязвимости благодаря использованию ML-модели [4]. Однако инструмент сфокусирован на безопасности, а не на общем качестве кода. Также Snyk Code не предоставляет комплексных метрик качества, таких как дублирование, стиль кода и покрытие тестами, поэтому не может быть полноценной заменой код-ревью.

Сравнение показывает отсутствие решений, объединяющих контекстный анализ изменений, интеллектуальную обработку кода и глубокую интеграцию с процессом ревью.

Разрабатываемая система представляет собой автоматизированного ассистента код-ревью, интегрированного с GitHub и ориентированного на анализ изменений в Pull Request. Она предназначена для того, чтобы повысить качество ревью и снизить нагрузку на разработчиков за счёт сочетания статического анализа, интеллектуальных методов и автоматизированной обратной связи.

Область применения системы: команды разработки, использующие GitHub, проекты с высокой интенсивностью изменений, организации, где требуется стандартизация ревью, а также команды без выделенных ревьюеров.

Доступ к функциональным возможностям ассистента разграничивается в соответствии с ролями пользователей: ревьюеры получают рекомендации по улучшению кода, структурированные отчёты и выявленные замечания, а администраторы – инструменты мониторинга и настройки правил анализа.

На основе анализа существующих аналогов можно выделить ряд ключевых преимуществ разрабатываемой системы. Её отличительной особенностью является сочетание традиционного статического анализа с методами машинного обучения, что позволяет выявлять не только формальные нарушения, но и более сложные логические и архитектурные проблемы, недоступные большинству современных инструментов. Важным преимуществом является и контекстный анализ изменений.

Гибкая настройка правил анализа обеспечивает адаптацию инструмента под реальные процессы команды и корпоративные стандарты разработки, а глубокая интеграция с GitHub позволяет автоматически публиковать комментарии и формировать отчёты непосредственно в рамках процесса ревью. Это снижает нагрузку на опытных специалистов, освобождая их от рутинных операций и позволяя сосредоточиться на архитектурных и концептуальных аспектах разработки. Дополнительным преимуществом является уменьшение стоимости владения благодаря внутренней разработке, что обеспечивает независимость от внешних поставщиков и возможность оперативной адаптации системы под потребности проекта. В совокупности эти факторы повышают прозрачность и воспроизводимость процесса ревью, формируя единый стандарт качества и снижая влияние человеческого фактора.

Основными функциями системы являются извлечение коммитов и изменённых файлов непосредственно из Pull Request, выполнение статического анализа и проверок стиля кода, интеллектуальный анализ кода с использованием ML‑моделей, выявление ошибок, уязвимостей и архитектурных несоответствий, автоматическая публикация комментариев в Pull Request, формирование отчётов и метрик качества, а также логирование действий для последующего аудита.

Система снижает трудоёмкость ревью, уменьшает влияние человеческого фактора и обеспечивает единообразие подходов к контролю качества.

Анализ предметной области, статистических данных и существующих решений подтверждает актуальность разработки автоматизированного ассистента код‑ревью. Предложенная система сочетает статический анализ, интеллектуальные методы обработки кода и глубокую интеграцию с GitHub, что позволяет повысить качество программных решений, сократить трудозатраты и ускорить процесс разработки.

Использование ассистента обеспечивает единообразие подходов к ревью, уменьшает влияние человеческого фактора и способствует формированию прозрачных и воспроизводимых процессов контроля качества.

Список использованных источников:

1. Kudrjavets, G. Does code review speed matter for practitioners? / Kudrjavets, G., Rastogi, A // Empirical Software Engineering. — 2023. — Т. 29, № 1. — Ст. 7.

2. SonarQube Server [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.sonarsource.com/sonarqube-server. – Дата доступа: 15.03.2026

3. Why Codacy is the #1 SonarQube alternative [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.codacy.com/comparison/codacy-vs-sonarqube. – Дата доступа: 15.03.2026

4. Find, prioritize, and auto-fix issues with dev-focused SAST solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.codacy.com/comparison/codacy-vs-sonarqube. – Дата доступа: 17.03.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОДНОСТОРОННЕГО ДОМИНИРОВАНИЯ С ЗАПРЕТАМИ

Политанский А.И., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Дугинов О.И. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматривается обобщение задачи одностороннего доминирования в двудольном графе. Пусть имеется двудольный граф G с долями V_1, V_2 и семейство S непустых подмножеств S_1, S_2, … , S_t множества вершин доли V_2. Задача состоит в том, чтобы найти наименьшее (по числу вершин) подмножество D доли V_2 такое, что каждая вершина доли V_1 смежна по крайней мере с одной из вершин множества D и множество D содержит не более одной вершины из каждого множества S_i семейства S. Особенность задачи заключается в наличии семейства S «запрещающих» множеств. В работе исследуется вычислительный аспект указанной задачи, а именно формулируется её содержательная и распознавательная постановки, устанавливается вычислительная сложность и предлагается целочисленная линейная модель задачи. Кроме этого, разработаны и протестированы на случайных графах следующие эвристические алгоритмы, решающие указанную задачу приближённо: локальный поиск, метод имитации отжига, жадный алгоритм. Проведён сравнительный анализ работы алгоритмов.

1. Задача и её вычислительная сложность. Пусть имеется сеть железных дорог с железнодорожными станциями и несколько поездов с заданными маршрутами движения. Каждый поезд, следуя по маршруту, останавливается на некоторых станциях. В целях безопасности каждый поезд хотя бы на одной из станций, где происходит его остановка, должен пройти диагностику и техническое обслуживание. Пусть имеется семейство S множеств S_1, S_2, … , S_t станций. Нельзя размещать пункты обслуживания на двух или более станциях, принадлежащих одному множеству семейства S. Задача состоит в том, чтобы выбрать минимальное число станций, на которых необходимо разместить пункты технического обслуживания, таким образом, чтобы каждый поезд, следующий по маршруту, останавливался хотя бы на одной из станций, где размещён пункт технического обслуживания, и при этом в каждом множестве S_1, S_2, … , S_t семейства S было выбрано не более одной станции [1, 2]. В теоретико-графовой постановке задача формулируется следующим образом. Пусть $G = (V_1 \cup V_2, E)$ – двудольный граф с двумя долями V_1, V_2. Вершинами доли V_1 являются поезда, а вершинами доли V_2 — станции, S – набор «запрещающих» множеств станций. При этом вершина v_1 доли V_1 соединена ребром с вершиной v_2 доли V_2 тогда и только тогда, когда поезд v_1 останавливается на станции v_2. Будем говорить, что подмножество D множества вершин доли V_2 является *доминирующим вершины доли* V_1, если для каждой вершины доли V_1 (для каждого поезда) найдётся смежная с ней вершина множества D (станция множества D, на которой останавливается поезд). Задача состоит в том, чтобы найти минимальное число вершин доли V_2, которые потребуется включить в множество D, чтобы оно было множеством, доминирующим вершины доли V_1, и в множество D входило не более одной вершины каждого множества S_1, S_2, … , S_t семейства S.

Рассматриваемая задача ОДНОСТОРОННЕЕ ДОМИНИРОВАНИЕ С ЗАПРЕТАМИ в виде задачи распознавания свойств формулируется следующим образом:

Условие: задан двудольный граф $G = (V_1 \cup V_2, E)$, семейство S подмножеств S_1, S_2, … , S_t множества вершин доли V_2 и натуральное число k.

Вопрос: существует ли множество $D \subseteq V_2$ мощности не более k такое, что D является множеством, доминирующим вершины доли V_1, и для каждого множества S_i семейства S имеет место неравенство $|D \cap S_i| \le 1$?

Установлено, что задача является вычислительно сложной.

Теорема. *Задача* ОДНОСТОРОННЕЕ ДОМИНИРОВАНИЕ С ЗАПРЕТАМИ *является* NP-*полной*.

Полиномиальное сведение строится от классической NP-полной задачи 3-ВЫПОЛНИМОСТЬ [3].

2. Целочисленная линейная модель задачи. Приведём формулировку оптимизационной версии задачи ОДНОСТОРОННЕЕ ДОМИНИРОВАНИЕ С ЗАПРЕТАМИ в виде задачи целочисленного линейного программирования [4]. Обозначим мощность множества V_1 через n и мощность множества V_2 через m. Произвольным образом упорядочим множество вершин доли V_2 и обозначим их u_1, u_2, … . u_m. Аналогично поступим с вершинами доли V_1 – w_1, w_2, … , w_n. Для каждого подмножества S_i, $i = 1, 2, \dots, t$, множества V_2 построим характеристический вектор s_i, представляющий собой набор из m нулей и единиц, причём единицы располагаются на j-ых местах, для которых вершины u_j принадлежат множеству S_i. Пусть C – это матрица «двудольной» смежности графа G, т.е. матрица размера n на m, строки которой взаимно однозначно соответствуют вершинам доли V_1, а столбцы – вершинам доли V_2. При этом $c_{ij} = 1$, если вершина w_i смежна с вершиной u_j, и $c_{ij} = 0$, в противном случае. Для каждой вершины u_i доли V_2 заведём булеву переменную x_i, которая принимает значение 1, если вершина u_i входит в решение D, и значение 0, иначе. Число вершин в множестве D представляет собой сумму всех переменных x_i, где сумма берётся по всем значениям индекса i от 1 до m. Запишем условия, которые гарантируют, что для вершины w_i доли V_1 найдётся смежная с ней вершина u_j множества D

$$\sum_{j=1}^{m} c_{ij} x_j \geq 1.$$

Наложим ограничения на переменные, которые гарантируют, что решение *D* содержит не более одной вершины множества S_i из семейства *S*

$$\sum_{j=1}^{m} s_{ij} x_i \leq 1.$$

Целочисленная линейная модель оптимизационной версии задачи ОДНОСТОРОННЕЕ ДОМИНИРОВАНИЕ С ЗАПРЕТАМИ имеет вид

$$\sum_{i=1}^{m} x_i \to \min$$

$$\sum_{j=1}^{m} c_{ij} x_j \geq 1, \forall i \in \{1,2,\ldots$$

$$\sum_{j=1}^{m} s_{ij} x_j \leq 1, \forall i \in \{1,2,\ldots$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad \forall i \in \{1,2,\ldots$$

$$x_i \in Z, \qquad \forall i \in \{1,2,\ldots$$

3. Эвристические методы решения задачи. Задача ОДНОСТОРОННЕЕ ДОМИНИРОВАНИЕ С ЗАПРЕТАМИ является NP-полной. Это значит, что в предположении P ≠ NP, не существует алгоритмов, которые решают оптимизационный вариант задачи ОДНОСТОРОННЕЕ ДОМИНИРОВАНИЕ С ЗАПРЕТАМИ точно за полиномиальное время в худшем случае. Это обуславливает важность разработки эффективных методов приближённого решения задачи.

Для приближённого решения оптимизационной версии задачи были разработаны эвристические алгоритмы на основе локального поиска, имитации отжига и жадной стратегии [5]. Разработанные алгоритмы реализованы на языке программирования Python. Был проведён вычислительный эксперимент. Работа эвристических алгоритмов была протестирована на случайных графах модели Эрдёша-Реньи. Модель позволяет сгенерировать случайных граф порядка *n*, вероятность существования ребра между двумя вершинами определяется параметром *p* [6].

Выводы по экспериментам. Жадный алгоритм показал наилучший результат времени работы, однако находил менее точные решения чем локальный поиск и метод имитации отжига. Локальный поиск находил наилучшие решения при небольших временных затратах в то время, как метод имитации отжига, не получая лучших результатов по сравнению с локальным поиском, требовал большего количество итераций и затраченного времени. Можно сделать вывод, что жадный алгоритм оптимален при важности временных ограничений, в то время как локальный поиск находит наиболее близкие к лучшим решения. Метод имитации отжига не улучшил результат по сравнению с локальным поиском, но имеет большие временные требования.

Список использованных источников:

1. Weihe, K. Covering Trains by Stations or The Power of Data Reduction / K. Weihe // Proceedings of Algorithms and Experiments. – 1998. – P. 1-8.

2. Niedermeir, R. Invitation to Fixed-Parameter Algorithms / R. Niedeimeir. – Oxford University Press, 2006.

3. Гэри, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир,1982.

4. Шевченко, В.Н. Линейное и целочисленное линейное программирование / В.Н. Шевченко, Н.Ю. Золотых. – Н.Н.: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2005.

5. Пападимитриу, Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц – М.: Мир, 1985. – 512 с.

6. Райгородский, А.М. Модели случайных графов и их применения / А.М. Райгородский // Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2, № 4(8). – С.130-140

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ПО УЧЕТУ И КОНТРОЛЮ ТОВАРНО-МАТЕРИАЛЬНЫХ ЦЕННОСТЕЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Петровский В.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Деменковец Д.В. – старший преподаватель

Аннотация. Рассматриваются проблемы учета товарно-материальных ценностей на предприятиях. Представлено программное средство для достижения оперативного контроля и прозрачности перемещения имущества. Описаны основные функции и архитектура проекта.

Актуальной проблемой предприятий является отсутствие прозрачной системы учета материальных активов. С ростом количества используемого оборудования увеличиваются временные затраты на его поиск и усложняется контроль за перемещениями между объектами. Совместное использование инвентаря без назначения ответственных, отсутствие оперативного контроля за местонахождением и состоянием оборудования приводит к прямым финансовым потерям.

Использование электронных таблиц или стационарных *ERP*-систем не обеспечивает необходимой точности и мобильности непосредственно на рабочих местах. В связи с этим актуальной задачей является создание мобильного программного средства для учета ТМЦ.

Цель текущего проекта заключается в проектировании и разработке кроссплатформенного приложения, направленного на автоматизацию учета активов, сокращение времени инвентаризации и обеспечение прозрачности жизненного цикла оборудования.

На этапе предпроектного исследования были проанализированы существующие аналоги, включая «*ToolKeeper*» и «АктивТМЦ» [1, 2]. Были выявлены преимущества и недостатки, которые стали основой для формирования требований к ПС. Выбрана клиент-серверная архитектура: серверная часть с использованием технологии ASP.NET, клиентская часть с использованием кроссплатформенного фреймворка Flutter, система управления базами данных PostgreSQL. Безопасность разрабатываемого ПС обеспечивается на нескольких уровнях: аутентификация пользователей, ролевая модель доступа, шифрование каналов связи (HTTPS) и журналирование операций с ТМЦ.

Предлагаемый алгоритм функционирования мобильной системы учета включает следующие этапы. При поступлении оборудования (в том числе особо ценных активов) на предприятии производится его регистрация и назначение материально ответственного лица. Система автоматически присваивает объекту уникальный идентификатор и генерирует QR- и штрихкод, которые наносятся на инвентарь методом этикетирования или гравировки (рис. 1, а). Дальнейшее перемещение ТМЦ между сотрудниками происходит через механизм двухстороннего подтверждения, который предусматривает получение согласия со стороны передающего и принимающего (рис. 1, б). Передающий выбирает ТМЦ и новое ответственное лицо. Принимающему приходит уведомление с заявкой на передачу, которую может отклонить или принять, прикрепив фото ТМЦ и оставив комментарий. Факт передачи ТМЦ сохраняется в приложении для контроля руководством (рис. 1, в) с возможностью дальнейшей работы с документацией (рис. 1, г).

а б в г

а – маркировка; б – передача ТМЦ; в – контроль перемещений; г – формирование отчетов

Рисунок 1 – Иллюстрация алгоритма функционирования мобильной системы учета

Данный подход обеспечивает автоматическое формирование истории эксплуатации: система в реальном времени отображает текущего ответственного и его рабочую локацию, что обеспечивает прозрачность учета и существенно минимизирует временные затраты на поиск необходимых активов.

Список использованных источников:

1. ToolKeeper – простой учет материальных ценностей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://toolkeeper.io/. – Дата доступа: 15.03.2026.

2. АктивТМЦ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://active-tmc.ru. – Дата доступа: 15.03.2026.

ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ГЕНЕРАТИВНОГО ИИ НА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Клемятенко П.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Гламаздин И.И. – старший преподаватель

Аннотация. В данной работе рассматривается влияние инструментов генеративного искусственного интеллекта на жизненный цикл разработки программного обеспечения. Анализируются изменения в продуктивности разработчиков, качестве создаваемого кода и распределении ролей между человеком и интеллектуальными системами. Показано, что применение ИИ сопровождается как повышением эффективности при решении типовых задач, так и ростом рисков, связанных с качеством и безопасностью. Особое внимание уделяется зависимости результатов использования ИИ от уровня профессиональной подготовки разработчиков. Сформулированы рекомендации по интеграции ИИ в процессы разработки и обозначены направления трансформации подготовки специалистов.

Современная разработка программного обеспечения переживает фундаментальный сдвиг: большие языковые модели (LLM) превратились из инструментов автодополнения в агентов, способных участвовать в создании архитектуры, генерации тестов и рефакторинге. Эффект от внедрения генеративного ИИ неоднозначен. С одной стороны, фиксируется рост скорости написания кода (до 50% экономии времени на шаблонных задачах) [1], с другой — увеличивается число сбоев при выпуске программных продуктов, возникает риск эрозии критического мышления у разработчиков [2]. Кроме того, при отсутствии тщательной проверки сгенерированный код может снижать общее качество программной системы [3]. В контексте жизненного цикла разработки программного обеспечения влияние генеративного ИИ проявляется на всех этапах — от формализации требований до сопровождения и модернизации систем, что обуславливает необходимость комплексного анализа его воздействия на процессы разработки.

Восприятие продуктивности напрямую зависит от типа решаемых задач. Согласно опросу 65 разработчиков [2], наибольшее снижение трудозатрат (60% респондентов) наблюдается при рефакторинге и проверке кода. ИИ позволяет быстро генерировать повторяющиеся блоки кода и определения переменных, избавляя от рутины. Однако его возможности ограничены при работе со сложными задачами: при необходимости внести изменения в крупный проект ИИ-инструмент может затрагивать код, не связанный с поставленной задачей. Исследование практиков [3] показывает, что спектр подходов к использованию ИИ варьируется от «vibe coding» (свободное взаимодействие) до «agentic coding» (автономные агенты), что влияет на распределение задач между человеком и ИИ. При этом влияние ИИ на продуктивность проявляется неоднородно и зависит от характера задач:

– при решении типовых задач наблюдается значительное сокращение времени разработки;

– при работе с устоявшимися кодовыми базами повышается скорость анализа и навигации;

– при реализации новых архитектурных решений эффект снижается из-за необходимости глубокой проверки;

– при исправлении ошибок возможно как ускорение процесса, так и внесение дополнительных дефектов.

Качество сгенерированного кода варьируется в зависимости от типа задачи. Наибольший объем правок требуется при генерации кода и тестов, что указывает на необходимость существенной доработки. Написание тестов и исправление ошибок требуют корректировок среднего уровня, тогда как рефакторинг и проверка кода — лишь умеренных. Наименьшее количество изменений требуется при генерации документации. Эти данные подтверждают, что обязательной практикой становится оценка качества генерируемого кода [2]. Проблема качества носит системный характер и затрагивает несколько аспектов:

– корректность реализуемой логики и соответствие требованиям;

– устойчивость к ошибкам и граничным условиям;

– безопасность и отсутствие уязвимостей;

– соответствие архитектурным ограничениям проекта;

– читаемость и поддерживаемость кода.

Таким образом, проверка результатов генерации должна рассматриваться как неотъемлемый этап разработки.

Ключевым фактором успешного использования ИИ выступает предметная экспертиза: разработчики, глубоко знающие контекст кодовой базы, лучше способны оценить предложенные решения. При этом наблюдается закономерность: чем выше способность пользователя верифицировать код, тем ниже его удовлетворенность от работы с ИИ-помощниками, тогда как для пользователей с ограниченными навыками выявления ошибок такие инструменты представляют высокую потенциальную ценность, но одновременно вводят риски из-за недостаточной проверки [2].

Восприятие продуктивности обратно коррелирует с опытом разработки. Риск эрозии навыков особенно актуален для начинающих специалистов: традиционный путь накопления опыта нарушается, когда ИИ берет на себя выполнение рутинных функций, что ставит вопрос о трансформации подготовки кадров [3]. Данная зависимость указывает на перераспределение ролей в процессе разработки: ИИ выступает в качестве инструмента усиления, эффективность которого определяется уровнем компетенций пользователя.

Генеративный ИИ не отменяет необходимость экспертизы, но смещает вектор создания ценности. По мере автоматизации рутинного кодирования возрастает значимость компетенций более высокого порядка: точности формулировки требований, архитектурного мышления и управления процессом разработки. Вместо непосредственного написания кода инженер всё чаще выполняет координирующую функцию, формулируя задачи, уточняя требования и проверяя результаты. Естественный язык становится важным средством взаимодействия с системой, а когнитивная нагрузка смещается от синтаксических аспектов к архитектурным решениям, управлению доменной моделью и интеграции компонентов. Узкие места разработки перемещаются в область анализа кода, тестирования, обеспечения безопасности и системного мышления [3].

На основе практического опыта инженеров сформулирован ряд рекомендаций для эффективного использования ИИ в разработке. Важно выбирать инструмент в соответствии с задачей: для написания отдельных функций достаточно встроенной генерации, тогда как для масштабных изменений предпочтительнее использовать инструменты с агентной архитектурой, обеспечивающие автономное планирование, выполнение и итеративную корректировку задач. Генерацию кода целесообразно предварять документированием и разработкой тестов, что способствует повышению качества результатов. Перед началом работы рекомендуется формировать детализированный план решения задачи, разбивая её на управляемые этапы. Существенное значение имеет корректное формирование запросов к ИИ с предоставлением полного контекста, включая архитектурные ограничения и требования к стилю кода. Для сохранения согласованности разработки следует использовать сопроводительную документацию проекта, фиксирующую ключевые решения и зависимости. Наконец, каждая сгенерированная часть кода должна проходить экспертизу с использованием контрольных списков, оценивающих безопасность, корректность и производительность [2]. Представленные рекомендации отражают формирование новых практик разработки, ориентированных на совместную работу человека и интеллектуальных систем.

Выявленные изменения требуют пересмотра подходов к подготовке специалистов. Авторы [3] подчеркивают необходимость смещения фокуса образовательных программ: от изучения синтаксиса — к решению задач и архитектурному мышлению; от индивидуального написания кода — к работе с ИИ-инструментами и оценке качества результатов; от изолированных заданий — к проектно-ориентированному обучению. Кроме того, актуализируется задача формирования навыков ответственного использования ИИ, включая понимание его ограничений и потенциальных рисков.

Использование ИИ в разработке программного обеспечения порождает значимые этические и правовые вопросы, связанные с интеллектуальной собственностью. Ключевыми являются проблемы принадлежности сгенерированного кода и компенсации создателям данных, использованных для обучения моделей [3]. Компании выражают обеспокоенность возможными юридическими последствиями применения такого кода без его модификации. В ответ организации внедряют внутренние политики использования или обучают модели на собственных данных, стремясь минимизировать риски. Дополнительную сложность представляет трансграничный характер разработки, требующий согласования правовых подходов.

Генеративный ИИ выступает не только инструментом повышения продуктивности, но и фактором трансформации процессов разработки и профессиональных ролей. Устойчивость его преимуществ зависит от осознанной интеграции в организационные процессы, прозрачности управления и сохранения ответственности разработчика за конечный результат. В этой связи перспективными направлениями дальнейших исследований являются количественная оценка влияния ИИ на этапы разработки и разработка методик его безопасного применения.

Список использованных источников:

1. Deniz, B. K. Unleashing developer productivity with generative AI [Electronic resource] / B. K. Deniz, C. Gnanasambandam, M. Harrysson, A. Hussin, S. Srivastava // McKinsey & Company. – Mode of access: https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/unleashing-developer-productivity-with-generative-ai. – Date of access: 25.03.2026.

2. Gurgul, V. The State of Generative AI in Software Development: Insights from Literature and a Developer Survey [Electronic resource] / V. Gurgul, R. Gubela, S. Lessmann // arXiv.org. – Mode of access: https://arxiv.org/abs/2603.16975. – Date of access: 25.03.2026.

3. Chang, H. Coding With AI: From a Reflection on Industrial Practices to Future Computer Science and Software Engineering Education [Electronic resource] / H. Chang et al. // arXiv.org. – Mode of access: https://arxiv.org/abs/2512.23982. – Date of access: 25.03.2026.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТУРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВКУСОВЫХ И КУЛЬТУРНЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Махвееня К.Е., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. Представлена интеллектуальная система планирования туров, предназначенная для персонализированного поиска достопримечательностей, формирования рекомендаций и построения туристических маршрутов. Система предоставляет инструменты для анализа пользовательских предпочтений, отображения объектов на карте и сохранения маршрутов. В разработке использованы современные веб-технологии и архитектурные подходы, обеспечивающие масштабируемость и удобство дальнейшего развития программного средства..

Ключевые слова. туризм, рекомендации, маршрут, достопримечательности, веб-приложение, персонализация, React, NestJS, PostgreSQL, картографический сервис.

В современных условиях цифровизации туристической сферы пользователи всё чаще используют онлайн-сервисы для поиска информации о достопримечательностях, планирования поездок и составления индивидуальных маршрутов. Однако существующие решения не всегда обеспечивают достаточный уровень персонализации и удобства при выборе объектов посещения. Пользователю приходится самостоятельно анализировать большое количество информации, сравнивать различные источники и вручную формировать последовательность посещения мест, что усложняет процесс планирования путешествия.

Большинство существующих туристических платформ [1–3] ориентировано преимущественно на предоставление справочной информации и стандартных поисковых возможностей, не учитывая индивидуальные интересы пользователя, его предпочтения и поведенческие особенности. В результате рекомендации носят общий характер, а процесс выбора достопримечательностей требует значительных временных затрат. Кроме того, данные о туристических объектах, отзывах, фотографиях и расположении часто распределены между несколькими сервисами, что снижает удобство использования.

Разрабатываемая интеллектуальная система планирования туров предназначена для автоматизации процесса выбора туристических объектов и построения персонализированных маршрутов. Функциональные возможности системы включают поиск достопримечательностей, фильтрацию по категориям, отображение объектов на карте, сохранение маршрутов и формирование рекомендаций на основе пользовательских предпочтений. Использование такого подхода позволяет сократить время поиска интересующих мест и повысить качество планирования туристических поездок.

Клиентская часть программного средства реализована с использованием языка TypeScript и библиотеки React, что обеспечивает построение современного интерактивного интерфейса и высокую скорость работы приложения. Для управления состоянием используется Redux, позволяющий централизованно организовать обработку пользовательских данных и результатов запросов. Серверная часть построена на базе NestJS, обеспечивающего модульную архитектуру и удобную организацию бизнес-логики.

Для хранения информации используется PostgreSQL, обеспечивающая надёжность хранения данных, поддержку сложных запросов и удобную организацию связей между сущностями системы. Для отображения туристических объектов и маршрутов используется интеграция с картографическими сервисами, позволяющая пользователю визуально анализировать расположение достопримечательностей и строить последовательность посещения.

Таким образом, разрабатываемое программное средство решает актуальную задачу персонализации туристического планирования и объединяет возможности рекомендательных алгоритмов, картографических сервисов и современных веб-технологий. Его внедрение может повысить удобство поиска туристических объектов, улучшить качество пользовательского опыта и расширить возможности цифровых туристических сервисов.

Список использованных источников:

1. Google Maps Platform – картографический сервис // https://developers.google.com/maps.
2. Tripadvisor – туристический рекомендательный сервис // https://www.tripadvisor.com.
3. 2GIS – городской навигационный сервис // https://2gis.ru/.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ФРИЛАНС ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Рабец И.О., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В работе представлено веб-приложения для автоматизации взаимодействия заказчиков и исполнителей в сфере фриланс-услуг. Для разработки использованы: ASP.NET, Angular, Docker, REST/gRPC, брокер сообщений, что обеспечивает масштабируемость, устойчивость к нагрузкам и безопасность данных. Особенностью системы является интеграция механизмов рейтингования, отзывов и прозрачного контроля выполнения задач, направленных на снижение временных затрат и повышение доверия участников цифрового рынка.

В условиях активного развития цифровой экономики и роста популярности удалённой занятости всё большую значимость приобретают информационные системы, позволяющие эффективно организовать взаимодействие между заказчиками и исполнителями. Одним из таких решений стало разработанное веб-приложение, ориентированное на автоматизацию процессов в сфере фриланс-услуг и проектной деятельности.

Разработанная система представляет собой современное веб-приложение, предназначенное для упрощения и оптимизации взаимодействия между заказчиками и исполнителями. Программный продукт реализует комплексный подход к организации цифровой среды, в которой пользователи могут быстро и легко находить друг друга, формировать задачи, координировать процесс выполнения работ и осуществлять взаиморасчёты в рамках единой платформы. В основе системы лежит идея объединения ключевых бизнес-процессов фриланс-рынка в одном информационном пространстве с акцентом на удобство, гибкость и возможность дальнейшего развития.

Функциональные возможности системы охватывают полный жизненный цикл взаимодействия участников и включают:

– регистрацию и аутентификацию пользователей с последующим управлением профилями;

– публикацию проектов и подачу заявок на выполнение работ;

– поиск и фильтрацию задач и исполнителей по заданным критериям;

– обмен сообщениями и файлами между участниками в рамках проектной активности;

– управление проектами, включая отслеживание статусов задач, контроль сроков и фиксацию результатов.

Система решает ряд актуальных задач, характерных для современной цифровой экономики. Прежде всего, она позволяет снизить затраты времени и усилий при поиске исполнителей и организации проектной деятельности. Автоматизация подачи заявок, выбора кандидатов и ведения коммуникации делает работу пользователей более быстрой и удобной. Кроме того, повышается прозрачность взаимодействия за счёт внедрения механизмов рейтингов, отзывов и контроля выполнения задач. Особое внимание уделено безопасности данных и финансовых операций, что напрямую влияет на уровень доверия пользователей.

Технологическая основа системы построена с использованием современных инструментов и архитектурных подходов. Серверная часть реализована на платформе ASP.NET, что обеспечивает высокую производительность и кроссплатформенность [1]. Клиентская часть разработана с использованием фреймворка Angular, благодаря чему удалось создать удобный и понятный пользовательский интерфейс. Важной особенностью является использование микросервисной архитектуры, при которой система разделена на независимые компоненты, взаимодействующие через API. Такой подход делает систему более гибкой, устойчивой и удобной для масштабирования [2].

Для организации взаимодействия между сервисами используются как синхронные протоколы (REST, gRPC), так и асинхронные механизмы обмена сообщениями через брокер сообщений, что позволяет эффективно справляться с высокой нагрузкой. Контейнеризация с использованием Docker и Docker Compose упростила процесс развертывания и сопровождения системы. Дополнительно применяются инструменты логирования, мониторинга и тестирования, что положительно сказывается на надёжности программного продукта.

В результате разработанная система представляет собой технологически современное решение для автоматизации процессов фриланс-платформы. Она сочетает широкий функционал, удобство для пользователя и использование актуальных технологий, что делает её востребованной и конкурентоспособной на рынке цифровых услуг.

Список использованных источников:

1. ASP.NET Core. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://dotnet.microsoft.com/en-us/apps/aspnet.

2. Микросервисная архитектура. –Режим доступа : https://www.atlassian.com/ru/microservices/microservices-architecture.

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИРОВАННЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Красёв П.А, студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Калугина М.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе приведены результаты исследования возможности автоматической генерации рекомендаций на основе показателей системы управления проектами с использованием дообученной языковой модели. Модель интерпретирует входные количественные метрики и выявляет узкие места процесса. Оценка качества генерации производится с помощью стандартных NLP-метрик (Perplexity, BLEU, ROUGE-L, BERTScore) для анализа связности и семантической точности, а также специальных предметных показателей: оценки релевантности анализа и индекса практической выполнимости предложенных шагов по улучшению.

Современные процессы разработки программного обеспечения характеризуются высокой динамикой и сложностью взаимодействия участников, что предъявляет повышенные требования к средствам мониторинга и проектного управления. Эти системы аккумулируют значительные массивы данных о ходе работ, однако эффективность использования этой информации напрямую зависит от качества её интерпретации. Особую значимость приобретает задача трансформации сырых количественных данных в качественные управленческие решения.

Актуальность исследования обусловлена проблемой когнитивной нагрузки на руководителей проектов при анализе метрик эффективности. Существующие инструменты визуализации предоставляют статистические показатели (время выполнения, пропускная способность), но не объясняют причинно-следственные связи возникновения «узких мест». Выявление скрытых паттернов в рабочих процессах и формулирование стратегии их оптимизации зачастую остаются субъективными задачами, зависящими от экспертного опыта конкретного менеджера, что затрудняет масштабирование эффективных практик.

В связи с этим перспективным направлением является внедрение методов машинного обучения для автоматизации аудита процессов разработки. Применение больших языковых моделей, адаптированных под предметную область, позволяет не только фиксировать отклонения показателей, но и генерировать интерпретируемые рекомендации по их устранению. Подобные системы способны обеспечить объективную оценку состояния команды и предложить конкретные шаги по улучшению на основе исторического контекста.

В данной статье приведены результаты работы, идея которой заключается в исследовании метода автоматической генерации аналитических отчетов в системе управления проектами. В основе подхода, разработанного для решения этой задачи, лежит преобразование вычисляемых метрик процесса в текстовое описание проблем и рекомендаций с использованием предварительно дообученной языковой модели.

Анализ эффективности работы команды в исследовании строится на базе объективных метрик потока задач. Ключевыми показателями выступают время цикла (интервал от начала работы до ее завершения), пропускная способность системы и плотность распределения задач по этапам жизненного цикла. Агрегация данных показателей позволяет сформировать вектор состояния проекта, который служит входными данными для алгоритмов машинного обучения [1].

В качестве инструмента генерации рекомендаций используются модели на архитектуре transformer, применяющие механизм self-attention для выявления сложных зависимостей в данных. Процесс дообучения модели представляет собой направленную корректировку весов нейронной сети на специализированном наборе данных, содержащем пары «метрики – экспертный анализ». Это позволяет адаптировать модель к специфической терминологии управления проектами и повысить семантическую точность генерируемых гипотез и планов действий [2].

В рамках исследования была реализована программная система автоматизированного анализа эффективности команд на базе больших языковых моделей. Процесс разработки включал подготовку специализированного датасета и дообучение модели с использованием методов эффективной настройки параметров.

На первом этапе формировался структурированный набор данных, состоящий из пар «вход-выход». В качестве входных векторов использовались сериализованные структуры, содержащие количественные показатели процесса разработки. Целевой переменной выступал экспертный текстовый анализ, включающий идентификацию проблемных зон и рекомендации по их устранению. Для обеспечения репрезентативности выборки применялся метод синтетической генерации примеров с последующей верификацией на реальных анонимизированных данных системы управления проектами.

Для оптимизации вычислительных ресурсов в работе применялся метод низкоранговой адаптации (LoRA). Суть данного подхода заключается в фиксации весов предварительно обученной модели и внедрении обучаемых матриц низкого ранга в слои механизма внимания. Это позволяет существенно сократить количество обучаемых параметров без потери качества генерации. Дополнительно использовалась техника квантования (QLoRA), обеспечивающая сжатие весов модели до 4-битного представления, что дает возможность проводить обучение на стандартном оборудовании при сохранении точности вычислений [3].

Для экспериментальной проверки были отобраны тестовые наборы метрик, соответствующие различным сценариям работы команды: стабильный поток, авральный режим, стагнация процессов. Каждый набор последовательно обрабатывался двумя методами:

1 Базовая модель. Генерация текста на основе исходных весов с использованием подробной системной инструкции (без изменения параметров сети).

2 Адаптированная модель. Генерация с использованием весов, прошедших процедуру дообучения на предметном датасете.

Оценка качества производилась путем сравнения сгенерированных отчетов с эталонными экспертными заключениями по ряду критериев: оценка запутанности модели (метрика Perplexity), лексическое совпадение (метрика ROUGE-L), семантическая близость (метрика BERTScore), а также специализированные индексы релевантности и практической применимости рекомендаций [4].

Ниже представлена таблица с результатами работы моделей на тестовой выборке.

Таблица 1 – Сравнительный анализ эффективности базовой и адаптированной моделей

Критерий оценки	Результат базовой модели	Результат адаптированной модели	Относительный прирост качества, %
Запутанность модели	8.42	4.15	50.7
Лексическое совпадение	0.28	0.54	92.8
Семантическая близость	0.68	0.89	30.8
Индекс релевантности	0.55	0.92	67.2
Индекс практической применимости	1.2	3.8	216

Вследствие проведения эксперимента были получены результаты, подтверждающие необходимость специализации моделей для задач проектного управления. На стандартных задачах интерпретации текста базовая модель демонстрирует приемлемый уровень грамотности, однако показывает низкую эффективность в части предметного анализа метрик эффективности.

Адаптированная модель, напротив, продемонстрировала существенное снижение значения запутанности (с 8.42 до 4.15) и рост семантической близости к эталону. Это означает, что внедрение обученных матриц низкого ранга позволило нейросети корректно усвоить контекст разработки ПО и специфику командной работы. Наиболее значимый результат для целей исследования зафиксирован в метрике индекса практической применимости: система перешла от генерации абстрактных советов к формулированию конкретных, прикладных шагов по устранению «узких мест» (рост с 1.2 до 3.8 рекомендаций на отчет), что является критически важным для реального повышения эффективности команды.

Проведенное исследование подтвердило, что применение методов низкоранговой адаптации является эффективным инструментом для решения задач узкоспециализированной аналитики в управлении проектами. Установлено, что базовая модель склонна к генерации поверхностных суждений, не учитывающих скрытые корреляции между показателями, в то время как дообученная модель корректно интерпретирует сложные зависимости и контекст задач. Однако стоит заметить, что качество работы системы имеет прямую зависимость от репрезентативности обучающей выборки: в случаях возникновения аномальных значений метрик, не представленных в датасете, модель может демонстрировать снижение точности прогноза.

Список использованных источников:

1. A Survey of Large Language Models [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/2303.18223 – Дата доступа: 25.02.2026

2. Transformers [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/8.pdf – Дата доступа: 25.02.2026

3. Delta Tuning [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/2203.06904 – Дата доступа: 25.02.2026

4. Evaluation of Text Generation [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/2006.14799 – Дата доступа: 25.02.2026

СКВОЗНОЙ БЕНЧМАРКИНГ ML-СТЕКА: ОТ PYTHON-БЭКЕНДА ДО JS-ФРОНТЕНДА В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Бурчук Д.А., Ясев А.И., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Жвакина А.В. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В работе рассмотрен сквозной бенчмаркинг производительности стека технологий для задачи классификации изображений, охватывающий этапы от инференса моделей на бэкенде до отображения результатов на веб-клиенте. Анализируются подходы к развертыванию как собственных моделей на фреймворках PyTorch и TensorFlow, так и готовых решений с использованием специализированных рантаймов. Рассматриваются следующие методы оптимизации серверной логики Python-бэкенда: асинхронность, батчинг, кэширование. В качестве методов оптимизации клиентской части на JavaScript рассматриваются работа с Canvas API, веб-воркерами, управление событиями. Цель работы – выявление узких мест и формулировка практических рекомендаций для построения высокопроизводительных ML-веб-приложений.

При выборе фреймворка для инференса кастомных нейросетевых архитектур ключевым фактором становится не только удобство разработки, но и эффективность исполнения. Исследование, сравнивающее PyTorch, TensorFlow и прочие фреймворки, демонстрирует, что нативные оптимизации и компиляция графа вычислений могут давать значительный прирост [1]. TensorFlow, с его статическим графом по умолчанию, исторически имел преимущество в продакшн-среде, однако PyTorch с режимом torch.jit.trace или torch.compile сокращает этот разрыв. Критически важным является использование аппаратных ускорителей, таких как CUDA и MPS, и высокоуровневых библиотек, таких как cuDNN либо OneDNN, что на порядки ускоряет операции линейной алгебры. Бенчмарки показывают, что разница в скорости инференса между фреймворками для одной и той же модели может достигать 15-30% в зависимости от типа операций и размера батча.

Использование готовых, предобученных моделей из репозиториев, среди которых самые популярные на данный момент – Hugging Face и TIMM, или облачных ML-сервисов заменяет задачу тренировки собственных моделей на задачу эффективного обслуживания готовых. Форматы ONNX и TensorRT кратно упрощают процесс кроссплатформенного развертывания, позволяя проводить аппаратно-зависимые оптимизации. ONNX Runtime предоставляет провайдеры для выполнения на CPU, GPU и специализированных процессорах, демонстрируя в ряде задач превосходство над нативными фреймворками за счет агрессивного фьюзинга операций и использования квантизации [2]. Для моделей из TensorFlow Serving эффективность упирается в настройку батчинга на уровне сервера и использование протокольной буферизации для сериализации вместо JSON.

Оптимизация серверной логики на Python-бэкенде с использованием современных фреймворков, таких как FastAPI и Django, требует решения проблем GIL и ввода-вывода. Выделение инференса в отдельный микросервис или использование многопроцессной модели позволяет изолировать блокирующие вычисления. Применение асинхронного кода эффективно для задач ввода-вывода, но не для исполняемых на центральном процессоре операций инференса. Реализация пула запросов для накопления и пакетной обработки входящих изображений от разных клиентов значительно повышает утилизацию GPU. Кэширование результатов предобработки изображений и часто запрашиваемых классификаций в Redis/Memcached снижает нагрузку на модель. В качестве дополнительного средства оптимизации также используется профилирование. Использование инструментов профилирования cProfile и Py-Spy позволяет выявить критические секции, такие как затратная декодировка изображений или излишнее копирование тензоров.

На клиентской стороне (в частности при использовании JavaScript) основная нагрузка связана с загрузкой и предобработкой изображений. Вынесение ресурсоемких задач, таких как предварительная нормализация и изменение размерности изображения, в Web Worker предотвращает блокировку интерфейса. Использование WebGL через библиотеки наподобие TensorFlow.js для выполнения части препроцессинга или даже легких моделей непосредственно в браузере разгружает сервер. Оптимизация обработки событий через троттлинг и дебаунсинг для таких действий, как загрузка файлов или изменение параметров классификации, снижает количество бесполезных запросов. Ленивая загрузка тяжелых JS-модулей и использование современных форматов изображений (таких как WebP) уменьшают время первой загрузки приложения.

Сквозной анализ показывает, что максимальная производительность достигается только при согласованной оптимизации всех компонентов стека. Низкая задержка обеспечивается эффективным инференсом на сервере и минимальным временем передачи данных, что требует выбора оптимального формата сериализации (Protobuf, MessagePack, Base64 JSON). Высокая пропускная способность достигается за счет батчинга на сервере и эффективного управления очередями на клиенте.

Бенчмаркинг должен проводиться на репрезентативных данных и с учетом реальных сценариев использования, а не только на изолированных метриках скорости инференса модели.

Список использованных источников:

1. *A Comparative Survey of PyTorch vs TensorFlow for Deep Learning: Usability, Performance, and Deployment Trade-offs [Electronic resource]. – Mode of access: https://arxiv.org/html/2508.04035v1. – Date of access: 26.12.2025.*

2. Selective Quantization Tuning for ONNX Models *[Electronic resource]. – Mode of access: https://arxiv.org/html/2507.12196v1. – Date of access: 29.12.2025.*

СЕКЦИЯ 4

«ВСТРАИВАЕМЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ»

УДК 004.934.2+534.784

ПРИМЕНЕНИЕ LSTM МОДЕЛЕЙ С МЕХАНИЗМОМ ВНИМАНИЯ И ОСТАТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ ДЛЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ЭМОЦИЙ В РЕЧИ

Краснопрошин Д.В., аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Вашкевич М.И. – д-р. техн. наук, доцент

Аннотация. Экспериментально исследуется возможность применения LSTM с механизмом внимания и остаточными связями для классификации эмоций в речи. В качестве исходных речевых признаков использовались мелчастотные кепстральные коэффициенты и хромограммы. Наилучший результат классификации показала ResLSTM-SA-сеть со скрытой размерность в 128 нейронов, продемонстрировав значением метрики точности UAR=56.4%. Также предложены варианты улучшения модели, которые, гипотетически могут улучшить качество распознавания.

Ключевые слова. Нейронные сети, глубокое обучение, распознавание эмоций в речи, рекуррентные нейронные сети, обработка речевого сигнала.

Введение. Классификация эмоций по речевому сигналу является не до конца нерешенной актуальной задачей в области обработки естественного языка. Существуют различные подходы и методы решения данной задачи, основанные, как на классических алгоритмах машинного обучения (статистические методы), так и на нейросетевых моделях. Одним из таких методов является использование рекуррентных нейронных сетей (РНС) с долгосрочной краткосрочной памятью (LSTM), которые эффективны при работе с временными рядами данных, коими и являются аудио записи. В этой работе мы экспериментально исследуем возможность применения LSTM с механизимом внимания и остаточными связями для задачи распознавания эмоций в речи с использованием датасета IEMOCAP (Interactive emotional dyadic motion capture database (Интерактивная база данных для захвата эмоциональных диадических движений)) [1].

Извлечение признаков. В данной работе анализ речевых характеристик базировался на использовании мел-частотных кепстральных коэффициентов (МЧКК) [2]. Процесс вычисления МЧКК относится к методам кратковременного анализа речевого сигнала. Для улучшения разделительных свойст были также использованы хромограммы. Извлечение хромограмм - это метод представления звука в обработке аудио, который переносит весь частотный спектр в 12 контейнеров (bin), соответствующих 12 полутонам музыкальной октавы. Этот метод отбрасывает информацию об октаве, фокусируясь исключительно на гармоническом содержании (высоте тона), что делает его устойчивым к изменениям тембра и инструментовки [3]. В финальный набор речевых признаков включались нормализованные коэффициенты МЧКК (34 признака) и хромограммы (12 признаков).

Разработка модели классификации на основе LSTM. В данном исследовании были разработаны и оценены классификаторы эмоций в речи на основе LSTM с механизмом внимания, представленной в [4].

Стоит отметить, что одним из основных недостатков классической LSTM модели является то, что ее внутренняя структура не предполагает механизма приоритизации отдельных элементов временного контекста.

Для того, чтобы решить данную проблему авторами была предложена модификация путем внедрения механизма мягкого внимания. Его добавление позволяет модели вычислять веса «важности» для различных временных шагов, что способствует получению более информативного выходного вектора признаков, на основании которого выполняется классификация эмоции [4].

В данной работе мы предлагаем модификацию архитектуры LSTM с механизмом мягкого внимания путем включения дополнительного слоя LSTM с остаточными связями. Этот слой обогащает временное представление входных признаков до их обработки основным LSTM на основе механизма внимания, тем самым повышая способность модели улавливать долгосрочные зависимости. Более того, для повышения информативности признакового пространства были также использованы хромограммы, которые отсутствуют в оригинальной работе [4].

Схема предлагаемой архитектуры показана на рисунке. 1.

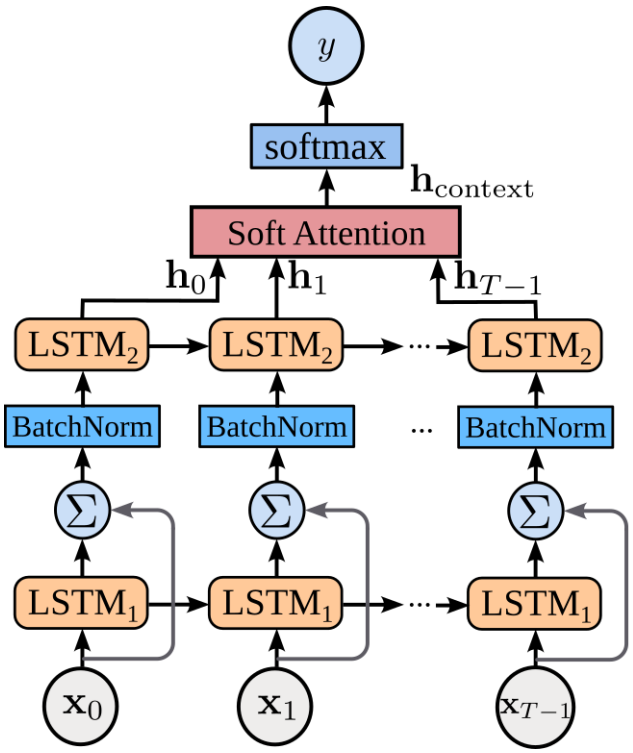


Рисунок 1 – Схематическое представление LSTM с механизмом мягкого внимания и остаточными связями

Отличительной особенностью предлагаемой архитектуры является то, что размерность скрытого состояния первого слоя LSTM соответствует размерности входных признаков (d = 46). Такая конструкция обеспечивает остаточные связи, которые позволяют модели обогащать входную последовательность контекстной информацией, сохраняя при этом исходную структуру признаков.

Остаточные связи, благодаря согласованности своей размерности с размерностью входных данных в первом слое LSTM, позволяют аддитивно объединять исходные признаки с их контекстно обогащенными аналогами. Это сохраняет исходную информацию, позволяя при этом основанной на механизме внимания LSTM сосредоточиться исключительно на извлечении эмоциональных паттернов более высокого порядка.

Оценка классификатора. Для оценки качества классификатора использовалось среднее арифметическое (невзвешенное) полноты (unweighted average recall, UAR). UAR – это показатель, используемый для измерения общей производительности модели многоклассовой классификации, вычисляет средний уровень распознавания по всем классам, придавая каждому классу одинаковый вес. Значение UAR находится в диапазоне от 0 до 1. Для более объективной оценки также использовался метод перекрестной проверки по k-блокам (k-fold cross-validation). Это было реализовано с помощью протокола Leave-One-Session-Out (LOSO). LOSO- это широко используемый, строгий протокол перекрестной проверки для оценки моделей распознавания эмоций в речи на наборе данных IEMOCAP, гарантирующий тестирование модели на дикторах, с которыми она никогда не сталкивалась во время обучения.

Описание эксперимента. Одной из ключевых гипотез данного исследования является влияние размерности скрытого состояния LSTM на итоговую точность классификации. Для проверки гипотезы использовалась предложенная архитектура сети с разным числом скрытых нейронов. После чего анализировалось, как изменения в структуре модели влияет на результаты классификации.

Для инициализации весов и смещений нейронной сети был применен метод Ксавье (начальная установка весов нейронной сети, который сохраняет дисперсию сигналов на входе и выходе слоя, способствуя стабильному и быстрому обучению). В дополнение к этому была применена ортогональная инициализация. Это способ задания начальных весов LSTM, при котором матрица весов формируется как ортогональная, что помогает сохранить стабильность градиентов.

Результаты экспериментов. В результате обучения моделей получены классификаторы, точность предсказаний которых при использовании тестового набора данных и вышеуказанной метрики качества достигала 56.40%.

В таблице 1 представлены результаты классификации для различных конфигураций модели (число и размер скрытых слоев).

Таблица 1 – Результаты классификации для различных вариантов LSTM с механизмом мягкого внимания

Название	Число скрытых нейронов	Число параметров (данные с последнего слоя)	UAR, последний скрытый слой, %
ResLSTM-SA-h32	32	28 000	54,6
ResLSTM-SA-h32	64	46 800	55,3
ResLSTM-A-h128	128	108 900	**56,40**

Из результатов, описанных в таблице 1 можно заключить, что по мере усложнения архитектуры LSTM (добавления числа скрытых слоев) точность классификации увеличивается.

Вывод. В работе показано, что LSTM с механизмом мягкого внимания и остаточными связями могут использоваться для решения задач распознавания эмоций в речи. Также экспериментально доказана важность правильной инициализации весов и смещений, а также конфигурации гиперпараметров (размерность скрытого состояния). Выполнена проверка гипотезы о влиянии размерности скрытого состояния на производительность модели. В дальнейшем предлагается попробовать усилить предложенную архитектуру сети с помощью помощью использования большего числа векторов внимания, а также поиска других оптимальных гиперпараметров (скорость обучения, коэффициент затухания весов, размер батча и др). Увеличение количества векторов внимания и нахождение оптимальных гиперпараметров модели предположительно может позволить модели сфокусироваться на наиболее информативных фрагментах временной последовательности и тем самым повысить точность распознавания. Более того, планируется предобучить предложенную модель на более простых датасетах, таких как TESS и RAVDESS, что по задумке авторов, может существенно улучшить качества финального классификатора.

Список использованных источников:

1. Busso, C.; Bulut, M.; Lee, C.-C.; Kazemzadeh, A.; Mower, E.; Kim, S.; Chang, J. N.; Lee, S. & Narayanan, S. S. (2008), 'IEMOCAP: interactive emotional dyadic motion capture database.', Language Resources and Evaluation 42 (4), 335-359.

2. Краснопрошин Д. В., Вашкевич М. И. Метод распознавания эмоций в речевом сигнале с использованием машины опорных векторов и надсегментных акустических признаков // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22. – №. 3. – С. 93-100.

3. D. P. Ellis, "Chroma feature analysis and synthesis," Online Resource, 2007. [Online]. Available: https://www.ee.columbia.edu/ dpwe/resources/matlab/chroma- ansyn/

4. Mirsamadi S., Barsoum E., Zhang C. Automatic speech emotion recognition using recurrent neural networks with local attention. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), New Orleans, LA, USA, 05–09 March 2017. New Orleans, 2017, pp. 2227–2231.

UDC 004.934.2+534.784

APPLICATION OF LSTM MODELS WITH ATTENTION MECHANISM AND RESIDUAL CONNECTIONS FOR SPEECH EMOTION RECOGNITION TASKS

Krasnoproshin D.V. graduate student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Vashkevich M.I. – Dr.Sc.

Annotation. The feasibility of using an LSTM model with an attention mechanism and residual connections for classifying emotions in speech is experimentally investigated. Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs) and chroma features were used as initial speech features. The ResLSTM-SA network with a hidden size of 128 neurons demonstrated the best result, yielding UAR metric = 56.4%. Model enhancements that could potentially improve performance are also proposed.

Keywords. Neural networks, deep learning, speech emotion recognition, recurrent neural networks, speech signal processing.

УДК 004.032.26

АЛГОРИТМ МИНИМИЗАЦИИ АРТЕФАКТОВ В МНОГОМЕРНЫХ GAN-АРХИТЕКТУРАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИТЕРАТИВНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБОРОК

Ковбаса Г.А., аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Азаров И.С. – д-р. техн. наук, профессор

Аннотация. Данная работа посвещена алгоритму, решающему проблему дистрибутивной точности в многоуровневых GAN. Алгоритм базируется на циклическом механизме адаптивного вероятностного сэмплирования (AIS) и системе межуровневой обратной связи (Feedback GAI) для динамической коррекции градиентного поля. В отличие от традиционных подходов, AIS интегрируется непосредственно в тренировочный цикл для динамической коррекции градиентного поля через аппроксимацию плотности данных (Density Ratio Estimation). Экспериментальные данные показали превосходство над другими многоуровневыми архитектурами GAN и адаптированными архитектурами (U-Net + GAI), увеличив логарифмическое правдоподобие на 22%.

Ключевые слова. Генеративно-состязательные сети, адаптивное вероятностное сэмплирование (AIS), Feedback GAI, аппроксимация плотности данных (Density Ratio Estimation).

В области глубокого генеративного моделирования ключевой задачей остается достижение высокой точности воспроизведения сложных морфологических структур данных при сохранении статистической устойчивости процесса обучения. Традиционные методы минимизации дивергенций зачастую фокусируются на поверхностных визуальных признаках, игнорируя глубинные топологические свойства целевого распределения [1].

Целью настоящей работы является формализация и реализация алгоритма, который за счет взвешенного градиентного спуска позволяет генератору игнорировать зоны «псевдореализма» и фокусироваться на восстановлении инвариантных морфологических структур [2]. Такой подход обеспечивает теоретически обоснованную сходимость к истинному распределению данных в условиях ограниченности выборки и высокой сложности целевой топологии.

Для преодоления этих ограничений мы перешли к парадигме имитационного обучения (GAI), рассматривая генератор как агента, адаптирующего текущие условия обучения сети в соответсвии с показателями оценки распределения данных [2]. Однако для обеспечения истинной дистрибутивной точности потребовался переход от простой имитации к статистическому выравниванию многообразий на каждом шаге итерации с учетом AIS [3].

Таким образом, алгоритм минимизации артефактов в многомерных GAN-архитектурах с применением итеративного регулируемого распределения выборок можно описать как последовательные итерации со следующими действиями:

1. Этап инициализации и дискриминации:
   - Обучение сети дискриминатора.
   - Вычисление density ratio estimation: на основе выхода сигмоиды дискриминатора будет получено отношение плотностей распределения реальных данных к плотности распределения данных с текущих выходов, называемое r(x) .
2. Формирование энергетического суррогата:
   - Вместо сложного вычисления якобиана (который требует много ресурсов), вводится функция энергии, энергетический суррогат, то есть функциональное представление отношения плотностей, описанных на предыдущем шаге.
3. Работа с proposal distribution:
   - Цикл обновления: каждые k = 10 итераций производится обновление параметров proposal distribution q(z), вспомогательного распределения, которое используется для аппроксимации целевого (истинного) распределения.
   - Взвешенная выборка: используются текущие веса для корректировки параметров для соответсвия областям с высокой плотностью реальных данных [4].
4. Расчет Importance Weights:
   - Производится расчет весов для каждого сгенерированного батча.
5. Градиентное обновление генератора. Процедура расчета градиента принимает на вход три ключевых компонента:
   - Латентные векторы.
   - Энергетические оценки. Значения логитов, полученные от дискриминатора для текущего батча сгенерированных образов.

- Логарифм плотности proposal distribution.

Рассмотрим упомянутые выше процедуры алгоритма с точки зрения регуляции распределений.

Density Ratio Estimation (DRE):

Использование отношения плотностей вместо простых бинарных меток — это переход от классификации к байесовскому выводу. Формула математически выводится из оптимального дискриминатора и позволяет напрямую оценивать расхождение между распределениями через f-дивергенции.

Энергетический суррогат:

Под данным термином мы понимаем замену Якобиана функцией энергии благодаря чему оценка AIS получает более структурированную информацию, так как энергия E(x) отражает не просто шум, а иерархическое соответствие морфологии, что делает оценку отношения плотностей более стабильной.

Вычисление логарифма детерминанта Якобиана требует кубическую сложность для полных матриц, в то время как скалярная функция энергии дифференцируется за O(n), что делает алгоритм масштабируемым для глубоких сетей.

Annealed Importance Sampling:

Метод Annealed Importance Sampling считается «золотым стандартом» для оценки логарифма правдоподобия в моделях с ненормированной плотностью (энергетических моделях) [5]. Введение весов w(x) корректирует смещение выборки, что гарантирует сходимость к истинному распределению. Процесс последовательного приближения в методе AIS требует определения оптимального графика изменения параметра связи [5].

Вместо тривиального линейного приращения рекомендуется использовать нелинейные последовательности (например, геометрические). Математическое обоснование заключается в том, что в зонах высокого расхождения между предлагающим и целевым распределениями требуется более дискретное и детальное описание промежуточных состояний [6]. Слишком резкое изменение параметра ведет к резкому росту дисперсии Importance Weights: статистическая значимость концентрируется в единичных выборках, что обесценивает вклад остального набора данных и дестабилизирует оценку градиента.

Так как данное решение реализовано при помощи Python с применением PyTorch необходимо учесть следующие особенности реализации, обусловленные как итерационным подходом [7], так и выбора средств реализации.

В классических состязательных моделях дискриминатор функционирует как вероятностный классификатор. Однако для корректного вычисления отношения плотностей p(z) целесообразно использовать значения функции до применения нелинейного сжимающего преобразования (сигмоиды) [6]. Это позволяет оперировать в пространстве логитов, что математически эквивалентно логарифму отношения вероятностей.

Такой подход обеспечивает вычислительную стабильность: исключается риск деления на исчезающе малые величины и предотвращается насыщение градиента, когда модель достигает высокой степени уверенности в классификации. Энергия в данном контексте становится линейной мерой правдоподобия, обеспечивая более плавную траекторию сходимости.

Регулярное обновление параметров proposal distribution через каждые K итераций является ключевым механизмом используемым для имплементации адаптивного сэмплирования. Параметр K определяет баланс между актуальностью модели и её устойчивостью к локальным флуктуациям.

Для предотвращения стохастических осцилляций целесообразно применять метод экспоненциального сглаживания параметров. Это создает необходимую инерцию в обучении: морфологический фокус системы смещается плавно, позволяя генератору последовательно осваивать сложные структурные признаки, не теряя при этом ранее полученную информацию о глобальной топологии данных [8,9].

В качестве экспериментальных данных представлены следующие модели для сравнительных оценок:

Архитектуры моделей для сравнения:

1. Базовый GAN: DCGAN [8,9].
2. HA-GAN [10].
3. U-Net GAI: модифицированная версия U-Net GAN с учетом имитационного обучения [11].

Предлагаемая модель:

1. Техническое описание параметров нейросетевой архитектуры.
2. Глубина генератора: 9 слоев.
3. Глубина дискриминатора: 10 слоев.
4. Размерность латентного пространства: 256.
5. Адаптивная смесь Gaussian Mixture Model (GMM).
6. Параметры AIS: 20 промежуточных итераций в рамках одного цикла отжига, выполняемого с периодичностью в 10 шагов градиентного обновления.

7. Размер микро-батча (выборки): 16.
8. Количество итераций обучения: 1,1 млн итераций.

Таблица 1 – Сравнительные показатели тестирования моделей

№п/п	Метод	FID ↓	Log-Likelihood (AIS) ↑
1	Базовый GAN	32.5	-482.1
2	HA-GAN	21.3	-395.4
3	U-Net GAI	18.8	-385.1
4	Адаптированная модель с предлагаемым алгоритмом	11.6	-297.4

Таким образом был разработан алгоритм циклической интеграции AIS через Density Ratio Estimation, основным преимуществом которого является минимизация потери многобразия распределения признаков в выходных данных, что снижает риски появления артефактов коллапса мод в итоговом распределении. Разработанный подход рекомендуется для построения систем генерации изображений высокой точности и проектирования цифровых двойников сложных технических объектов.

Список использованных источников:

1. Intriguing Properties of Modern GANs [Электронный ресурс] // arXiv. – Режим доступа: arxiv.org. – Дата доступа: 01.03.2026.

2. Generative Adversarial Imitation Learning [Электронный ресурс] // Emergent Mind. – Режим доступа: emergentmind.com. – Дата доступа: 01.03.2026.

3. Adaptive importance sampling via auto-regressive generative models and Gaussian processes [Электронный ресурс] / L. Zhang [et al.] // PMC. – Режим доступа: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8475780/. – Дата доступа: 01.03.2026.

4. LayerSync: Self-aligning Intermediate Layers [Электронный ресурс] // arXiv. – Режим доступа: arxiv.org. – Дата доступа: 01.03.2026.

5. Adaptive Importance Sampling and Quasi-Monte Carlo Methods for 6G URLLC Systems [Электронный ресурс] // ResearchGate. – Режим доступа: researchgate.net. – Дата доступа: 01.03.2026.

6. Pseudo–Contrast-enhanced US via Enhanced Generative Adversarial Networks for Evaluating Tumor Ablation Efficacy [Электронный ресурс] // Radiology: Artificial Intelligence. – Режим доступа: rsna.org. – Дата доступа: 01.03.2026.

7. Choi, J. DPAIL: Training Diffusion Policy for Adversarial Imitation Learning without Policy Optimization [Электронный ресурс] / J. Choi // KAIST AIPR Lab. – Режим доступа: kaist.ac.kr. – Дата доступа: 01.03.2026.

8. Two-flow Feedback Multi-scale Progressive Generative Adversarial Network [Электронный ресурс] // arXiv. – Режим доступа: arxiv.org. – Дата доступа: 01.03.2026.

9. Collaborative-GAN: An Approach for Stabilizing the Training Process of Generative Adversarial Network [Электронный ресурс] // ResearchGate. – Режим доступа: researchgate.net. – Дата доступа: 01.03.2026.

10. Hierarchical Amortized GAN for 3D High Resolution Medical Image Synthesis [Электронный ресурс] // ResearchGate. – Режим доступа: researchgate.net. – Дата доступа: 01.03.2026.

11. Ковбаса, Г Learning to Synthesize: GAN Optimization with Imitation and Distribution Feedback/ Г. Ковбаса // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2025) : Proceedings of the 17th International Conference, Minsk, 16–18 Sept. 2025 / UIIP NASB ; [editorial board: V. I. Ivin (chair) et al.]. – Minsk : UIIP NASB, 2025. – P. [451-453].

UDC 004.032.26

ARTIFACT MINIMIZATION ALGORITHM IN MULTIDIMENSIONAL GAN ARCHITECTURES USING ITERATIVE REGULATED SAMPLE DISTRIBUTION

Kovbasa G.A., graduate student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Azarov E.S. – Doctor of Technical Sciences

Annotation. This paper presents an algorithm that addresses the problem of distributed accuracy in multilayer GANs. The algorithm is based on a cyclical adaptive probability sampling (AIS) mechanism and a cross-layer feedback system (GAI) for dynamic gradient field correction. Unlike traditional approaches, AIS is integrated directly into the dynamic gradient field correction workflow through density approximation (Density Ratio Estimation). Experimental data demonstrated superiority over other multilayer GAN architectures and adapted architectures (U-Net + GAI), increasing the log-likelihood by 22%.

Keywords. Generative adversarial networks, adaptive probability sampling (AIS), Feedback GAI, Density Ratio Estimation.

УДК 004.312.466

IP-КОМПОНЕНТ КОНВЕЙЕРНОГО УСКОРИТЕЛЯ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СНК СЕРИИ ZYNQ-7000

Осипов А.С., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Петровский Н.А. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье представлена архитектура IP-компонента, предназначенного для вычисления прямого распространения нейронных сетей произвольной структуры, включающих полносвязные и сверточные слои, а также слой подвыборки. Приведены результаты сравнительного анализа точности работы разработанного IP-компонента при различных уровнях квантования по сравнению с эталонной моделью, реализованной с использованием арифметики с плавающей точкой.

Ключевые слова. IP-компонент, сверточная нейронная сеть, аппаратная реализация, прямое распространение, квантование, FPGA

В работе рассматривается IP-ядро для аппаратной реализации вычислений в нейронных сетях прямого распространения с параметрической конфигурацией на этапе синтеза. Разработанный дизайн поддерживает вычисления в алгебре рациональных чисел и кватернионной алгебре [1], что позволяет проводить их сравнительный анализ на аппаратном уровне [2].

Конфигурация включает выбор формата данных (Q-нотация), настройку точности аккумулятора, параметров регистров и режима доступа. Архитектура сети задается последовательной записью параметров слоев в регистры CSR, что обеспечивает использование различных моделей в рамках одного ядра. Ядро поддерживает полносвязные, сверточные слои и слой подвыборки (pool-max), а также предусмотрены входной и выходной этапы обработки. Расширение функционала возможно за счет добавления подпроцессоров без изменения базовой архитектуры.

Базовой вычислительной операцией является умножение с последующим накоплением (MAC). Ядро включает управляющий и вычислительный модули: первый обеспечивает доступ к регистрам ядра через интерфейс AXI-Lite и формирует управляющие сигналы и адресацию по памяти, второй реализует операции умножения, max, функции активации и буферизацию с конвейерной обработкой. Конвейеризация повышает производительность и учитывает задержки доступа к памяти BRAM и DDR (данные доступны на следующий такт). Для согласования работы конвейера с внешней памятью используются вспомогательные интерфейсные блоки.

Интеграция в FPGA-систему выполняется через стандартные интерфейсы как показано на рисунке 1: AXI-Lite – доступ к параметрам ядра; AXI-Stream – потоковая передача данных посредством DMA; AXI3 – доступ к коэффициентам сети, расположенных в DDR памяти.

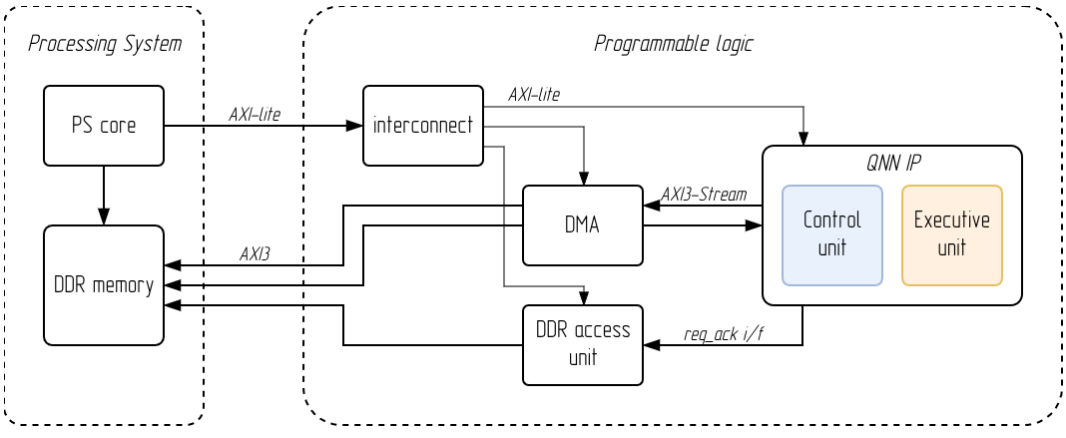


Рисунок 1 -- Структурная схема подключения ядра к процессорной системе FPGA

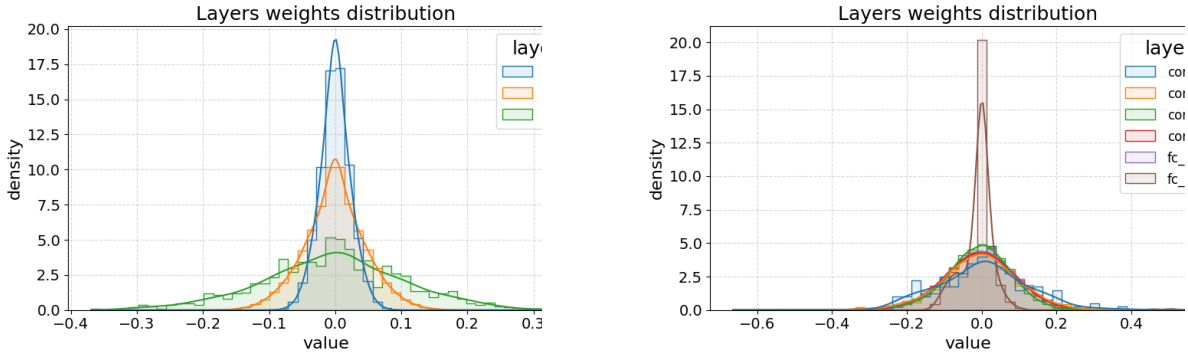
Экспериментальная проверка IP-компонента выполняется на задаче классификации с использованием набора данных CIFAR-10, состоящий из цветных изображений размером 32 на 32 пикселя. Для этих целей были обучены и квантованы в формат с фиксированной точкой две модели: полносвязная и гибридная с использованием сверточных, полносвязных и pool-max слоев [3].

[1] Работа выполнена в совместной учебной лаборатории БГУИР-YADRO
https://www.bsuir.by/ru/kaf-informatiki/yadro

В процессе обучения было принято решение отказаться от использования функции softmax на выходном слое ввиду сложности ее аппаратной реализации, что также повлияло на выбор функции потерь в пользу среднеквадратичной ошибки (MSE).

В ходе обучения моделей установлено, что при данном подходе коэффициенты нейронных сетей, решающих задачи классификации, не требуют дополнительной регуляризации, ограничивающей их отклонение от нулевых значений. Как следует из гистограмм распределения коэффициентов, представленных на рисунке 2, основная их масса сосредоточена вблизи нуля, что указывает на слабую степень использования части параметров. Исходя из этого можно сделать вывод, что наиболее предпочтительной функцией распределения коэффициентов является бимодальное с расположением локальных максимумов по обе стороны от нуля.

В то же время модели автоэнкодера [4] демонстрируют значительный разброс коэффициентов, что требует введения дополнительных штрафных условий при обучении.



а) б)

Рисунок 2 – Гистограмма плотности распределения коэффициентов моделей: а – полносвязная сеть; б – гибридная модели

В таблице 1 приведены расчетные и экспериментально полученные значения задержек прямого распространения для обеих моделей. Экспериментальная проверка была выполнена на FPGA-платформе Xilinx Zynq-7000.

Основной вклад в общую задержку вносят обращения к внешней DDR памяти: время отклика при чтении составляет порядка 15 тактов и определяется особенностями DDR-подсистемы. Снижение задержки возможно за счет использования burst-режима AXI3, обеспечивающего пакетное чтение до 16 слов, что позволит добиться суммарной задержки в 30 тактов на пакет или менее 2 тактов на слово.

На рисунке 3 представлена гистограмма сравнения точности работы полносвязной модели при различных уровнях квантования. Из графика видно, что при уменьшении количества разрядов менее девяти наблюдается лавинообразное снижение точности сети.

Разработанный IP-компонент демонстрирует возможность выполнения небольших нейронных сетей без использования затратных по аппаратным ресурсам нелинейных функций при сохранении достаточной точности, однако с необходимостью корректировки гиперпараметров при обучении. Анализ распределения коэффициентов показывает на неэффективное использование емкости представленных моделей и выделенной разрядной сетки, ввиду их близости к нулевому значению.

Дальнейшие исследования направлены на повышение эффективности квантованных моделей и более рациональное использование вычислительных ресурсов. Также IP-компонент может быть расширен за счет добавления новых типов слоев, например глубинно-разделимой свертки (depthwise separable convolution), которая позволяет снизить вычислительную сложность по сравнению с классическими сверточными слоями и более эффективно задействовать коэффициенты сети.

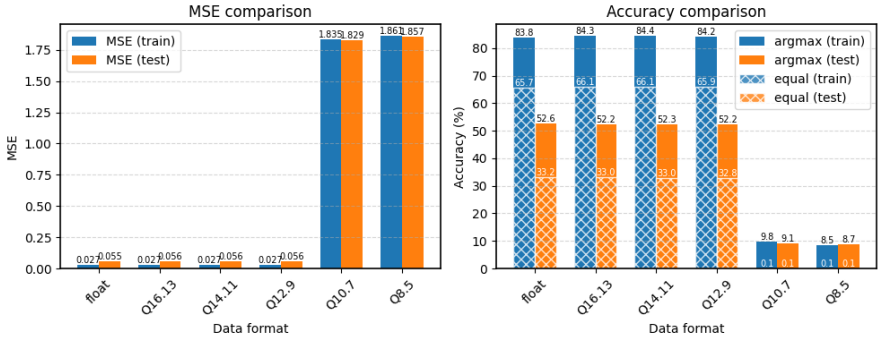


Рисунок 3 – Гистограмма ошибки и точности сети при различных уровнях квантования

Таблица 1 – Расчетные и экспериментально полученные значения задержки.

Метрики	Полносвязная модель	Гибридная модель
Количество параметров	279 043	488 979
Количество транзакций чтения AXI3	279 043	9 926 499
Количество принятых слов по интерфейсу AXI-Stream (slave)	1024	1024
Количество переданных слов по интерфейсу AXI-Stream (master)	3	3
Задержка чтения данных по интерфейсу AXI3 (сумм. / мин. / макс. / сред.), такты	4 419 890 / 15 / 74 / 15.84	156 860 568 / 15 / 79 / 15.80
Задержка приема AXI-Stream (сумм. / мин. / макс. / сред.), такты	1024 / 1 / 1 / 1	1024 / 1 / 1 / 1
Задержка передачи AXI-Stream (сумм. / мин. / макс. / сред.), такты	3 / 1 / 1 / 1	3 / 1 / 1 / 1
Расчетное время выполнения прямого распространения (f = 71,43 МГц), с	0.00392	0.14743
Фактическое время выполнения прямого распространения, с	0.07105	2.47556
Расчетная задержка, такты	280 074	10 531 119
Фактическая задержка, такты	4 420 917	156 876 059

Список использованных источников:

1. X. Zhu et al., “Quaternion convolutional neural networks,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019, pp. 9176–9184

2. Осипов А. С., Петровский Н. А. IP-компонент конвейерного ускорителя сверточных нейронных сетей для СНК серии Zynq-7000 // Информационные технологии и системы (ITS): материалы конференции. *— Минск: Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2025. — С. 149–150.*

3. Osipov, A., Petrovsky, N. FPGA Implementation of Quaternionic Fully Connected Neural Network for Image Classification // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP’2025): Proc. of the 17th Int. Conf., 16–18 Sept. 2025, Minsk, Belarus. – Minsk : UIIP NASB, 2025. – P. 230-234

4. N. A. Petrovsky and M. I. Vashkevich, “Quaternionic multilayer bottleneck autoencoder for color image compression,” in Proceedings of SPA’2024, Available at {nick.petrovsky, vashkevich}@bsuir.by, Poznan, Poland, 2024

UDC 004.312.466

IP CORE OF A PIPELINED CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK ACCELERATOR FOR ZYNQ-7000 SOCS.

Osipov A.S., master’s student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Petrovsky N.A. – PhD in Technical

Annotation. The article presents the architecture of an IP core designed to compute the forward propagation of neural networks with arbitrary structures, including fully connected and convolutional layers, as well as a subsampling layer. The results of a comparative analysis of the accuracy of the developed IP core at various quantization levels, compared with a reference model implemented using floating-point arithmetic, are also provided.

Keywords. IP core, convolutional neural network, hardware implementation, forward propagation, quantization, FPGA.

УДК 004.93'1

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ

Ерамкович В.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Вашкевич М.И. – д-р. техн. наук, профессор

Аннотация. В работе представлено проектирование автономной системы распознавания жестов на базе несложного устройства. При проектировании использовались готовые решение, а также методы доработки их. Использовался набор данных FreiHAND, детектор на базе MediaPipe, архитектура сверточной нейросети MobileNetV2 и метод опорных векторов. В работе показаны изображения данных, формулы подготовки значений для обучения, объяснения особенностей семейства MobileNe, таблица с параметрами MobileNetV2 и информация об построении метода опорных векторов.

Ключевые слова. Сверточные нейронные сети, машинное обучение, компьютерное зрение.

Введение. В современном мире технологии «Умного дома» и Интернета вещей (IoT) становятся неотъемлемой частью повседневной жизни. Основным вектором развития интерфейсов взаимодействия человека с вычислительными системами является переход от контактных методов (клавиатура, мышь, сенсорные экраны) к бесконтактным, естественным интерфейсам. Управление с помощью жестов является одним из наиболее интуитивных способов взаимодействия, так как оно повторяет естественную моторику человека.

Однако существующие решения часто требуют дорогостоящего оборудования (сенсоры, перчатки с датчиками) или обладают высокой вычислительной сложностью. Разработка эффективного программного модуля для распознавания жестов, который не требует большого количества ресурсов является актуальной задачей в наше время. Поэтому целью работы является разработка автономной системы распознавания жестов на базе несложного устройства.

Данные для обучения. Для проектирования автономной системы распознавания жестов на базе несложного устройства использовался набор FreiHAND [1]. Данный набор данных состоит из двух выборок, тренировочной (130240 изображений) и валидационной (3960 изображений). Каждое изображение имеет размер 224x224.

Выборка для тренировки моделей представлена из изображений на зеленом фоне, количество таких изображений 32560 и данное количество является основной выборкой, остальные изображения получились путем аугментации основной. На рисунке 1 представлены изображения рук на зеленом фоне.

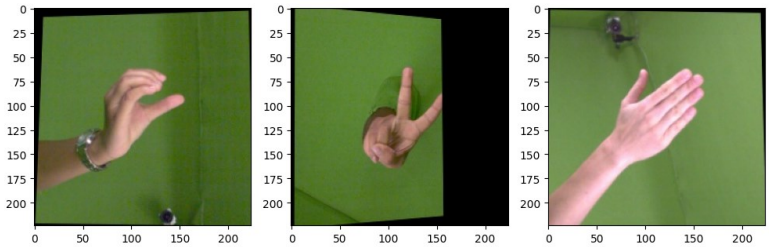


Рисунок 1 – Изображения рук на зеленом фоне и их черно-белое представление

Также в данном наборе есть данные для построения ключевых точек и скелета руки, что очень сильно помогает в реализации системы (рисунок 2)

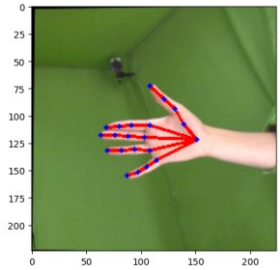


Рисунок 2 – Изображения рук на зеленом фоне и их черно-белое представление

Такие данные представлены в формате $[x, y, z]$, где x — значение по горизонтали, y — по вертикали и z отображает глубину (расстояние от камеры до руки), все эти изображения нормированы и принимают значения от 0 до 1 в метрах. Помимо этого, присутствуют данные, которые относятся к характеристикам камер, на которых происходили съемки всех изображений. Благодаря этому можно

сделать предобработку, чтобы привести значения к универсальному формату. Лучший формат — это привести все значения $[x, y, z]$, в $[u, v, z_{rel}]$ по формулам:

$$u = f_x \frac{x}{z} + c_x, \quad (1)$$

$$v = f_y \frac{y}{z} + c_y, \quad (2)$$

$$z_{rel}^i = z_{abs}^i - z_{abs}^0, \quad (3)$$

где f_x, f_y — фокусное расстояние объектива (в пикселях), c_x, c_y — координаты оптического центра (обычно центр картинки), z_{abs}^i — расстояние от камеры до сустава i, z_{abs}^0 — расстояние от камеры до запястья. Деление на z создает эффект перспективы: чем дальше объект (больше z), тем ближе его точки сходятся к центру и тем меньше он на экране.

Так как все изображения 224x224, то дополнительно проводится нормализация полученных u, v для отображения на изображении такого разрешения. Данная нормализация проводится по формулам:

$$u = \frac{u' - x_b}{S}, \quad (4)$$

$$v = \frac{v' - y_b}{S}, \quad (5)$$

где u', v' — полученные значения u, v по формулам 4.1 и 4.2, значения x_b, y_b — левый верхний угол рамки, найденной детектором (находит область руки), S — размер стороны квадрата детектора. Полученные значения находятся в диапазоне от 0 до 1.

Чтобы перенести такие значения на изображения нужно их привести к нужному разрешению по формулам:

$$x = uS + u_{min}, \quad (6)$$

$$y = vS + v_{min}, \quad (7)$$

где u_{min}, v_{min} — координаты левого верхнего угла этой рамки на исходном кадре.

Стоит отметить, что тренировочная выборка делилась для обучения и для тестирования, чтобы можно было проверять правильно ли, формируются ключевые точки и давать направление для улучшения.

В валидационной выборке расположены только изображения на разном фоне (рисунке 3). Также есть данные о характеристиках камер для приведения в нужный формат. Данные о ключевых точках для построения скелетов отсутствуют.

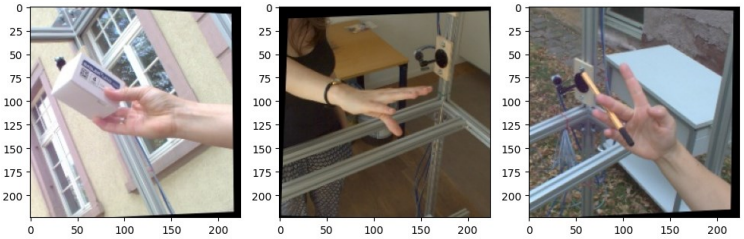


Рисунок 3 – Тестовая выборка изображений

Для обучения классификатора были отобраны 7 групп жестов. В таблице 1 представлена разметка классов и жестов для обучения. классификатора

Таблица 1 – Разметка классов и жестов

Номер класса жеста	Название жеста
0	Жест «Плохой» (большой + указательный палец)
1	Раскрытая ладонь
2	Жест «V» (указательный + средний палец)
3	Жест «Три» (большой + указательный + средний)
4	Большой палец вверх
5	Кулак
6	Указательный палец

Из всей тренировочной выборки были выбраны соответствующие жесты. На рисунке 4 показана диаграмма распределения по выбранным жестам, а также сколько пошло изображений на обучение и тестирование. Исходя из диаграммы мы видим, что присутствует неравномерное распределение по

классам. Из этого делаем вывод, что при обучении классификатора будет использоваться не метрика правильности, а F1-мера (macro). Используется такая метрика, так как она берет во внимание распределение по классам, а так как в полученном наборе есть неравномерное распределение, модель классификатора не будет отдавать предпочтение только тем классам, у которых больше всего значений, т.е. не будет переобучена.

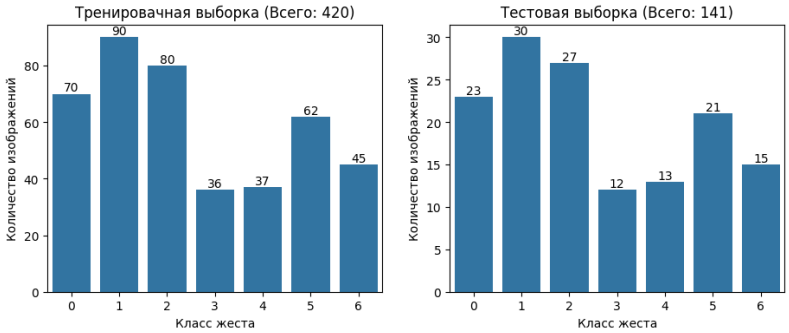


Рисунок 4 – Диаграммы распределения классов

Модели построения ключевых точек и классификатор. Детектирование области с рукой (ладонью) реализовывала уже готовая модель от MediaPipe, а именно MediaPipe Hands Detector [2]. Данная модель обучена определять область изображения с рукой и фиксировать ее. Зафиксированная область имеет разрешение 224x224.

Для формирования ключевых точек использовалась модель из семейства MobileNetV2 [3]. Есть два основополагающих блока в MobileNetV2 (MN блоки), где операции выполняются с одним шагом или с двумя. Блок с одним шагом представлен так:

1. Расширение исходного пространства сверткой с размером ядра 1x1 и активационной функцией ReLU6 (рисунок 6) [4]. Свертка выполняется для каждой карты признаков отдельно;
2. Глубинная свертка. Данная свертка делается ядром размером 3x3 и активационной функцией ReLU6, так же сворачивается каждая отдельная карта, а не все вместе;
3. Объединение карт признаков после глубинной свертки. Данный процессов происходит благодаря свертке ядром 1x1 с функцией ReLU6. При сверкте взаимодействуют все карты признаков вместе;
4. Выход (блок Add). На выходе складываются результаты, полученные с последнего блока (сворачивание пространства) и входные данные. Важное условие для отработки блока это соответствие размера карт и их количетсво. Формула для обработки блока выглядит так:

$$y = F(x) + x, \tag{8}$$

где $F(x)$ – результат прохождения данных через сверточные слои внутри блока, x — входные данные.

Блок с шагом два устроен точно также, но глубинная свертка выполняется с шагом два и ответствует блок Add.

На рисунке 5 представлены два MN блока.

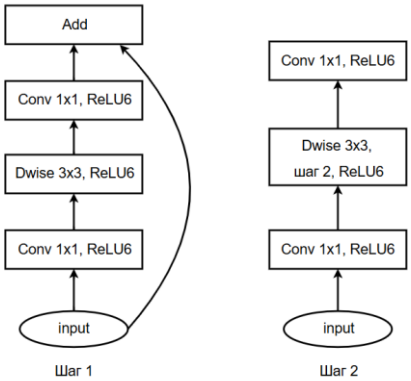
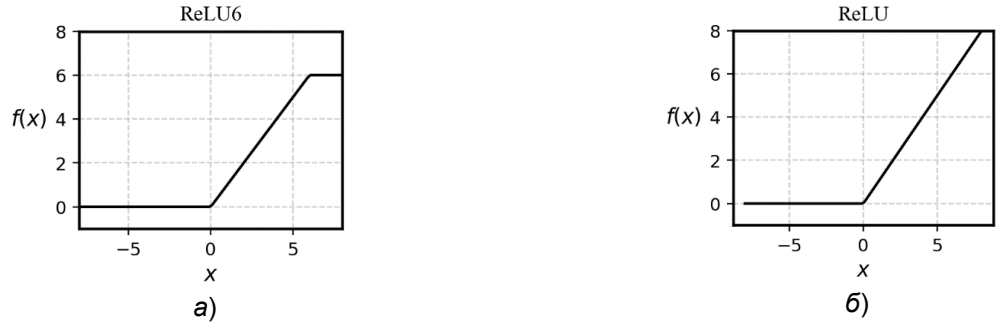


Рисунок 5 – MN блоки

Для лучшего обучения моделей используется механизм связи (Skip Connection). Этот механизм позволяет обходить сложные операции свертки при обратном распространении ошибки и обучать намного эффективнее.

Также есть слой обработки и остаточный блок., которые предназначены для обработки входного изображения и уточнения признаков. Структура такого блока такая же, как и у MN блока с шагом один. Механизма связи в. слое обработки нет, а в остаточный блок есть, что ускоряет обучение.

В нашей реализации выход исходной модели был изменен. На финальном этапе карты признаков вытягиваются в вектор и проходят через полносвязные слои с функцией ReLU (рисунок 6) [5]. После этих слоев получается 63 значения, которые отвечают за наши координаты ключевых точек. Данное решение называется регрессионной головой. Полученная архитектура MobileNetV2 состоит из 2.57 миллионов параметров и представлена в таблице 2:



а) *б*)

Рисунок 6 – Функции активации: а) ReLU6; б) ReLU [4-5]

Таблица 2 – Структура нейросети MobileNetV2

№	Название / Тип блока	Входная размерность	Выходная размерность	Коэффициент расширения	Шаг	Повторы
1	Слой обработки	224×224×3	112×112×32	-	2	1
2	Блок MN	112×112×32	112×112×16	1	1	1
3	MN + Остаточный блок	112×112×16	56×56×24	6	2	2
4	MN + Остаточный блок	56×56×24	28×28×32	6	2	3
5	MN + Остаточный блок	28×28×32	14×14×64	6	2	4
6	MN + Остаточный блок	14×14×64	14×14×96	6	1	3
7	MN + Остаточный блок	14×14×96	7×7×160	6	2	3
8	Блок MN	7×7×160	7×7×320	6	1	1
9	Слой объединения (свертка 1x1)	7×7×320	7×7×1280	-	1	1
10	Векторизация	7×7×1280	1×1×1280	-	-	1
11	Регрессионная голова	1×1280	63	-	-	1

В процессе обучения использовались данные с тренировочной выборки. Метрика при обучении использовалась средняя квадратическая ошибка (MSE), в качестве оптимизатора использовалась Adam [5], изначальная скорость обучения составляла 1×10^{-3}, но в процессе дообучения была уменьшена и состовляла 1×10^{-6}, планировщик скорости использовался ReduceLROnPlateau, который изменяет скорость обучения если ошибка перестала улучшаться (падать) [6]. По результатам обучения ошибка MSE составила 0.000724 (RMSE = 0.027) или 6 пикселов, что является хорошим результатом.

Для реализации классификационной модели использовался один из методов машинного обучения, метод опорных векторов [8]. На вход классификатора идут значения ключевых точек, которые сформировала модель MobileNetV2. Но так как каждая точка имеет три координаты, то перед тем, как подавать значения идет предобработка, все значения вытягиваются в вектор с 63-мя значениями. После чего классификатор вычисляет значения решающей функции на основе ядра (линейное, полиномиальное и др.), а именно схожесть с теми значениями, на основе которых строился классификатор. Так как решается задачи многоклассовой классификации, то используется стратегия один против всех. Для 7 классов строится 21 классификаторов. После чего идет «голосование», где отбирается нужный класс.

Для поиска параметров данного метода использовался GridSearchCV [9]. Он ускоряет поиск параметров, подбирая параметры, которые указал для поиска пользователь.

Параметры для поиска:

1. Ядро: линейное, полиномиальное, сигмоидальное, RBF (радиальная базисная функция);

2. Коэффициент регуляризации — параметр, который контролирует компромисс между сложностью модели и ошибкой на обучающей выборке.

3. Коэффициент ядра — параметр, используемый для нелинейных ядер. Определяет «дальность» влияния каждого отдельного тренировочного примера на форму разделяющей поверхности. Может быть масштабируемым, автоматически подобрал моделью или фиксированным значением.

4. Степень полинома (только для полиномиального ядра);
5. Веса классов. Данный параметр помогает бороться с неравномерным распределением классов.

Лучшими параметрами для классификатора были следующие: коэффициент регуляризации — 50, используемое ядро — RBF, коэффициент ядра — масштабируемый. В процессе обучения метрика F1-мера (macro) равнялась 0.8038. Матрица спутывания для этой модели представлена на рисунке 7.

Рисунок 7 – Матрица спутывания

Стоит отметить, что классификатор выдает вероятности для классов и для того, чтобы не было ложных срабатываний был внесен порог, который равен 0.7.

Взаимодействие системы. Автономная системы распознавания жестов реализована на базе Raspberry PI. К этому одноплатному компьютеру подключается камера, для отслеживания рук. Для отображения результатов работы системы подключается дисплей или удаленное устройство, например персональный компьютер.

Работа системы представлена следующим образом:
1. Получение изображения руки с камеры;
2. Определение области на изображении с рукой с помощью детектора;
3. Формирование координат ключевых точек через сеть MobileNetV2, отрисовка скелета кисти;
4. Определение класса жеста и отрисовка;
5. Вывод полученного результата.

На рисунке 8 показана схема работы системы.

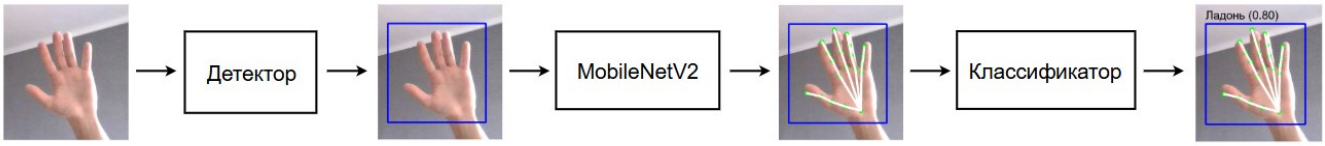


Рисунок 8 – Схема работы системы

Вывод. В результате работы получилось реализовать автономную систему распознавания жестов на базе детектора от Mediapipe, модели MobileNetV2, которая была переделана под задачу распознавания ключевых точек (ошибка построения точек состовляет 6 пикселов), и классификатора на основе метода опорных векторов (точность работы около 80%).

Список использованных источников:

1. Zimmermann C. et al. Freihand: A dataset for markerless capture of hand pose and shape from single rgb images //Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. – 2019. – С. 813-822.

2. Zhang F. et al. Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking //arXiv preprint arXiv:2006.10214. – 2020.

3. Sandler M. et al. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2018. – С. 4510-4520.

4. ReLU6 — PyTorch 2.11 documentation [Электронный ресурс] // PyTorch. – Режим доступа: https://docs.pytorch.org/docs/stable/index.html. – Дата доступа: 21.03.2026.

5. ReLU — PyTorch 2.11 documentation [Электронный ресурс] // PyTorch. – Режим доступа: https://docs.pytorch.org/docs/stable/index.html. – Дата доступа: 21.03.2026.

6. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization //arXiv preprint arXiv:1412.6980. – 2014.

7. Al-Kababji A., Bensaali F., Dakua S. P. Scheduling techniques for liver segmentation: Reducelronplateau vs onecyclelr //International conference on intelligent systems and pattern recognition. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – С. 204-212.

8. Schölkopf B. et al. Support vector method for novelty detection //Advances in neural information processing systems. – 1999. – Т. 12.

9. GridSearchCV — scikit-learn 1.8.0 documentation [Электронный ресурс] // scikit-learn. – Режим доступа: https://scikit-learn.org/stable/api/index.html. – Дата доступа: 26.03.2021.

.

UDC 004.93'1

AN AUTONOMOUS GESTURE RECOGNITION SYSTEM

Ermakovich V.A student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Vashkevich M.I. – Doctor of Science

Annotation. The paper presents the design of an autonomous gesture recognition system based on a simple device. During the design, ready-made solutions were used, as well as methods for refining them. The FreiHAND dataset, the MediaPipe-based detector, the MobileNetV2 convolutional neural network architecture, and the support vector method were used. The paper shows data images, formulas for preparing values for training, explanations of the features of the MobileNe family, a table with MobileNetV2 parameters, and information about the construction of the support vector method.

Keywords. Convolutional neural networks, machine learning, computer vision.

УДК 004.934

СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ТРАНСФОРМЕРНОГО ТИПА

Зубрицкая Е.И., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Вашкевич М.И. – д-р. техн. наук, профессор

Аннотация. В работе представлена разработка архитектуры нейронной сети на базе трансформера для задачи визуального распознавания речи. Был собран собственный набор данных, а также выполнена его предобработка, составлена архитектура сверточной сети для извлечения визуальных признаков. При проектировании использовались детектор ключевых точек лица на базе MediaPipe, блоки кодировщика для анализа визуальных признаков и создания их контекстного представления и декодировщика для пошаговой генерации текста на основе выходов кодировщика. В работе показаны примеры полученных данных и архитектур сети.

Ключевые слова. Трансформер, сверточная нейронная сеть, глубокое обучение, компьютерное зрение.

Введение. Визуальное распознавание речи — перспективная, но сложная задача, востребованная в системах помощи людям и в шумных средах [1]. Основными препятствиями являются низкое качество видео и непостоянное положение лица в кадре, из-за чего существующие подходы часто ограничены распознаванием отдельных слов, а не связных предложений.

Целью данной работы является разработка системы распознавания речи на основе трансформерной архитектуры, способной работать с целыми предложениями. Задачи включают выбор архитектуры, формирование набора данных для обучения и тестирования, а также экспериментальную оценку качества и анализ полученных результатов.

Предобработка данных. Исходными данными выступают массив передач BBC с Риз Латиф в качестве ведущей, а также соответствующие текстовые расшифровки, где каждой фразе соответствует временная метка её появления в видео. Задача предобработки состоит в отборе необходимого материала и преобразовании данных в формат, пригодный для обучения сети.

Для устранения избыточной информации выполнена фильтрация видеоматериалов на основе предварительной временной разметки. В результате сформированы компактные видео, содержащие только релевантные фрагменты, и синхронизированные с ними файлы расшифровок с обновленными таймкодами.

Подготовка данных включает сегментацию видео на фрагменты, соответствующие фразам, и извлечение из кадров области рта говорящего. Текстовые фразы преобразовываются в последовательности токенов. Токен – базовая единица текста, представленная числовым кодом, с использованием предобученного BPE-токенизатора от GPT-2. Для оптимизации его исходный словарь урезается так, чтобы содержать только токены, встречающиеся в текстах проекта, что значительно сокращает вычислительные затраты. Итоговые данные, включающие последовательности изображений и их токенизированные фразы, сохраняются в формате PKL. Пример данных представлен на рисунке 1.

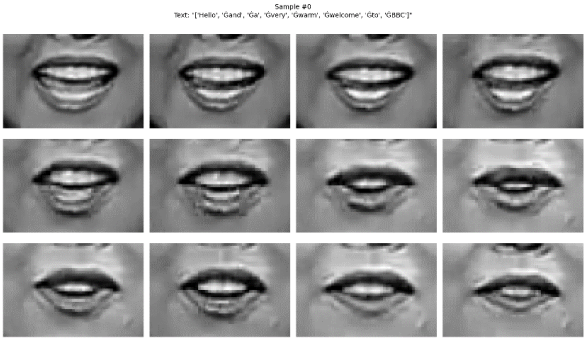


Рисунок 1 – Пример данных

Архитектура кодировщика. Трансформер — это нейросетевая модель, призванная более эффективно решать задачи seq2seq по преобразованию одной последовательности в другую. Архитектура состоит из двух блоков: кодировщика (encoder), представленного на рисунке 2 слева, и декодировщика (decoder), представленного справа. Кодировщик и декодировщик выделены прямоугольниками.

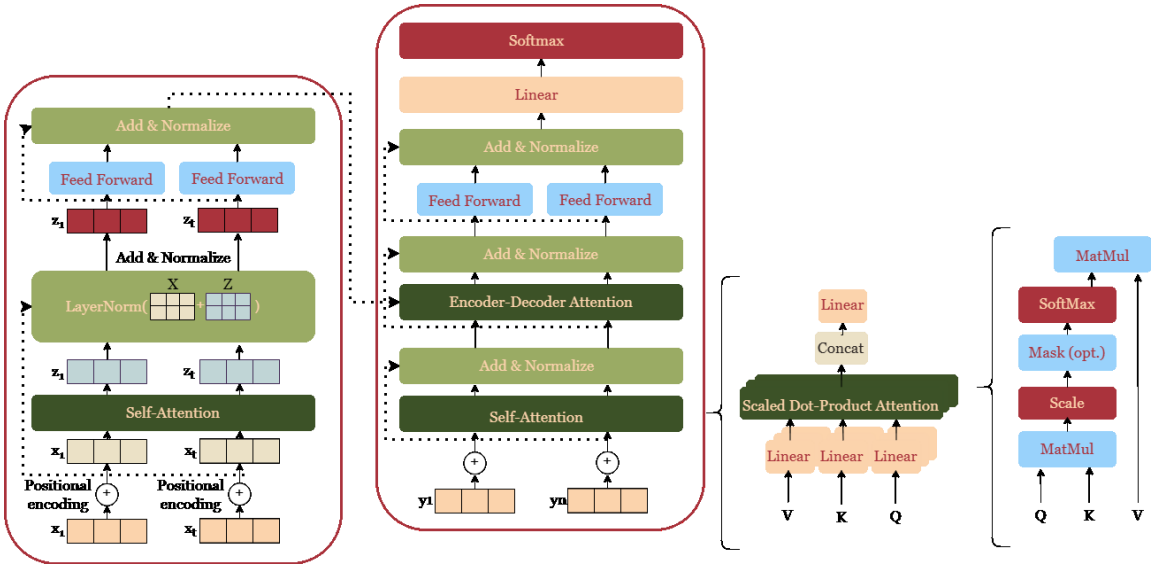


Рисунок 2 – Архитектура сети

Кодировщик модели Transformer принимает на вход T эмбеддингов элементов входной последовательности и выдаёт T уточнённых эмбеддингов для каждого элемента с учётом его контекста с которыми впоследствии будет работать декодировщик модели, состоящий из отдельных идентичных блоков. Кодировщик также состоит из N последовательных применений идентичных блоков, каждый - со своими параметрами [2].

Для получения входных эмбедингов каждый кадр пропускается через свёрточную нейронную сеть с трехмерной сверткой, которая извлекает из изображений компактные числовые признаки. На выходе свёрточной сети получается T векторов, каждый размерностью D. После чего первый блок кодировщика прибавляет к ним эмбеддинги позиции кадра в последовательности, затем выдаёт такое же количество D-мерных выходных эмбеддингов, которые учитывают контекст всей входной последовательности.

Позиционное кодирование заключается в том, что каждой позиции сопоставляется свой эмбеддинг. Вектор позиционного кодирования e^p для токена на позиции $p = 1,2,\dots T$ заполняется синусами от этой позиции на чётных элементах вектора и косинусами от позиции - на нечётных, причем для разных элементов используются синусы и косинусы разных периодов от 2π до $10000 \cdot 2\pi$:

$$e^p_{2i} = sin(\frac{pos}{10000^{2i/D}}) \quad (1)$$

$$e^p_{2i+1} = cos(\frac{pos}{10000^{2i/D}}) \quad (2)$$

Можно объединить эти вектора в матрицу E размером T×D [3].

Каждый блок кодировщика имеет свои параметры, но функционально устроен единообразно:

1. каждый входной эмбеддинг преобразуется через блок самовнимания (self-attention) в выходной эмбеддинг;
2. входной и выходной эмбеддинги суммируются, как показано пунктиром на схеме;
3. суммарный эмбеддинг пропускается через послойную нормализацию (LayerNorm);
4. результирующий эмбеддинг преобразуется двухслойным персептроном (Feed Forward) в выходной;
5. затем опять входной и выходной эмбеддинги (в контексте предыдущего шага) суммируются, как показано пунктиром на схеме (рисунок 2);
6. суммарный эмбеддинг снова пропускается через послойную нормализацию (LayerNorm).

Для каждого из N блоков декодировщика этапы 1-6 применяются к элементу входной последовательности независимо с одинаковыми весами. При этом веса внутри каждого блока свои.

Блок самовнимания призван обогатить эмбеддинг каждого кадра информацией о других кадрах последовательности. Если обрабатывается последовательность длины T из D-мерных эмбедингов, тогда входную последовательность можно представить в виде матрицы X размером $T \times D$. При использовании механизма самовнимания по эмбедингу каждого кадра генерируются:

1. D- мерный запрос (query) $q_{1\times d} = x_{1\times D} \cdot W^Q_{D\times d}$
2. D-мерный ключ (key) $k_{1\times d} = x_{1\times D} \cdot W^Q_{D\times d}$

3. $\bar{d}$-мерное значение (value) $v_{1\times\bar{d}} = x_{1\times D} \cdot W^{V}_{D\times\bar{d}}$

Объединяя для каждого токена последовательности вектора их запросов, ключей и значений, получим: матрицу запросов $Q_{T\times d}$, матрицу ключей $K_{T\times d}$, матрицу значений $V_{T\times\bar{d}}$. Тогда выходной эмбеддинг вычисляется агрегацией значений для всех токенов последовательности:

$$y_{1\times\bar{d}} = \operatorname{softmax}\left(\frac{1}{\sqrt{d}} q_{1\times d}(K^T)_{d\times T}\right)_{1\times T} V_{T\times\bar{d}} \tag{3}$$

Агрегация производится суммированием значений с весами, равными соответствиям соответствующих ключей запросу. Соответствия вычисляются по их отмасштабированному скалярному произведению. Для повышения производительности вычисления производятся для всех токенов одновременно, используя матричную запись. Результат самовнимания для всех токенов записывается как:

$$Y_{T\times\bar{d}} = \operatorname{softmax}\left(\frac{1}{\sqrt{d}} Q_{T\times d}(K^T)_{d\times T}\right)_{T\times T} V_{T\times\bar{d}} \tag{4}$$

В трансформере используется несколько голов самовнимания, каждая - со своими весами., что позволяет собирать разную контекстную информацию. После применения голов самовнимания их результаты конкатенируются и пропускаются через линейное преобразование, чтобы вернуть размерность эмбеддинга к исходному вектору [3]. Визуализация процесса показана на рисунке 3.

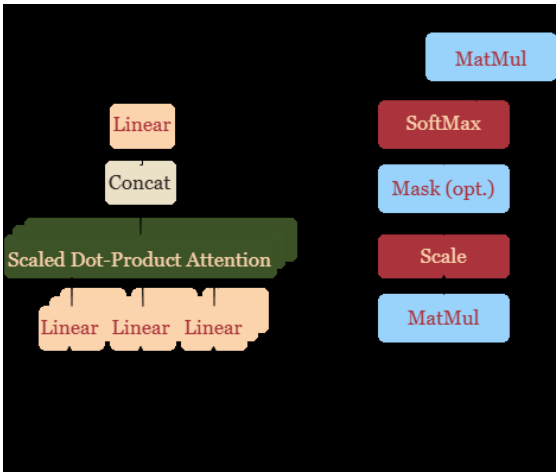


Рисунок 3 – Механизм самовнимания

Слой LayerNorm принимает на вход активации выходы предыдущего слоя сети и линейно перемасштабирует их:

$$z_M \to \gamma_M \frac{z_M - \mu}{\sqrt{\sigma^2 + \delta}} + \beta_M, \tag{5}$$

где $\delta > 0$ - малая константа, исключающая деление на ноль, а параметры μ и σ вычисляются как выборочное среднее и СКО по активациям всех нейронов слоя в рамках одного объекта:

$$\mu = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} z_m \tag{6}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}(z_m - \mu)^2} \tag{7}$$

Feed Forward преобразование представляет собой двухслойный персептрон с активацией ReLU:

$$y = ReLU(xW_1 + b_1)W_2 + b_2 \quad (8)$$

где x - входной эмбеддинг кадра, y - его нелинейно преобразованная версия той же размерности, W_1, W_2 - обучаемые матрицы, b_1, b_2 - обучаемые вектора смещений. Этот блок позволяет модели настраивать сложные зависимости и строить более богатые признаковые представления.

Архитектура декодировщика. Декодировщик модели трансформера принимает на вход M эмбеддингов элементов уже сгенерированной последовательности и выдаёт вероятностное распределение следующего предсказываемого элемента последовательности.

Декодировщик состоит из N последовательных применений блоков декодировщика, каждый раз - со своими параметрами. Задача каждого блока - уточнить эмбеддинги сгенерированных токенов с учётом их контекста из других сгенерированных токенов. Последний блок выдаёт окончательные эмбеддинги, к каждому из которых независимо применяется линейный слой и SoftMax-преобразование. Итоговый вектор выходов интерпретируется как вероятность токенов на каждой позиции выходной последовательности. Интересен только токен на позиции t, который выбирается максимально вероятным. После этого декодировщик перезапускается для предсказания токенов в позициях t+1, t+2,... пока не будет сгенерирован токен [EOS], означающий конец генерации.

Для декодировщика входными токенами является уже не входная, а выходная последовательность, сдвинутая на один шаг вперёд специальным токеном [BOS]. Это сделано для того, чтобы каждый раз для всех ранее сгенерированных токенов предсказывался следующий, а в самом начале - первый токен.

Блок самовнимания применяется точно так же, как и в случае кодировщика, с отличием, что степени внимания маскируются таким образом, чтобы из позиции t нельзя было смотреть в будущие позиции t+1,t+2,..., которые ещё не сгенерированы. Данный механизм называется маскируемое внимание.

Также в декодировщике используется блок перекрестного внимания, уточняющий эмбеддинги декодировщика, опираясь на информацию о входной последовательности. Он устроен точно так же, как и блок самовнимания в кодировщике, но внимание в нём направлено от токенов выходной последовательности к итоговым токенам входной последовательности, полученных с выходов последнего блока кодировщика. Это реализуется тем, что:

1. запросы генерируются по уже сгенерированным токенам выходной последовательности;
2. ключи и значения генерируются по эмбеддингам входной последовательности.

Таким образом наблюдаются 3 вида внимания в трансформере: самовнимание в кодировщике, маскируемое внимание в декодировщике и перекрестное внимание в декодировщике. Эти типы вниманий представлены на рисунке 4.

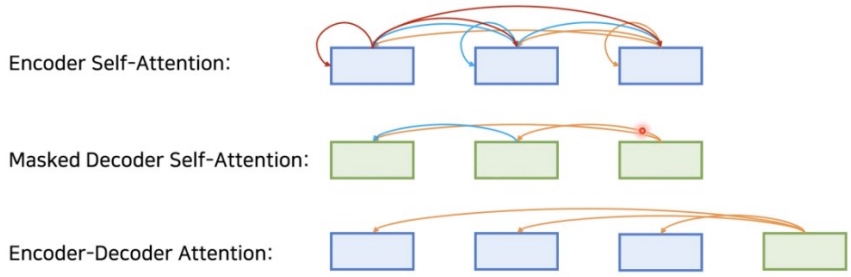


Рисунок 4 – Виды внимания в трансформере

Вывод. В результате проделанной работы была сформирована архитектура модели трансформера для визуального распознавания речи с использованием сверточной сети с трехмерной сверткой для извлечения визуальных признаков..

Список использованных источников:

1. Макар, Д. А. Нейронная сеть на основе сверточных, рекуррентных слоев и механизма внимания для визуального распознавания речи / Д. А. Макар, М. И. Вашкевич // Доклады БГУИР. – 2026. – Т. 24, № 1. – С. 75–82.

2.Кодировщик трансформера [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://deepmachinelearning.ru/docs/Neural-networks/Transformer/Encoder-self-attention.

3.The Transformers [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.vizuaranewsletter.com/p/the-transformers.

4. Vaswani A. et al. Attention is all you need //Advances in neural information processing systems. – 2017. – Т. 30.

.

UDC 004.934

A VISUAL SPEECH RECOGNITION SYSTEM BASED ON A TRANSFORMER-TYPE NEURAL NETWORK

Zubritskaya K.I. student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1]
Minsk, Republic of Belarus

Vashkevich M.I. – Doctor of Science

Annotation. The work presents the development of a transformer-based neural network architecture for the task of visual speech recognition. A proprietary data set was collected, as well as its preprocessing, and the architecture of a convolutional network for extracting visual features was compiled. During the design, a MediaPipe-based face key point detector, encoder blocks for analyzing visual features and creating their contextual representation, and a decoder for step-by-step text generation based on encoder outputs were used. The work shows examples of the received data and network architectures.

Keywords. Transformer, convolutional neural network, deep learning, computer vision.

УДК 004.312.466:534-7

СИНТЕЗАТОР ЗВУКА ГИТАРНОЙ СТРУНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА КАРПЛУСА-СТРОНГА НА БАЗЕ ПЛИС

Тондель Д.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Вашкевич М.И. – д-р. техн. наук, профессор

Аннотация. В работе представлена разработка и исследование аппаратной реализации алгоритма Карплуса-Стронга генерации звука гитарной струны. Разработка RTL-модели алгоритма проиодилась с использованием языков описания аппаратуры VHDL и SystemVerilog в среде Vivado. В работе описаны используемый алгоритм, разработанные функциональные блоки, а также анализ аппаратных затрат ПЛИС для полученной реализации.

Ключевые слова. Алгоритм Карплуса-Стронга, синтез звука, гитарная струна, ПЛИС, Zynq-7000, RTL-модель, VHDL, SystemVerilog, I2S, аудиокодек SSM2603, фиксированная точка.

Введение. Алгоритм Карплуса-Стронга генерации звука гитарной струны – это способ синтеза звука, заключающийся в пропускании входного сигнала определенной длины через линию задержки с фильтром [1].

В рамках настоящего исследования фильтр нижних частот в цепи задержки был заменен умножителем на константу. Описанный вариант работы алгоритма выражается разностным уравнением (1).

$$y(n) = x(n) + \alpha y(n - M) \tag{1}$$

где $x(n)$ – входной сигнал; α – коэффициент затухания в диапазоне от 0,9 до 1,0; M – задержка.

Величина задержки M определяет частоту генерируемой ноты и рассчитывается следующим образом:

$$M = \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} + 0.5 \right\rfloor \tag{2}$$

где f_s – частота дискретизации; f_0 – частота генерируемой ноты.

Для генерирования звука струны на вход системы, описанного уравнением (1), необходимо подать сигнал длиной L, M первых отсчетов которого являются шумом, а остальные – нулевыми.

В рамках настоящего исследования были определены следующие ограничения: частота дискретизации f_s равна 16 кГц; коэффициент затухания α является константным значением и равен 0.99; формат представления числа – Q1.15; умножение на константу осуществляется по алгоритму Бутта; аппаратная платформа реализации – отладочная плата ZYBO на базе ПЛИС Zynq7000 [2].

Основные этапы реализации RTL-модели включали в себя разработку ядра генератора, выполняющего непосредственный расчет очередного значения выходного сигнала, и передатчика интерфейса I2S.

Разработка ядра генератора. В качестве подмодулей генератора были выделены следующие функциональные блоки: операционное устройство, управляющее устройство, делитель частоты.

Структурная схема операционного устройства приведена на рисунке 1.

Операционное устройство генератора состоит из счетчика, мультиплексора, компаратора, сумматора, блока регистров задержки, умножителя на константу, регистра результата. Счетчик выполняет функцию обращения к записанным в памяти отсчетам шума по его значению. При достижения счетчика значения M на вход генератора начинают поступать нулевые отсчеты. Под действием управляющих сигналов в блоке регистров задержки происходит сдвиг и значение крайнего регистра передается в умножитель на константу. В ходе выполнения операции умножения происходит усечение получаемого результата до 16 разрядов, и данное значение поступает на вход 16-битного сумматора. Результат суммы записывается в регистр результата и первый регистр блока задержки. Из регистра результата сгенерированный отсчет поступает на передатчик I2S.

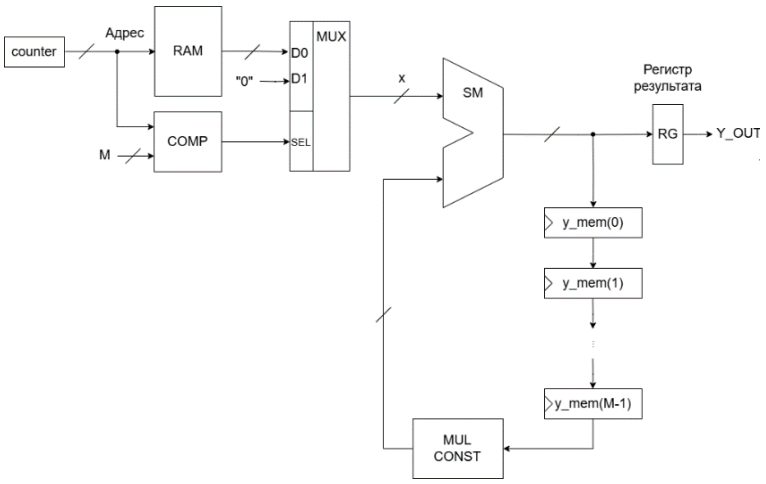


Рисунок 1 – Структурная схема операционного устройства генератора

Управляющее устройство генератора было реализовано как конечный автомат Мили. Нами была составлена микропрограмма работы автомата, блок-схема которой приведенная на рисунке 2.

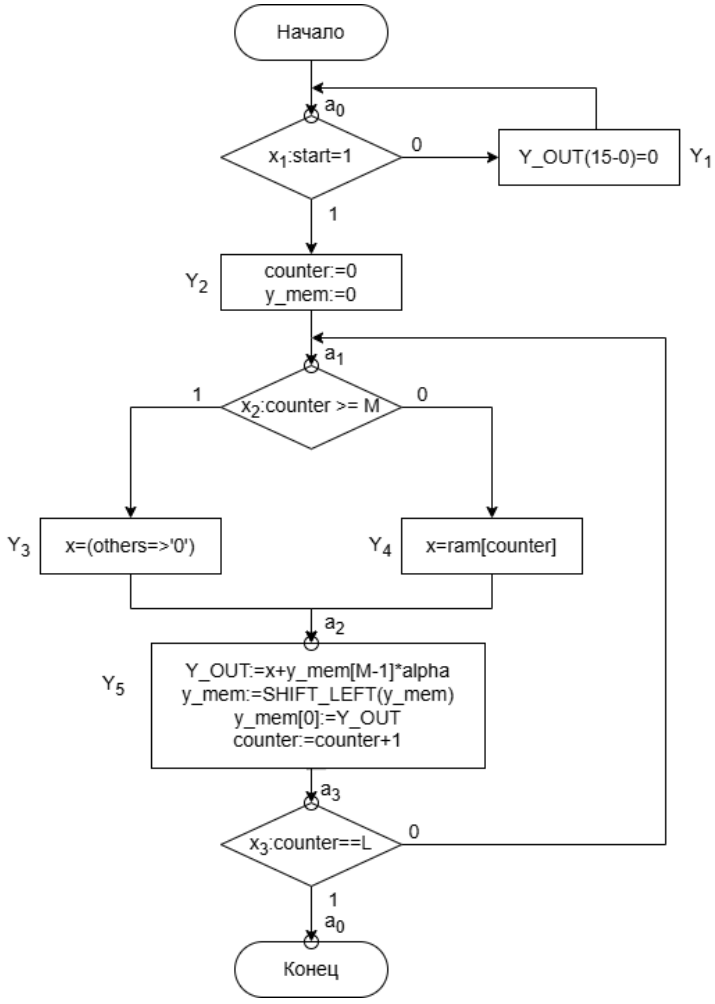


Рисунок 2 – Микропрограмма работы устройства управления

Начало генерации ноты осуществляется по входному сигналу $start$: происходит обнуление счетчика и очистка регистров задержки. Далее в зависимости от текущего значения счетчика происходит либо выборка из памяти отсчета шума, либо подача нулевого отсчета и производится расчет выходного значения. По достижении счетчика заданного значения генератор переходит в состояние ожидания сигнала $start$ и передает на выход значение нуля. По полученной микропрограмме были составлены логические уравнения формирования следующего состояния

автомата и управляющих сигналов, поступающих на операционный блок. Функциональная схема устройства управления приведена на рисунке 3.

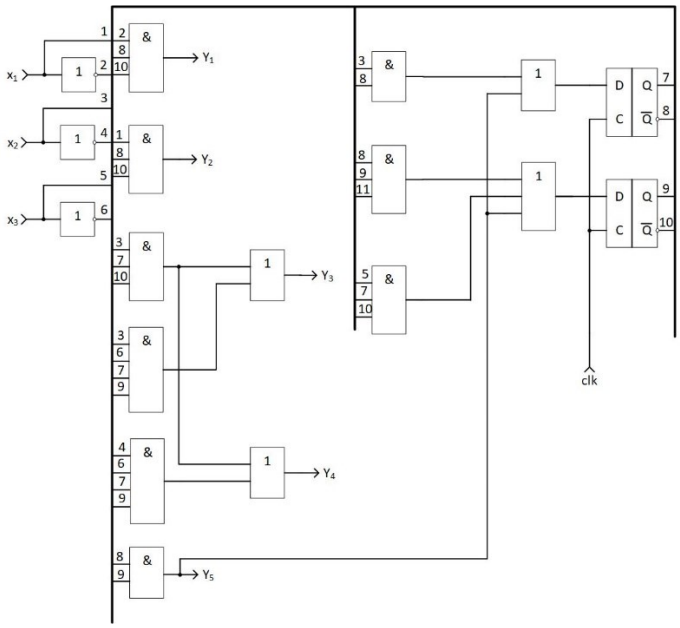


Рисунок 3 – Функциональная схема устройства управления

Передатчик интерфейса I2S был реализован согласно стандарту, приведенному в [3]. Функциональная схема передатчика приведена на рисунке 4. Его назначение – передача формируемых генератором значений на аудиокодек SSM2603 [4].

Реализация на ПЛИС. Генератор реализован на плате быстрого прототипирования ZYBO на базе ПЛИС Zynq7000 (рисунок 4).

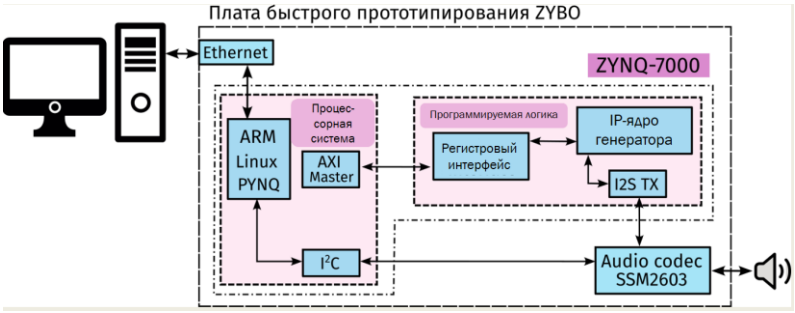


Рисунок 4 – Реализация проекта на плате быстрого прототипирования ZYBO

Управление генератором производится с помощью Jupiter Notebook через подключение ПК к плате по Ethernet. Контроль работы устройства осуществляется через обращение процессорного ядра по AXI-интерфейсу к предусмотренным регистрам состояния. Формируемый сигнал передается в аудио-кодек SSM2603 по интерфейсу I2S и попадает на устройство вывода (колонки или наушники).

Тестирование работы генератора. Для проверки корректной генерации была разработана математическая модель работы генератора с фиксированной точкой в пакете MATLAB. Ошибка вычислений RTL-модели составила меньше 2^{-13} от полного диапазона значений, то есть менее 0,0488%.

Также была оценена точность генерируемой частоты. В качестве эталонных частот были выбраны частоты нот стандартного 88-клавишного фортепиано. Расчет абсолютной ошибки производился по формуле (3).

$$\varepsilon = \frac{\frac{f_s}{M} - f_0}{f_0} \cdot 100\% \tag{3}$$

График абсолютной ошибки генерации приведен на рисунке 5. Ошибка, возникающая за счет округления значения M, не превысила 10% на высоких частотах и 5% на диапазоне частот, являющихся наиболее используемыми.

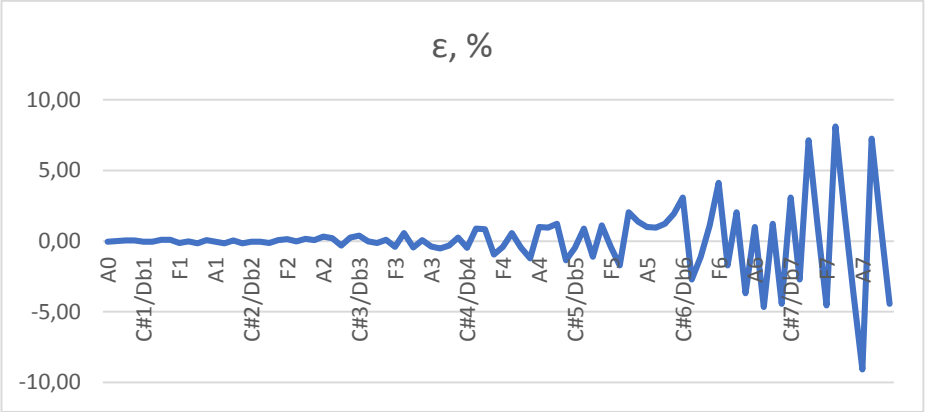


Рисунок 5 – График абсолютной ошибки генерации

Аппаратные затраты настоящей реализации зависят от установленного минимального порога воспроизводимой частоты. Чем ниже это значение, тем выше количество регистров задержки в цепи обратной связи. Данные, подтверждающие это утверждение (количество используемых LUT-ячеек и триггеров), приведены на рисунке 6.

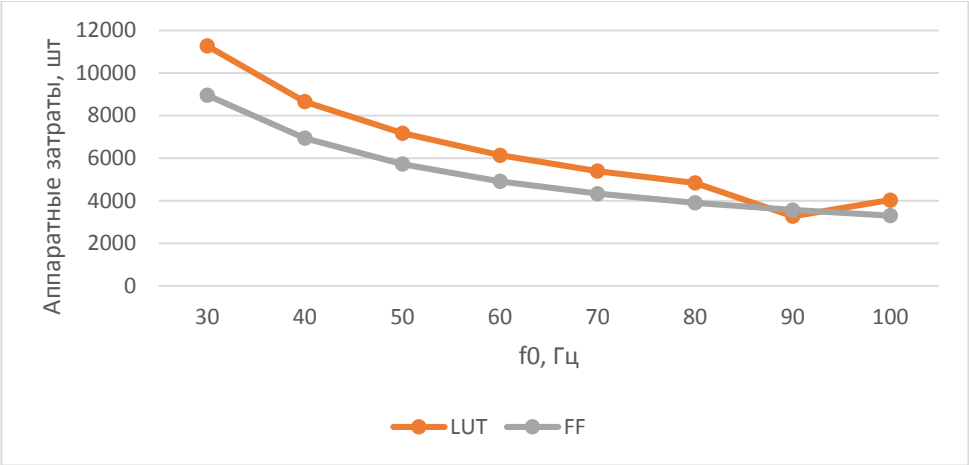


Рисунок 6 – Аппаратные затраты ПЛИС

Таким образом, в ходе работы была разработана и исследована аппаратная реализация алгоритма Карплуса–Стронга на базе ПЛИС Zynq‑7000. Созданная RTL‑модель генератора и интерфейс I2S успешно интегрированы с аудиокодеком SSM2603 и обеспечивают корректную генерацию звука гитарной струны в реальном времени. Сравнение с математической моделью показало высокую точность вычислений — ошибка менее 0.0488% полного диапазона. Частотная погрешность, обусловленная дискретизацией задержки, не превышает 5% в наиболее используемом музыкальном диапазоне. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного аппаратного синтеза звука на ПЛИС и могут быть использованы для дальнейшего расширения функциональности.

Список использованных источников:

1. Karplus, Kevin; Strong, Alex. Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres // Computer Music Journal : journal. — MIT Press, 1983. — Vol. 7, no. 2. — P. 43—55.

2. Digilent. ZYBO Zynq‑7000 Development Board Reference Manual. – Rev. B. – 2017. – 26 p.

3. Philips Semiconductors. I²S Bus Specification. – February 1986, Revised June 5, 1996. – 7 p.

4. Analog Devices. SSM2603 Low Power Audio Codec. Data Sheet. – Rev. D. – 2018. – 31 p.

UDC 004.312.466:534-7

GUITAR STRING SOUND SYNTHESIZER USING THE KARPLUS-STRONG ALGORITHM BASED ON FPGA

Tondel D.A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Vashkevich M.I. – Doctor of Science

Annotation. The work presents the development and study of a hardware implementation of the Karplus-Strong algorithm for guitar string sound generation. The RTL model of the algorithm was developed using the hardware description languages VHDL and SystemVerilog in the Vivado environment. The paper describes the algorithm used, the developed functional blocks, and an analysis of the FPGA hardware utilization for the obtained implementation.

Keywords. Karplus-Strong algorithm, sound synthesis, guitar string, FPGA, Zynq-7000, RTL model, VHDL, SystemVerilog, I2S bus, SSM2603 audio codec, fixed-point arithmetic.

СИСТЕМА МНОГОКАНАЛЬНОЙ АУДИОЗАПИСИ НА БАЗЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ STM32

Субботенко О.Р., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Порхун М.И. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В работе рассматривается реализация системы многоканальной аудиозаписи на базе аппаратной платформы STM32. Система позволяет осуществлять запись звукового сигнала одновременно по нескольким каналам благодаря использованию микрофонного блока и сохранять результат в одном файле. Проверка работоспособности системы выполнена путем макетирования.

Система многоканальной аудиозаписи реализована на базе аппаратной платформы BlueCoin с микроконтроллером STM32 на борту. На рисунке 1 изображена структура системы.

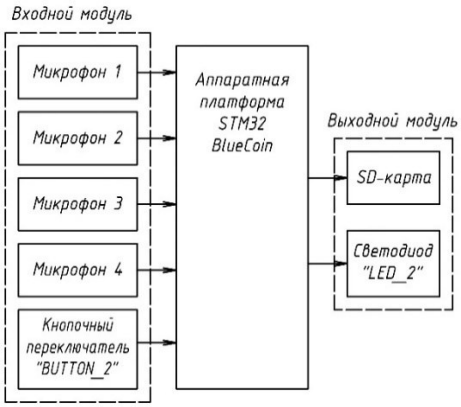


Рисунок 1 – Структурная схема системы многоканальной аудиозаписи

Основным компонентом системы является аппаратная платформа BlueCoin, на борту которой установлен микроконтроллер STM32F446MEY6. Микроконтроллеры, относящиеся к подсемейству STM32F4, являются высокопроизводительными и предназначены для приложений с большим объемом вычислений и мультимедиа [1]. Многоканальная аудиозапись осуществляется при помощи четырех микрофонов MP34DT06JTR, установленных на выбранной аппаратной платформе. MP34DT06J – это компактный, маломощный, всенаправленный цифровой MEMS-микрофон, оснащенный емкостным чувствительным элементом и интерфейсом IC [2]. Кнопочный переключатель “Button_2”, посредством которого начинается и заканчивается запись аудиоданных, установлен на платформе BlueCoin и инициализируется при прошивке. Индикатором ведущейся звукозаписи является мигающий светодиод “LED_2” (один из восьми, установленных на платформе). После окончания записи аудиоданные перемещаются из буфера в WAV-файл, который сохраняется на microSD-карту. Устройство питается от компьютера, с которого загружается прошивка. Также оно может питаться от батареи, которая идет в комплекте с отладочным набором.

Обобщенный алгоритм работы устройства приведен ниже:

1. Подключение необходимых библиотек.
2. Объявление экземпляров классов для работы с файловой системой FatFs и глобальных переменных.
3. Действия, выполняемые один раз вначале при прошивке:
   3.1. Инициализация HAL библиотеки;
   3.2. Настройка тактовой частоты;
   3.3. Инициализация периферийных устройств;
   3.4. Установка приоритета прерываний и разрешения на их обработку.
4. Действия, выполняемые в цикле:
   4.1. Проверка обнаружения microSD-карты;
   4.2. Начало и окончание записи аудиоданных в WAV-файл по нажатию на кнопочный переключатель;
   4.3. Сохранение созданного WAV-файла на SD-карту.

Проектирование программного обеспечения производилось в среде разработки STM32CubeIDE. Она объединяет в себе функции настройки STM32 и создания проектов из среды STM32CubeMX [3].

Проверка корректности работы системы выполнена путем макетирования с использованием отладочного набора BlueCoin starter kit STEVAL-BCNKT01V1, в состав которого входят:

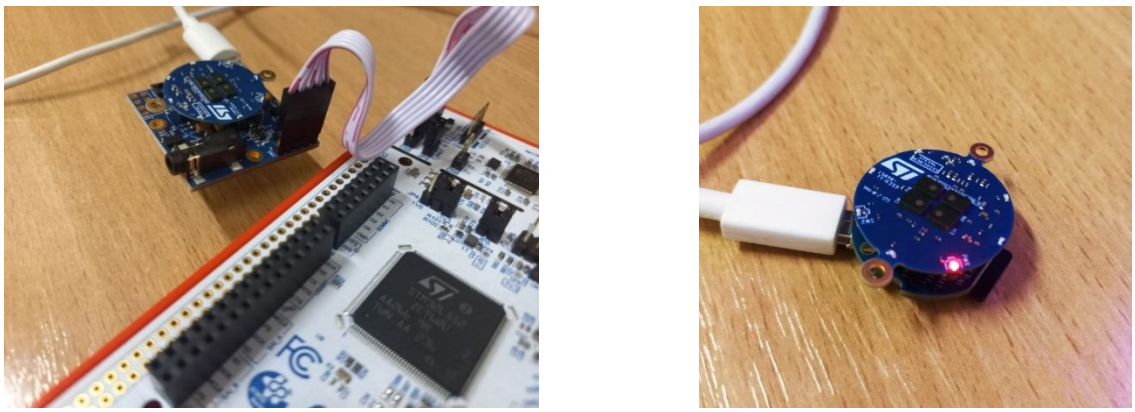
– основная станция (BlueCoin Core System);

– опорная станция для автономной работы (BlueCoin Cradle board);
– плата для прошивки (CoinStation board) [4].

Для прошивки необходимо соединить BlueCoin Core System и CoinStation board между собой. Затем данную конструкцию нужно подключить к плате NUCLEO-L552ZE-Q, заранее переведенную в режим «ST-LINK» посредством SWD. NUCLEO-L552ZE-Q и CoinStation board должны быть подключены к питанию через разъем Micro-USB. Для проверки корректности подключения и загрузки исполняемого файла .elf на микроконтроллер используется среда STM32CubeProgrammer.

Для записи аудиосигнала нужно соединить платы BlueCoin Core System и BlueCoin Cradle board, куда заранее вставлена microSD-карта, и подключить их к питанию. На данном этапе проверяется функционал разработанной системы: начало и окончание записи аудиофайла, мигание светодиодом во время записи. Далее microSD-карта извлекается, и можно приступать к анализу записанных WAV-файлов.

На рисунке 2 показаны фото разработанного макета в различных режимах работы: прошивка микроконтроллера (рисунок 2 *а)*) и запись аудиосигнала (рисунок 2 *б)*).



а) *б)*

Рисунок 2 – Макет системы многоканальной аудиозаписи на базе аппаратной платформы STM32 BlueCoin: *а)* прошивка микроконтроллера; *б)* запись аудиосигнала

Фрагмент частотно-временного представления записанного сигнала приведен на рисунке 3.

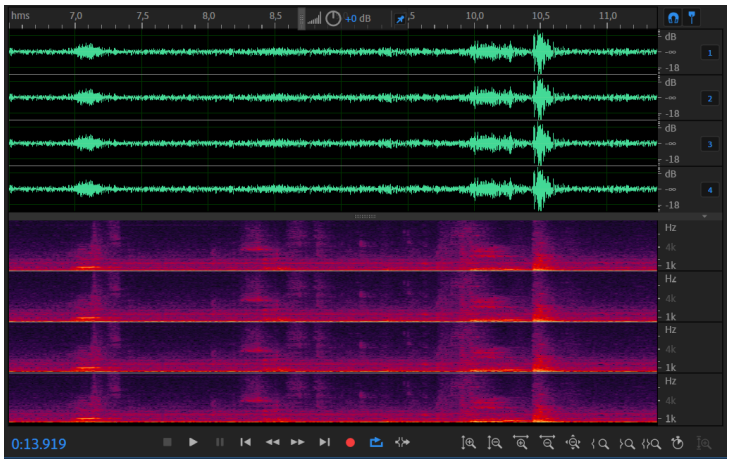


Рисунок 3 – Фрагмент частотно-временного представления записанного аудиосигнала

Анализ полученных записей подтверждает корректность работы системы. Высокая степень схожести сигналов свидетельствует о точной синхронизации каналов при захвате данных, а также демонстрирует отсутствие фазовых искажений и сбоев при оцифровке звука.

В процессе разработки устройства были пройдены такие этапы, как создание структуры системы, написание алгоритма программы и ее отладка. Результатом работы является макет устройства и записанные аудиофайлы.

Список использованных источников:

1. Новиелло, К. Освоение STM32 / К. Новиелло – Виктория (Британская Колумбия). : Leanpub, 2018. – С. 21 – 33.
2. MP34DT06J Datasheet : Datasheet / STMicroelectronics. – Geneva, Switzerland, 2021. – 20 с.
3. Integrated Development Environment for STM32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.st.com/en/development tools/stm32cubeide.html
4. STEVAL-BCNKT01V1 Data brief : Data brief / STMicroelectronics. – Geneva, Switzerland, 2019. – 7 с.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АНАЛИЗА ГОЛОСОВЫХ И РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Субботенко О.Р., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Порхун М.И. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В работе рассматривается реализация программно-аппаратного комплекса анализа голосовых и речевых сигналов для задач медицинской диагностики. Функционал устройства включает в себя запись звукового сигнала и его последующую обработку. В процессе обработки рассчитываются следующие параметры: частота основного тона (ЧОТ), джиттер и шиммер,. Функционал устройства и результаты его работы отображаются в графическом интерфейсе.

Программно-аппаратный комплекс анализа голосовых и речевых сигналов для задач медицинской диагностики реализован на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi. На рисунке 1 изображена структура устройства.

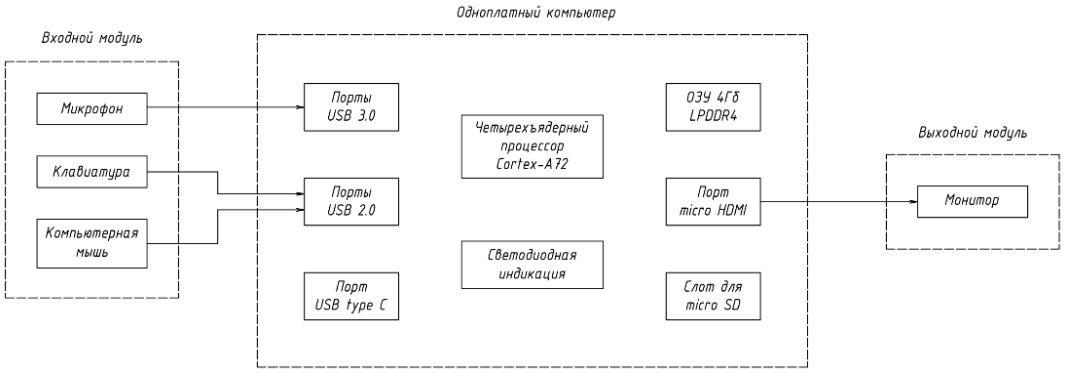


Рисунок 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса анализа голосовых и речевых сигналов для задач медицинской диагностики

Комплекс реализован на одноплатном компьютере Raspberry Pi. К нему подключены следующие периферийные устройства: микрофон, клавиатура, компьютерная мышь (по интерфейсу USB) и монитор (по интерфейсу HDMI).

Алгоритм работы программной части комплекса приведен ниже:

5. Подключение необходимых библиотек.
6. Создание экземпляра класса QApplication (создание приложения).
7. Создание главного окна.
8. Описание интерфейса главного окна.
9. Запись нового аудиофайла или загрузка существующего.
10. Анализ аудиофайла (расчет ЧОТ, джиттера, шиммера, представление сигнала во временной области и расчет мел-спектрограммы).
11. Обновление интерфейса в соответствии с рассчитанными значениями и построенными графиками.

Для расчета частоты основного тона необходимо произвести грубую разметку сигнала на периоды основного тона. Сначала из основного сигнала выделяется фрагмент длительностью 50 мс и вычисляется его автокорреляционная функция (АКФ). Затем производится поиск первого пика АКФ, индекс которого применяется при вычислении частоты грубой разметки. Для обнаружения индексов грубой разметки сигнал пропускается через КИХ-фильтр нижних частот, после чего индексы корректируются с учетом групповой задержки фильтра. Далее производится вычисление ЧОТ согласно методу локальных максимумов. Суть данного метода заключается в нахождении отрицательных пиков в фрагментах между точками грубой разметки. На следующем шаге к точкам найденных отрицательных пиков применяется интерполяция второго порядка [1]. После выполненных вычислений определяется ЧОТ для каждого фрагмента:

$$F_0 = \frac{Fs}{P(i) - P(i-1)}, \quad (1)$$

где Fs – частота дискретизации, P – массив индексов отрицательных пиков на каждом фрагменте.

После того, как получено значение ЧОТ, можно приступить к расчету джиттера и шиммера. Джиттер – это мера вариативности периода основного тона, иными словами, он отражает стабильность голоса [2,3]. Измеряется в процентах и вычисляется по следующей формуле:

$$J = \frac{\frac{1}{N-1}\sum_{i=2}^{N}|T_i - T_{i-1}|}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|T_i|}, \quad (2)$$

где N – количество периодов основного тона в анализируемом сигнале, T_i – продолжительность *i*-го периода основного тона.

Шиммер – это мера вариативности амплитуды акустических колебаний в процессе фонации, то есть характеризует изменение амплитуды голоса во времени. Измеряется также в процентах и вычисляется по следующей формуле:

$$S = \frac{\frac{1}{N-L+1}\sum_{i=1+(L-1)/2}^{N-(L-1)/2}|A_i - \frac{1}{L}\sum_{n=i-(L-1)/2}^{i+(L-1)/2}A_n|}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|A_i|}, \quad (3)$$

где N – количество периодов основного тона в анализируемом сигнале, A_i – амплитуда *i*-го периода основного тона, L – количество периодов, используемых для вычисления «скользящего» среднего.

Функционал устройства позволяет записать новый аудиофайл, предварительно указав его имя, или же выбрать уже существующий. После успешной записи (загрузки) файла становится возможным его анализ, по окончании которого выводятся рассчитанные значения ЧОТ, джиттера, шиммера, а также представление сигнала во временной и частотной областях.

Рассчитанные параметры, а также представление сигнала во временной и частотной областях выводятся в графическом интерфейсе. На рисунке 2 показано окно интерфейса приложения и результаты анализа звука \a\.

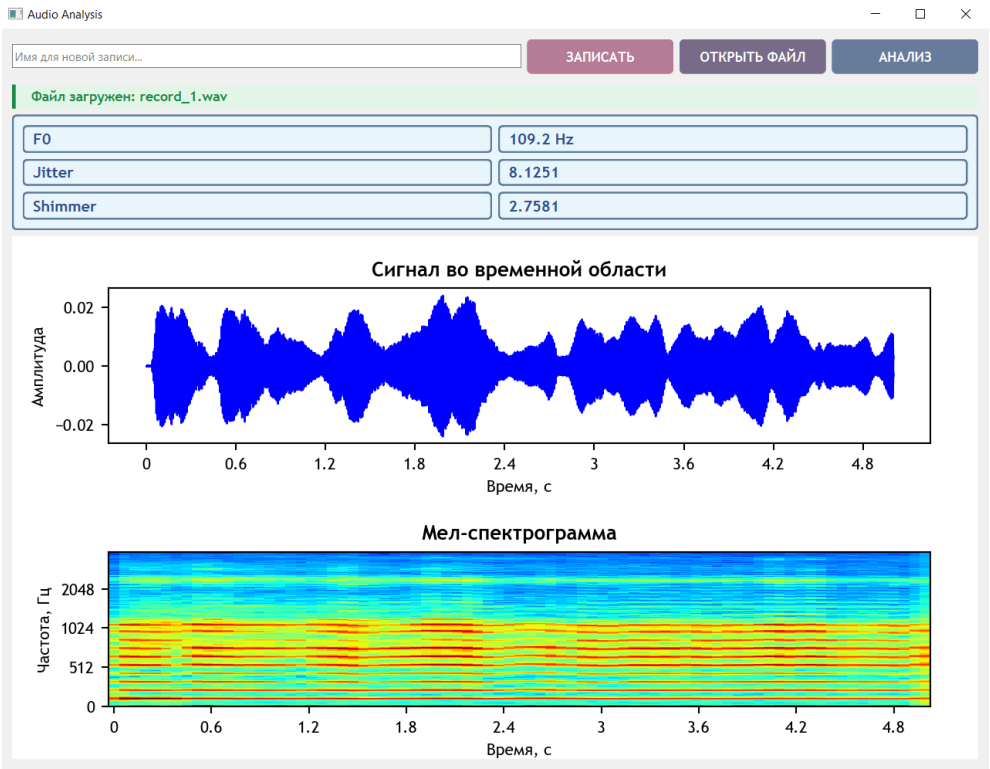


Рисунок 2 – Интерфейс программно-аппаратного комплекса

Представленные в интерфейсе результаты подтверждают корректность работы алгоритмов обработки звука и комплекса в целом, что предоставляет возможность его применения для предварительного скрининга голосовых нарушений.

В процессе разработки программно-аппаратного комплекса были пройдены такие этапы, как создание структуры устройства, разработка его функционала, написание алгоритма программной части, создание графического интерфейса. Результатами работы являются макет устройства, а также рассчитанные параметры и построенные графики, которые отображаются в графическом интерфейсе.

Список использованных источников:

5. Пастернак В. В., Стецко В. Ю. Исследование методов сегментации голосовых сигналов. – 2022.

6. Вашкевич М. И., Рушкевич Ю. Н. Детектирование речевых нарушений у пациентов с БАС на основе анализа голосового сигнала //Цифровая обработка сигналов. – 2019. – №. 4. – С. 33-41.

7. Саламатов К. А., Смирнов А. А. Извлечение формант и других характеристик и классификация состояния здоровья голоса методами машинного обучения //Международный научно-исследовательский журнал. – 2025. – №. 10 (160) S. – С. 1-6.

УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Андруконис М.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Смирнова Н. А. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В данной работе рассматривается проектирование универсального модульного измерительного комплекса, предназначенного для диагностики и ремонта радиотехнической аппаратуры. Комплекс объединяет в себе три независимых функциональных узла: прецизионный частотомер, цифровой вольтметр и измеритель эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) с усиленной защитой. Особенностью разработки является использование независимой модульной архитектуры на базе микроконтроллеров семейства PIC, что обеспечивает высокую надежность, ремонтопригодность и электромагнитную совместимость измерительных каналов.

В основу архитектуры комплекса положен принцип функциональной независимости измерительных каналов. Система объединяет три обособленных модуля:

1. Канал измерения временных параметров реализован на базе микроконтроллера PIC16F628A. Благодаря наличию аппаратных таймеров и внешнего кварцевого резонатора на 16 МГц, модуль обеспечивает измерение частоты до 40 МГц и периода сигнала. Высокое разрешение в низкочастотной области достигается за счет алгоритма измерения длительности периода с последующим математическим пересчетом [1].

2. Канал вольтметрических измерений построен на базе 8-битного микроконтроллера PIC12F675 с использованием встроенного 10-битного аналого-цифрового преобразователя. Входной делитель напряжения позволяет контролировать уровни до 80 В постоянного тока с дискретностью 0,1 В.

3. Канал анализа параметров конденсаторов (C/ESR). Вычислительным ядром является PIC16F873A, работающий в паре с прецизионным операционным усилителем MCP6022. Особенностью блока является аппаратная защита, выдерживающая энергию разряда неразряженных емкостей до 10 Дж и напряжение до 500 В.

Визуализация данных осуществляется посредством четырехразрядных семисегментных LED-индикаторов. Применение светодиодных матриц гарантирует высокую контрастность и широкие углы обзора в лабораторных условиях. С целью минимизации количества используемых портов ввода-вывода микроконтроллеров и снижения энергопотребления, в схемах реализована динамическая индикация [2]. В модуле вольтметра управление разрядами осуществляется через сдвиговый регистр 74HC595, в частотомере – через дешифратор 74HC138. В измерителе C/ESR применена посегментная индикация с прямой адресацией от портов микроконтроллера, что позволило исключить дополнительные транзисторные ключи и резисторы.

В ходе проектирования был проведен комплексный расчет эксплуатационных характеристик устройства. В первую очередь была решена проблема электромагнитной совместимости и взаимного влияния цифровых узлов и чувствительных аналоговых трактов: это достигнуто за счет гальванической развязки и пространственного разделения плат. Для исключения помех по шинам питания в каждом модуле установлены локальные фильтрующие цепи. Помимо этого, была оценена виброустойчивость системы. Расчетная собственная частота печатных плат составила 425 Гц, что полностью исключает возникновение резонансных явлений при воздействии стандартных промышленных вибраций частотой 50 и 100 Гц. Также был выполнен тепловой расчет, показавший, что при суммарном тепловыделении компонентов порядка 0,1 Вт температура внутри корпуса не превышает 50 °C. Это обеспечивает запас по термической надежности более чем в 2,5 раза относительно предельных температур используемой элементной базы.

Разработанный измерительный комплекс подтвердил эффективность модульного подхода к проектированию лабораторного оборудования. Достигнутые показатели надежности (наработка на отказ более 280 000 часов) в сочетании с высокой ремонтопригодностью и доступной стоимостью элементной базы позволяют рекомендовать устройство для широкого внедрения в практику сервисных центров по ремонту радиотехнической аппаратуры и учебных лабораторий.

Список использованных источников:

1. PIC16F627A/628A/648A Data Sheet. 8-pin Flash-based, 8-bit CMOS Microcontrollers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.microchip.com.

2. FYQ-3641AX-00 Datasheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/684105/FORYARD/FYQ-3641AX-00.html.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ХОДОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ НА БАЗЕ ИНТЕРФЕЙСА CAN

Варицкий М.К., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Смирнова Н. А. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В работе представлена аппаратная реализация электронного средства для сбора и визуализации данных транспортного средства в режиме реального времени. Бортовой компьютер функционирует на базе микроконтроллера STM32 и взаимодействует с бортовой сетью по протоколу CAN. В отличие от монолитных аналогов, в данном электронном средстве применена модульная архитектура, что значительно повышает его ремонтопригодность и гибкость модернизации. Внедрение узлов автономного логирования и интерфейса USB-C обеспечивает техническую новизну и эксплуатационное преимущество. Проведенные инженерные расчеты подтверждают высокую надежность и целесообразность производства данного электронного средства.

Бортовой компьютер предназначен для интеграции в цифровую сеть автомобиля с целью мониторинга ходовых параметров работы автомобиля. В ходе анализа существующих аналогов, был выявлен их основной недостаток – монолитная конструкция, затрудняющая ремонт и локальную замену вышедших из строя узлов. Разрабатываемое электронное средство спроектировано по модульному принципу, что упрощает обслуживание системы.

Архитектура бортового компьютера представлена тремя основными модулями: входным модулем выполняющий защиту и сопряжение с CAN-шиной, центральным модулем управления и выходным модулем визуализации. Структурная схема определяет логику взаимодействия через разъем OBD-II.

В то время как функциональная схема детализирует процессы преобразования сигналов от трансивера к микроконтроллеру и периферийным устройствам, она представлена на рисунке 1.

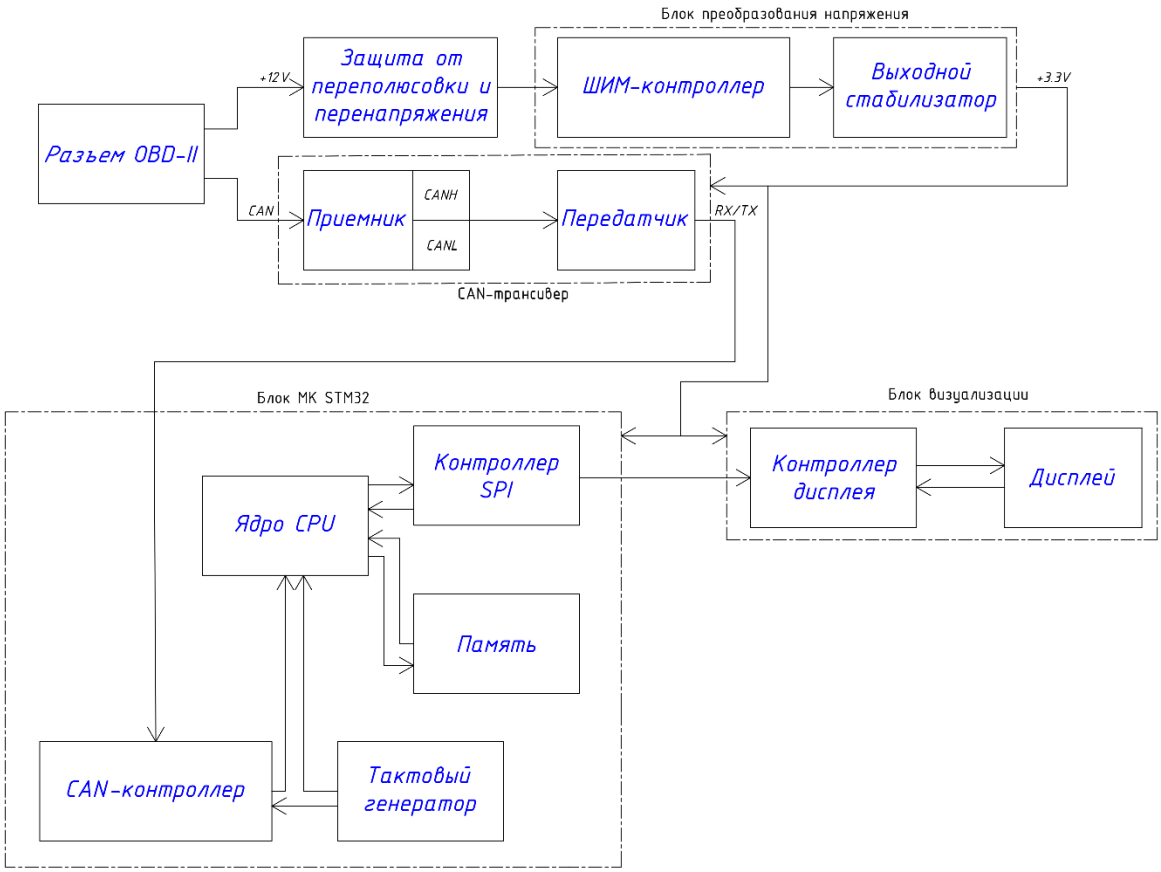


Рисунок 1 – Схема функциональная

Принципиальная схема реализована на современной элементной базе, обеспечивающей высокую точность и быстродействие. Принципиальная схема представлена на рисунке 2.

Центральным узлом электронного средства является микроконтроллер STM32F103, выбранный благодаря высокой производительности ядра ARM Cortex-M3, что критично для обработки потоковых данных CAN-шины в реальном времени. Для обеспечения стабильного питания в условиях

нестабильной бортовой сети (12В) применен импульсный преобразователь на базе микросхемы MP2307. Его высокий КПД минимизирует тепловыделение, а встроенная защита предотвращает повреждение электроники при скачках напряжения в момент запуска двигателя.

Техническая новизна проекта заключается в интеграции узла связи на базе моста USB-UART (CH340) с использованием современного разъема USB Type-C. Это позволяет подключать электронное средство напрямую к смартфону или ПК без переходников. Для обеспечения автономности, исключающей зависимость от внешних гаджетов, в схему включена Flash-память W25Q64 объемом 64 Мбит для хранения логов и высокоточные часы реального времени DS3231 для временной привязки событий. Гальваническая развязка цепей реализована с помощью цифрового изолятора ISO7721, что повышает помехоустойчивость и защищает управляющие цепи. Визуализация данных осуществляется на OLED-дисплее с контроллером SSD1322.

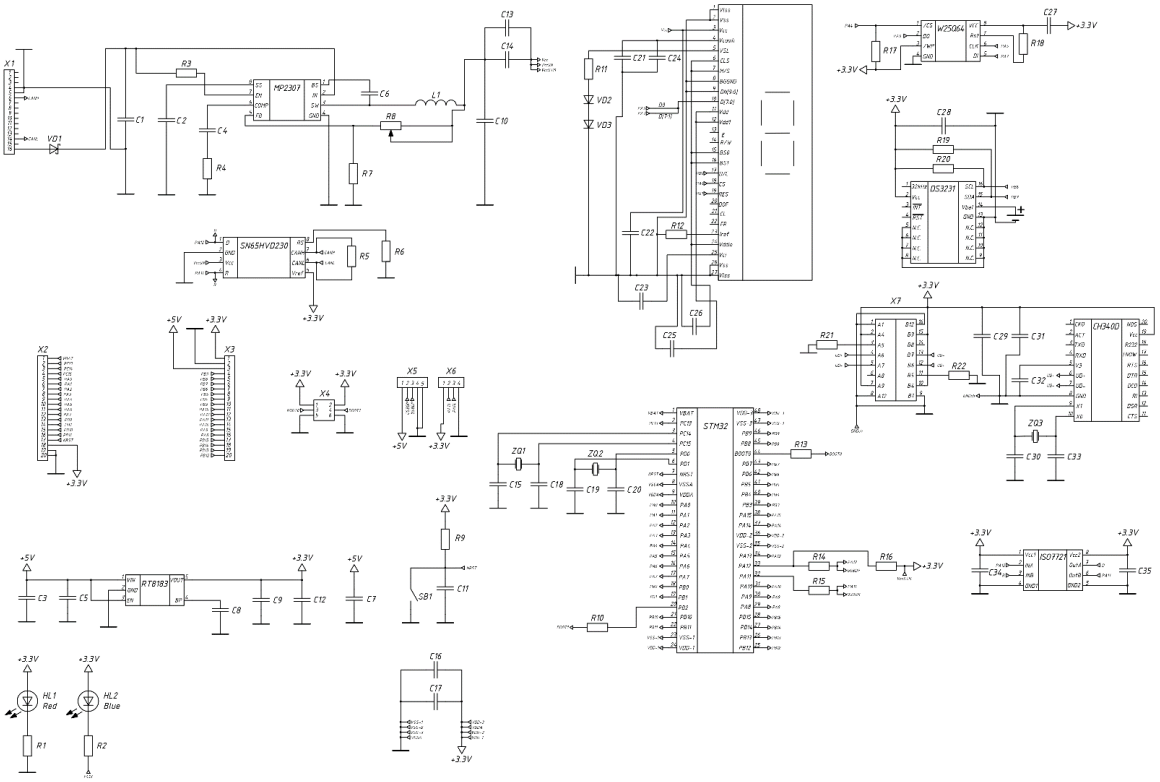


Рисунок 2 – Схема принципиальная

Надежность конструкции электронного средства подтверждена серией контрольных расчетов. Тепловой анализ показал, что максимальная температура внутри корпуса при эксплуатации не превышает 24 °C, что гарантирует стабильность компонентов. Оценка электромагнитной совместимости подтвердила отсутствие необходимости в дополнительном экранировании. Расчет механических воздействий показал, что собственная частота электронного средства находится вне диапазона частот автомобильных вибраций, что исключает резонанс. Итоговый показатель вероятности безотказной работы составляет 0,98. Потенциальными потребителями разработанного электронного средства могут выступать как частные автовладельцы, так и специалисты станций технического обслуживания для проведения углубленной диагностики.

Список использованных источников:

1. Местная контроллерная сеть (CAN) : ГОСТ Р ИСО 11898-1-2015 ; введ. 06.11.2015 – 42 с.

2. Chip&Dip : [сайт]. – Мн., 2006-2026. URL https://www.chipdip.ru/product/stm32f103c8t6-mikrokontroller-32-bit-st-microelectronics-9000099899 Datasheet STM32F103CBT6.pdf (дата обращения: 20.02.2026).

СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ НА БАЗЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА LUCKFOX PICO

Шендик Д.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Вашкевич М.И. – д-р техн. наук, профессор

Работа посвящена разработке программно-аппаратного комплекса для распознавания дорожной обстановки в реальном времени. В качестве вычислительной платформы используется одноплатный компьютер с интегрированным нейронным процессором (NPU). Рассмотрен процесс подготовки специализированного набора данных, обучение модели на легковесной архитектуре YOLOv5n и многоступенчатой конвертации модели для аппаратного ускорения инференса. Приведены результаты распознавания дорожной обстановки и оценка метрик эффективности нейросетевой модели. Разработанное решение ориентированно на интеграцию в современные системы помощи водителю (ADAS).

Введение. Современные системы помощи водителю (ADAS) требуют высокопроизводительной и энергоэффективной обработки визуальных данных в режиме реального времени. Классические подходы, основанные на мощных графических ускорителях (GPU), не применимы во встраиваемых решениях из-за жестких ограничений по габаритам, тепловыделению и энергопотреблению. Решением данной проблемы является переход к использованию специализированных систем на кристалле (SoC) с интегрированными нейронными процессорами (NPU), которые обеспечивают аппаратное ускорение тензорных вычислений при минимальном энергозатратах.

Целью работы является проектирование и программная реализация оптимизированной системы распознавания дорожных знаков на базе платформы Luckfox Pico Max (SoC RV1106). Данная платформа оснащена встроенным NPU с производительностью до 1 TOPS, что позволяет эффективно выполнять задачи компьютерного зрения в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Достижение поставленной цели требует комплексного подхода: от подготовки специализированного набора данных до глубокой аппаратной оптимизации нейросетевой модели под архитектуру выбранного кристалла.

Постановка задачи и обзор набора данных. Система должна локализовывать дорожные знаки в видеопотоке (формировать ограничивающую рамку) и классифицировать их тип. Итоговый результат с наложенной разметкой транслируется в сеть посредством реализованного RTSP-сервера, что позволяет удаленно получать видеопоток с результатами распознавания в реальном времени.

Для обучения модели использовался открытый набор данных RTSD (Russian Traffic Sign Dataset). В ходе подготовки датасет был программно модифицирован под требования целевой архитектуры YOLO и уменьшен с 179138 изображений и аннотации к ним до 59188 изображений – удалены лишние изображения, не имеющие дорожные знаки. Ключевым этапом предобработки стало преобразование абсолютных пиксельных координат рамок в нормализованные относительные значения. Пересчет координат выполняется по формуле (1).

$$x_{norm} = \frac{x_{min} + \frac{w}{2}}{W},\ y_{norm} = \frac{y_{min} + \frac{h}{2}}{H},\ w_{norm} = \frac{w}{W},\ h_{norm} = \frac{h}{H}, \quad (1)$$

где $x_{norm,}\ y_{norm}$ – нормированные координаты центра объекта; $w_{norm,}\ h_{norm}$ – нормированные ширина и высота объекта относительно размеров всего кадра; $x_{min,} y_{min}$ – координаты левого верхнего угла ограничивающей рамки; w, h – ширина и высота ограничивающей рамки в пикселях; W, H – общая ширина и высота всего входного изображения в пикселях.

Данное преобразование делает вычисления независимыми от разрешения исходного кадра. Например, ограничивающая рамка [730, 445, 16, 18] для изображения размером 1280×720 пикселей преобразуется в вектор [0.576563, 0.630556, 0.012500, 0.025000].

Архитектура и обучение модели. В качестве базовой архитектуры была выбрана нейронная сеть YOLOv5n (nano) – наиболее легковесная версия в семействе YOLO. Выбор обусловлен эффективным балансом между количеством параметров и точностью детекции. Архитектурно модель состоит из трех главных компонентов: магистральной сети (Backbone) на базе CSPDarknet для извлечения признаков, связующей части (Neck) на основе PANet для агрегации признаков на разных масштабах и головной части (Head) для генерации итоговых предсказаний классов и координат.

Процесс обучения модели выполняется в среде фреймворка PyTorch с применением метода переноса обучения (Transfer Learning) на основе предобученных весов, на протяжении 100 эпох. Первоначальное обучение проводилось на стандартном разрешении 640×640 пикселей для извлечения максимально точных пространственных признаков объектов. Однако для обеспечения высокой скорости инференса на платформе RV1106 целевая модель была переобучена и

экспортирована для входного разрешения 320×320 пикселей, что кратно снизило нагрузку на аппаратную часть.

Конвертация модели под аппаратную среду. Запуск модели на NPU платформы Luckfox Pico требует специфический формат нейросетевых графов RKNN. Адаптация обученной модели осуществлялась в несколько этапов. Первоначально веса экспортировались в промежуточный стандарт ONNX (Open Neural Network Exchange), затем, с использованием инструментария RKNN-Toolkit2, модель конвертировалась в формат RKNN. Ключевым этапом является пост-тренировочное квантование, которое переводит веса модели из формата чисел с плавающей точкой (FP32) в 8-битный целочисленный формат (INT8). Данное преобразование описывается формулой линейного квантования (2).

$$q = round\left(\frac{f}{S} + Z\right), \tag{2}$$

где f – значение в FP32; q – квантованное значение INT8; $S(Scale)$ – коэффициент масштабирования; $Z(Zero - point)$ – смещение.

Квантование позволяет сократить объем занимаемой памяти в 4 раза и задействовать аппаратные блоки умножения-сложения (MAC) нейропроцессора, что критически важно для достижения real-time производительности на чипе RV1106.

Результаты распознавания и оценка метрик. Эффективность разработанной системы оценивалась на тестовой выборке с использованием стандартный метрик компьютерного зрения. Precision (Точность), Recall (Полнота), mAP@50 (Mean Average Precision).

Метрики модели приведены на рисунке 1.

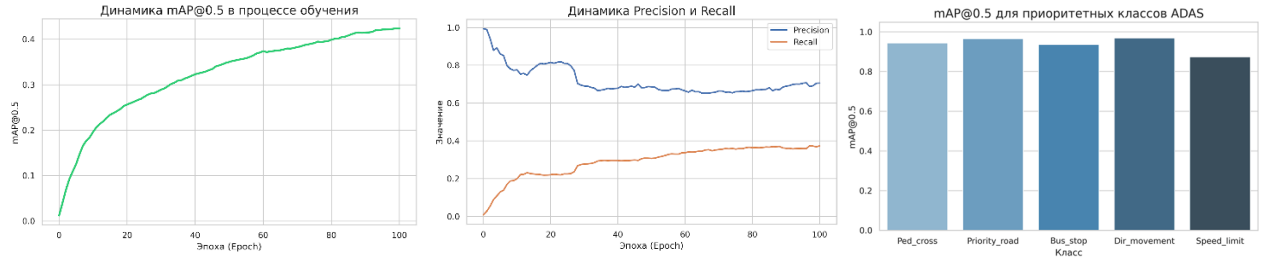


Рисунок 1 – Метрики модели

Результаты распознавания дорожных знаков приведены на рисунке 2.

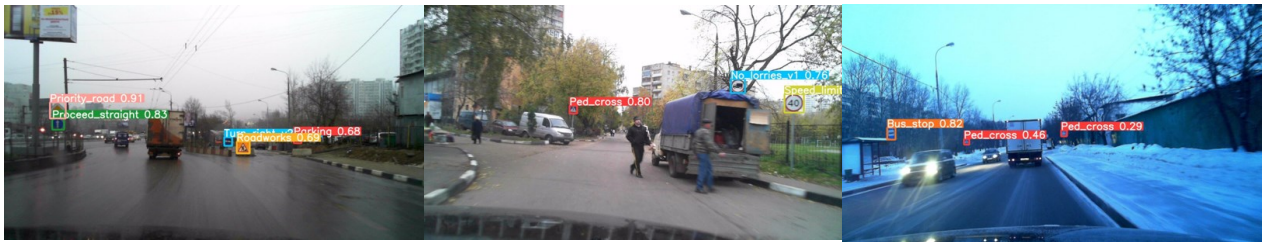


Рисунок 2 – Результаты распознавания дорожных знаков

Заключение. Использование специализированных систем на кристалле с интегрированными нейронными процессорами (NPU) является оптимальным вектором развития автомобильных периферийных вычислений (Edge AI). Применение платформы Luckfox Pico в связке с легковесной архитектурой YOLOv5n обеспечивает высокую энергоэффективность, тепловую стабильность и способность обрабатывать видеопоток в режиме реального времени без привлечения массивных графических процессоров. Ключевым преимуществом данного подхода выступает возможность прямого встраивания нейросетевой аналитики в малогабаритные системы помощи водителю. Дальнейшее повышение качества и надежности распознавания требует сфокусированной работы над обучающей выборкой: в перспективе планируется глубокая доработка используемого датасета за счет синтетической генерации данных, добавления редких классов знаков и включения сцен со сложными погодными условиями.

Список использованных источников:

1. Ultralytics YOLOv5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/ultralytics/yolov5. – Дата доступа: 10.04.2026.

2. Luckfox Pico RV1106/RV1103 SDK [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wiki.luckfox.com/. – Дата доступа: 10.04.2026.

СВЕТОВОЙ МЕЧ НА БАЗЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO

Лобацевич С.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Порхун М.И. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В рамках данной работы рассмотрена разработка интерактивного светового меча на базе аппаратной платформы Arduino Nano. Устройство формирует световые и звуковые эффекты, реагирует на взмахи и удары, поддерживает два режима звукового сопровождения, отображает уровень заряда аккумулятора и обеспечивает защитное отключение при снижении напряжения. В состав системы входят адресная светодиодная лента WS2811, датчик MPU6050, модуль microSD, усилитель PAM8403, динамик и аккумуляторный блок.

Световой меч – устройство, функциями которого являются имитация световых и акустических эффектов клинка с возможностью интерактивного взаимодействия с пользователем.

Разработанное устройство обеспечивает плавное включение и выключение со звуками меча, случайную пульсацию свечения, воспроизведение гудения при работе, реакцию на взмахи и удары, индикацию уровня заряда аккумулятора и автоматическое отключение при критическом снижении напряжения [1].

Структурная схема устройства представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Структура разработанного устройства

Основным управляющим узлом является микроконтроллерная платформа Arduino Nano [2]. На вход контроллера поступают сигналы от кнопки управления и инерциального модуля MPU6050 [3], который фиксирует ускорение и угловую скорость при взмахах и ударах. Модуль microSD используется для хранения аудиофайлов. Световые эффекты формируются адресной лентой WS2811 [4], а звуковое сопровождение воспроизводится через усилитель PAM8403 и динамик [5]. Питание устройства осуществляется от аккумуляторного блока 3×18650 через зарядный узел и DC-DC преобразователь. Контроль напряжения позволяет исключить глубокий разряд аккумуляторов.

Обобщенный алгоритм работы устройства включает:

1. Инициализацию микроконтроллера, датчика MPU6050, карты памяти, светодиодной ленты и аудиотракта, а также измерение напряжения аккумулятора;
2. Включение или выключение клинка по удержанию кнопки с воспроизведением соответствующих светозвуковых эффектов;

3. Анализ данных датчика в основном цикле для формирования режима гудения, звуков взмахов, вспышек и звуков ударов, обновления свечения ленты и контроля питания.

Управление режимами работы устройства осуществляется с помощью кнопки управления. Кратковременное нажатие включает и выключает устройство с воспроизведением соответствующих световых и звуковых эффектов. Удержание кнопки может использоваться для переключения режимов работы.

В процессе работы микроконтроллер анализирует данные инерциального датчика MPU6050, на основе которых формируются звуковые и световые эффекты. При взмахах реализуется воспроизведение звуков различной длительности в зависимости от скорости движения. При ударах генерируется яркая световая вспышка и воспроизводится один из предзаписанных звуков удара, выбираемый случайным образом. В устройстве предусмотрено два режима звукового сопровождения: синтез звука в реальном времени в зависимости от угловой скорости и воспроизведение аудиофайлов с карты памяти microSD.

На рисунке 2 показаны фото разработанного светового меча.

а) *б)* *в)*

Рисунок 2 – Световой меч на базе аппаратной платформы Arduino Nano: *а)* синий цвет свечения; *б)* фиолетовый цвет свечения; *в)* красный цвет свечения

В ходе работы разработан интерактивный световой меч на базе аппаратной платформы Arduino Nano. Устройство обеспечивает формирование световых и звуковых эффектов, реагирует на действия пользователя и контролирует состояние питания. Проведённое макетирование подтвердило корректную работу всех функциональных модулей и стабильность работы системы в целом.

Список использованных источников:

1.Световой меч на Arduino своими руками [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://alexgyver.ru/arduino-lightsaber/

2.Описание платформы Arduino Uno [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf

3.Описание модуля датчика движения MPU-6050 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/mortion-inertial/imu/data_sheet/mpu-6000-datasheet1.pdf

4.Описание адресной ленты WS2811 LED Driver [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://suntechlite.com/ws2811-datasheet-pdf-download/

5.Описание усилителя PAM8403 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.diodes.com/datasheet/download/PAM8403.pdf

СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА БАЗЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ESP32 LYRA

Лобацевич С.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Порхун М.И. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В рамках данной работы рассмотрена система подавления акустической обратной связи в аудиотракте на основе адаптивного алгоритма NLMS. Выполнено моделирование эффекта акустической обратной связи и его компенсации в среде Matlab, проведён анализ временных и спектральных характеристик сигналов, а также подготовлена аппаратно-программная база для последующей реализации алгоритма в реальном времени на платформе ESP32-LyraT.

Система подавления акустической обратной связи — это программно-аппаратная система, предназначенная для уменьшения или устранения паразитного сигнала, возникающего при передаче части выходного сигнала акустической системы обратно на вход микрофона. Возникновение акустической обратной связи приводит к появлению узкополосного свиста, искажению полезного сигнала и снижению устойчивости системы. Поэтому задача её подавления является актуальной для аудиотрактов, слуховых аппаратов, переговорных устройств и встраиваемых аудиосистем [1].

Структурная схема алгоритма представлена на рисунке 1.

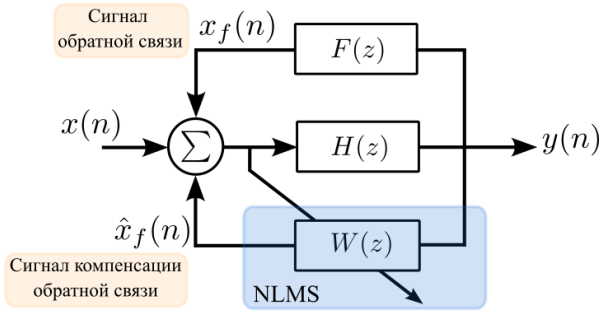


Рисунок 1 – Структура разработанного алгоритма

Структурно система включает входной сигнал *x(n),* тракт обработки *H(z),* путь акустической обратной связи *F(z)* и адаптивный фильтр *W(z).* Здесь *F(z)* описывает путь, по которому часть выходного сигнала снова попадает на вход системы, *H(z)* соответствует основному тракту обработки и усиления сигнала, а *W(z)* является адаптивным фильтром, который формирует оценку сигнала обратной связи для его последующей компенсации. Часть выходного сигнала через акустический канал снова попадает на вход и образует паразитную составляющую. Для её подавления используется адаптивный FIR-фильтр, который оценивает сигнал обратной связи и вычитает его из входного сигнала, формируя компенсированный сигнал [1]–[3].

Идея компенсации может быть записана в виде [1]–[3]:

$$x_{in}(n) = x(n) + x_f(n) - \hat{x}_f(n), \tag{1}$$

где $x(n)$ – полезный входной сигнал, $x_f(n)$ – сигнал акустической обратной связи, а $\hat{x}_f(n)$– его оценка, формируемая адаптивным фильтром. Чем точнее оценивается паразитный компонент, тем эффективнее работает компенсация и тем выше устойчивость системы.

В работе был использован алгоритм NLMS. Его выбор обусловлен сравнительно простой реализацией, устойчивостью и невысокой вычислительной сложностью, что особенно важно при последующем переносе алгоритма на встраиваемую платформу [1], [3]. На каждой итерации формируется сигнал ошибки как разность между текущим входным сигналом и оценкой сигнала обратной связи, после чего коэффициенты адаптивного фильтра корректируются по следующему выражению [1], [3]:

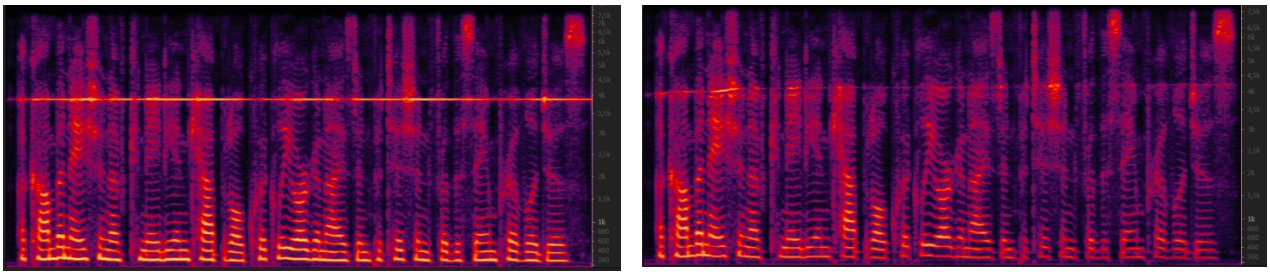
$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{y^T(n)y(n) + \delta} e(n)y(n), \tag{2}$$

где $w(n)$ – вектор коэффициентов адаптивного фильтра, μ – шаг адаптации, $e(n)$ сигнал ошибки, $y(n)$ – вектор отсчётов сигнала, ε – малый положительный параметр, предотвращающий деление на ноль. Таким образом, алгоритм NLMS позволяет подстраивать модель пути обратной связи в процессе работы системы и уменьшать уровень паразитной составляющей.

На первом этапе была построена модель системы подавления акустической обратной связи в среде Matlab. Для моделирования использовались речевой сигнал и импульсная характеристика пути

обратной связи из открытого набора данных RWTH Aachen [6]. На их основе была реализована модель, воспроизводящая возникновение акустической обратной связи и её компенсацию с помощью адаптивного фильтра NLMS. В ходе экспериментов подбирались параметры адаптации и исследовалась работа системы при различных значениях коэффициента усиления.

Результаты показаны на рисунке 2:



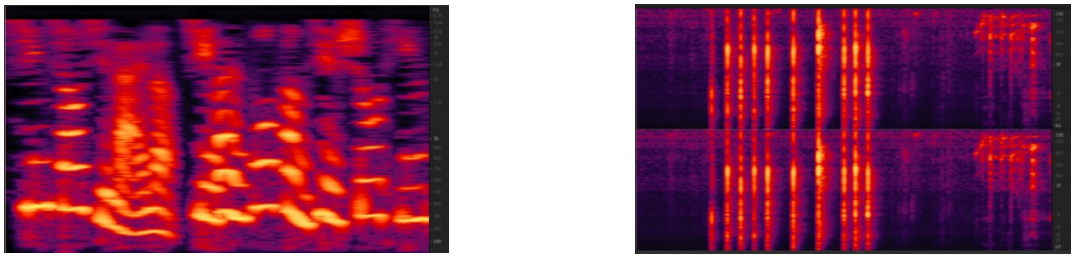
а) *б)*

Рисунок 2 – Спектрограммы выходного сигнала: *а)* без компенсации акустической обратной связи; б) при использовании NLMS (коэффициент усиления равен 100)

Анализ полученных спектрограмм показал, что без компенсации в выходном сигнале наблюдается выраженная узкополосная составляющая, характерная для акустической обратной связи. При использовании адаптивного компенсатора на основе NLMS интенсивность данной составляющей уменьшается, а работа системы становится более устойчивой.

На следующем этапе была начата подготовка платформы для реализации алгоритма в реальном времени. В качестве основы использована плата ESP32-LyraT, предназначенная для разработки аудиоприложений в составе фреймворка ESP-ADF. В процессе работы были успешно реализованы и протестированы два базовых режима: запись звукового сигнала на карту памяти microSD и вывод аудиосигнала в наушники. Полученные результаты подтвердили работоспособность звукового ввода и вывода и показали возможность дальнейшей интеграции алгоритма подавления акустической обратной связи в режим обработки [4], [5].

Результаты тестирования показаны на рисунке 3:



а) *б)*

Рисунок 3 – Спектрограммы сигнала на платформе ESP32-LyraT: а) вывод звука в наушники; б) запись сигнала на SD-карту

В ходе выполнено моделирование системы подавления акустической обратной связи на основе алгоритма NLMS, получены временные и спектральные характеристики сигналов, подтверждающие работоспособность выбранного подхода, а также подготовлена аппаратно-программная основа для последующей реализации на платформе ESP32-LyraT. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем переносе модели из Matlab на встраиваемую систему реального времени [1]–[5].

Список использованных источников:

1. Вашкевич, М. И. Косинусно-модулированные банки фильтров с фазовым преобразованием: реализация и применение в слуховых аппаратах / М. И. Вашкевич, И. С. Азаров, А. А. Петровский. – Минск : БГУИР, 2014. – 210 с.

2. Вашкевич, М. И. Подавление эффекта акустической обратной связи в слуховых аппаратах с использованием неравнополосного банка фильтров / М. И. Вашкевич, И. С. Азаров, А. А. Петровский // Информатика. – 2012. – № 2(34). – С. 50–60.

3. Akhtar, M. T. Howling and Entrainment in Hearing Aids: A Review / M. T. Akhtar, A. Nishihara // Engineering Journal. – 2016. – Vol. 20, Issue 5. – P. 5–13.

4.Espressif Audio Development Framework Guide [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://docs.espressif.com/projects/esp-adf/en/latest/esp-adf-en-master.pdf

5. ESP-ADF examples: recorder and CLI examples [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/espressif/esp-adf/blob/release/v2.x/examples/README.md

6.Paths for Active Noise Cancellation Development and Research [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.iks.rwth-aachen.de/en/research/tools-downloads/databases/paths-for-active-noise-cancellation-development-and-research/

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИНТЕЗАТОРА МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Лавинецкая П.В., Протасевич А.В., Бельский К.Ю., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Порхун М.И. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В работе рассматривается реализация системы синтеза музыкальных инструментов на основе таблично-волнового метода (wavetable synthesis). В качестве аппаратной платформы выбран микрокомпьютер Raspberry Pi, обеспечивающий необходимую вычислительную мощность для обработки цифровых аудиосигналов в реальном времени. В ходе работы реализовано программное управление синтезом с использованием MIDI-интерфейса.

Синтез музыкальных инструментов представляет собой процесс формирования звуковых сигналов, имитирующих тембры реальных инструментов или создающих новые звуковые структуры. Одним из наиболее эффективных методов цифрового синтеза является сэмплирование, при котором звук формируется на основе заранее записанных фрагментов (сэмплов), хранящихся в виде таблиц волновых форм. Такой подход позволяет достичь высокой реалистичности звучания при сравнительно невысоких вычислительных затратах.

Структурная схема устройства представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Структура разработанного устройства

В качестве программной основы синтеза используется движок FluidSynth [2], выполняющий функции генерации и обработки звуковых сигналов. Источником тембров являются банки звуков формата SoundFont (.sf2), представляющие собой структурированные наборы сэмплов с параметрами их воспроизведения [5].

Взаимодействие пользователя с системой осуществляется через полноразмерный MIDI-контроллер M-Audio Keystation 88 MK3 [3], подключенный по интерфейсу USB-HID. Выбор данного устройства обусловлен наличием 88 клавиш с динамической чувствительностью (velocity), что критически важно для корректного синтеза фортепианных тембров и управления артикуляцией звука.

Программная логика устройства разработана на языке Python. Для захвата, фильтрации и маршрутизации входящего MIDI-потока использована специализированная библиотека Mido [4]. Скрипт в реальном времени анализирует события нажатия клавиш, работу колес Pitch Bend и Modulation, после чего транслирует их в команды для синтезатора.

Ниже приведен обобщенный алгоритм работы системы:

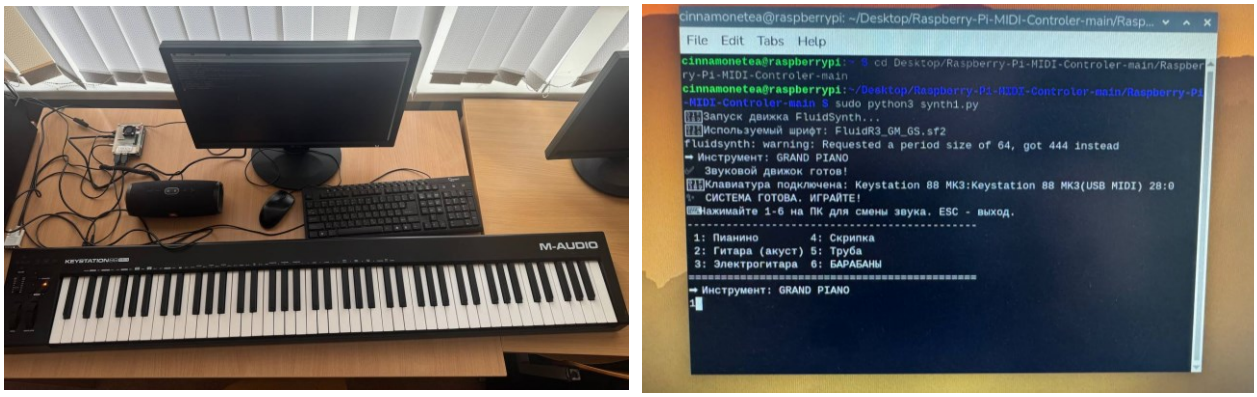
1. Инициализация системы (загрузка SoundFont, запуск синтезатора, настройка MIDI).
2. Приём MIDI-сообщений от контроллера.
3. Декодирование параметров (нота, сила нажатия, управляющие команды).
4. Генерация аудиосигнала на основе соответствующих сэмплов.
5. Вывод звука через аудиоустройство в реальном времени.

Разработанная система обеспечивает воспроизведение широкого спектра музыкальных инструментов, высокое качество звучания и низкую задержку отклика. Использование платформы Raspberry Pi позволяет реализовать компактное и энергоэффективное решение, сопоставимое по функциональности с коммерческими цифровыми синтезаторами.

Управление параметрами синтезатора (рисунок 4, а) реализовано через консольный интерфейс. Выбор группы инструментов осуществляется переключением пресетов с помощью клавиш 1–6 на клавиатуре ПК. В окне терминала в реальном времени отображается лог инициализации системы: запуск звукового движка FluidSynth, путь к загруженному банку SoundFont и статус подключения MIDI-контроллера Keystation 88 MK3.

При смене инструмента в консоль выводится уведомление с названием активного тембра (например, "GRAND PIANO"), что позволяет визуально контролировать состояние системы без использования графической оболочки. Общий вид собранного аппаратно-программного комплекса на

базе Raspberry Pi представлен на рисунке 4, б. Данная конфигурация обеспечивает минимальную задержку звука и высокую стабильность работы за счет отсутствия лишних графических процессов.



а) *б)*

Рисунок 2 – Программная и аппаратная реализация: а) общий вид аппаратно-программного комплекса в сборе б) консольный интерфейс управления с текстовым меню выбора инструментов.

В ходе работы была успешно реализована система программного управления синтезом музыкальных инструментов на базе микрокомпьютера Raspberry Pi. Макетирование подтвердило, что использование движка FluidSynth в сочетании с языком программирования Python и библиотекой Mido позволяет достичь высокого качества звучания и минимальной задержки при обработке аудиосигналов в реальном времени.

Разработанный консольный интерфейс обеспечил стабильную работу системы и удобную навигацию между пресетами инструментов. Интеграция с профессиональным MIDI-контроллером M-Audio Keystation 88 MK3 позволила реализовать полноценную динамическую чувствительность клавиш (velocity) и управление эффектами через Pitch Bend и Modulation, что критически важно для выразительного исполнения. Применение SoundFont-технологии сделало систему универсальной, позволяя быстро расширять библиотеку тембров без изменения программного кода.

Таким образом, созданный аппаратно-программный комплекс является компактной, энергоэффективной и бюджетной альтернативой коммерческим цифровым синтезаторам, обеспечивая при этом гибкость настройки и высокую производительность, достаточную для использования в образовательных и творческих целях.

Список использованных источников:

1.Описание платформы Raspberry Pi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.raspberrypi.com/documentation/

2.Документация программного синтезатора FluidSynth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.fluidsynth.org/api/

3.Спецификация MIDI-контроллера M-Audio Keystation 88 MK3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.m-audio.com/keystation-88-mk3

4.Работа с MIDI в Python при помощи библиотеки Mido [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mido.readthedocs.io/

5.SoundFont 2.04 Technical Specification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.swatit.de/pdfs/sfont2.pdf

АКУСТИЧЕСКИЙ МОДЕМ: ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Падневич Д.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лихачёв Д.С. – канд. техн. наук, доцент

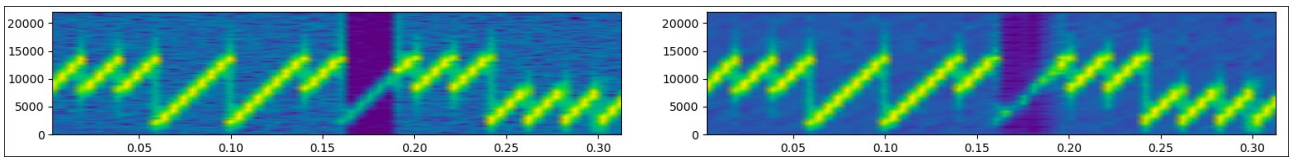
В работе рассматривается реализация свёрточной нейронной сети для обнаружения аномалий и искажений в ЛЧМ-сигналах. Обоснован выбор гибридной архитектуры нейронной сети, основанной на двух моделях. Описан алгоритм моделирования помех в канале передачи. Разработка, обучение и оценка эффективности производились на языке Python с использованием библиотек PyTorch, NumPy и SciPy.

Традиционно, акустические модемы применяются в средах, где использование классических средств связи невозможно. Однако, из-за природы акустического канала, используемого для передачи данных, в нем могут возникать различные виды аномалий. Классические методы цифровой обработки сигналов, применяемые в акустических модемах, опираются на адаптивную фильтрацию и жёстко заданные математические модели канала. Данный подход требует высоких вычислительных мощностей и не всегда способен реагировать на сложные помехи, что приводит к снижению качества связи. Использование машинного обучения позволяет устройству самостоятельно выявлять сложные искажения в структуре сигнала, отличая допустимые шумы от критических дефектов. В ходе данной работы была разработана гибридная система обнаружения аномалий, решающая многие вышеописанные проблемы.

Для генерации обучающих и тестовых данных была разработана программная модель акустического канала связи. Базовый формирователь сигнала использует линейную частотную модуляцию. Логическому нулю соответствует символ с падающей частотой, а логической единице – с возрастающей. Основой симуляции реальной среды акустического канала стало добавление к сигналу гауссовского шума с заданным значением SNR, выраженным в децибелах. Также был разработан модуль вставки в модулированный сигнал локальных аномалий, применяющихся не ко всему кадру целиком, а к случайно выбранному сегменту, составляющему от 10% до 20% от общей длины сигнала.

В процессе проектирования, было выявлено, что использование только одной области анализа не позволяет с достаточной точностью обнаружить весь тестируемый список аномалий. Так, анализ двумерных спектрограмм отлично справлялся с выявлением частотных сдвигов и сильных зашумлений, однако, ввиду использования оконного преобразования Фурье, теряется фазовая информация. Анализ одномерного(сырого) сигнала же, напротив, хорошо выявляет клиппинг, эхо и фазовые искажения. Для компенсации этих недостатков, была разработана гибридная архитектура, состоящая из двух параллельно работающих свёрточных автоэнкодеров.

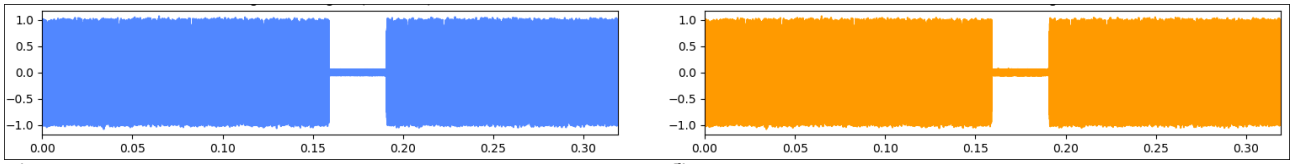
Модель двухмерного автоэнкодера принимает на вход нормированные матрицы спектрограмм и предназначена для выявления частотных аномалий. Энкодер состоит из трёх последовательных сверточных слоёв с ядром 3 на 3 и шагом 2. Количество фильтров постепенно увеличивается с 16 на первом слое до 32 на втором, а затем 64 на третьем. Декодер же использует слои транспонирующей свертки для восстановления исходного разрешения. Также используется функция ReLU, а на выходном слое – Sigmoid, что обеспечивает масштабирование восстановленных данных в диапазоне [0, 1]. На рисунке 1 представлены входные и выходные спектрограммы двухмерной модели.



а б

Рисунок 1 – Спектрограммы: а - исходная; б – восстановленная

Модель одномерного автоэнкодера ориентирована на работу с одномерными временными последовательностями. Архитектура энкодера построена на трех слоях одномерных сверток с ядром размером 7 и шагом 2. Аналогично двухмерной модели, количество фильтров увеличивается постепенно с 16 до 64. Декодер функционирует аналогично вышеописанному, за исключением отсутствующей функции Sigmoid, убранной за ненадобностью. На рисунке 2 представлены сигналы на входе и выходе одномерной модели.



а) *б)*

Рисунок 2 – График сигнала: а) - исходного; б) – восстановленного

Для обучения нейронных сетей был использован набор данных, состоящий из 10000 последовательностей, каждая из которых содержала 16 бит информации. В обучающую выборку был добавлен гауссовский шум с фиксированным значением SNR в 30 децибел. Сделано это было для того, чтобы обучить автоэнкодеры игнорировать фоновый шум, принимая его за нормальное состояние акустического канала.

Перед подачей данных на входы нейронных сетей, выполнялась их предварительная обработка. Для двухмерного автоэнкодера, сигналы преобразовывались в спектрограммы с частотой дискретизации 44100 Гц и размером окна в 256 отсчётов. Полученные матрицы приводятся в диапазону [0, 1], требуемому для корректной работы функции активации Sigmoid. Для одномерной модели, исходный сигнал разбивался на кадры в 256 отсчётов, сохраняющие во временной области исходную амплитуду.

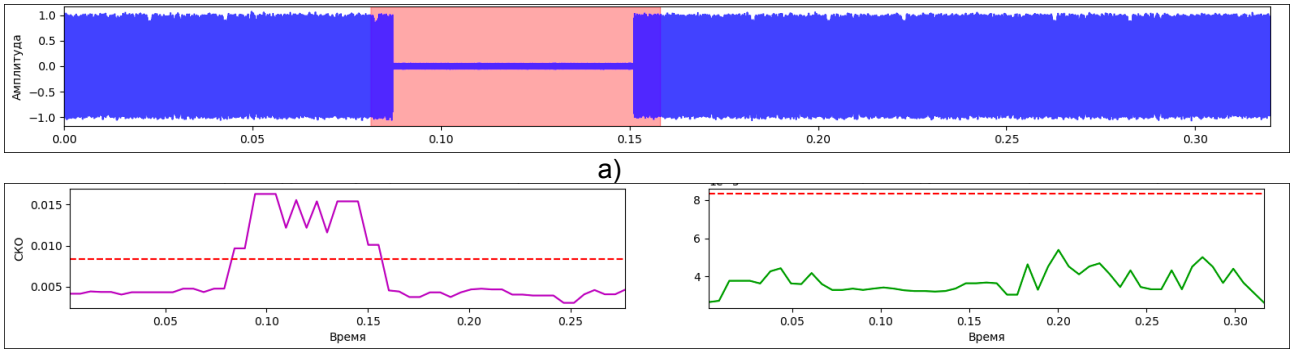
Обучение проводилось в течении 50 эпох. В качестве оптимизатора использовался Adam, а минимизируемой функцией потерь являлась среднеквадратичная ошибка.

Для оценки эффективности обученных моделей, была использована тестовая выборка, содержащая сигналы с различными типами аномалий, не использованными в процессе обучения. Оценка проводилась по значению среднеквадратичной ошибки. При подаче на вход сигналов, не содержащих ошибок, модели успешно их восстанавливают. Однако при обнаружении аномалии, модель не может с точностью восстановить сигнал, вследствие чего показатель среднеквадратичной ошибки на участке резко повышался. Для расчёта порогового значения ошибки, была использована формула:

$$T = \mu + 4\sigma, \tag{1}$$

где T – порог СКО, μ – среднее значение ошибки реконструкции, σ – среднее отклонение ошибки реконструкции.

На рисунке 3, представлены результаты работы детектора и сравнение ошибки реконструкции между двумя моделями. Исходные данные – ЛЧМ-сигнал с аномалией «кратковременное затухание».



а)

б)

Рисунок 3 – Результат работы детектора: а) – обнаруженная аномалия; б) – сравнение ошибки реконструкции между моделями

Результаты тестирования и анализ графиков СКО подтверждают эффективность разработанной архитектуры. В отличии от одиночных моделей и других подобных решений, гибрид из двух автоэнкодеров обеспечивает более широкое покрытие спектра аномалий. Реализованный подход демонстрирует высокую адаптивность и позволяет выявлять сложные искажения акустического канала без необходимости их предварительного математического описания.

Список использованных источников:

1. Документация библиотеки PyTorch [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.pytorch.org/docs/stable/index.html

2. Стивенс, Э. PyTorch. Освещая глубокое обучение / Э. Стивенс, Л. Антига, Т. Виман. – СПб. : Питер, 2022. – 576 с.

3. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение : учеб. пособие / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 652 с.

СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦИФРОВОГО КАНАЛА РЕЧЕВОЙ СВЯЗИ

Вашкевич И.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Азаров И.С. – д-р. техн. наук, профессор

В работе описывается система, позволяющая предположить какой из двух данных аудио-потоков является оригиналом, а также методы их сжатия путём оценки ряда относительных характеристик, используя известные особенности популярных кодеков и полученную в процессе исследования базу данных.

Сегодня большинство аудио-потоков в сети интернет передаются при помощи кодеков сжатия с потерями. Это означает, что аудио-потоки могут быть сжаты несколько раз, что вызывает деградацию. Чтобы уменьшить вероятность использования записей низкого качества или определить вероятность вмешательства в сообщения речевого канала связи, например, склеек и ретрансляций, нужна система оценки качества цифрового канала без опоры на психоакустическую модель человека.

Алгоритм выполняется в несколько этапов: подготовка сигнала, анализ и работа с базой данных.

Подготовка состоит из загрузки двух аудиофайлов и их преобразования в формат WAV с использованием программы *FFmpeg*, преобразование выполняется в монофонический аудио-сигнал с частотой дискретизации 44,1 кГц.

Синхронизация сигналов выполняется методом кросс-корреляции, позволяющим определить временной сдвиг между сигналами. После этого сигналы выравниваются по времени и обрезаются до общей длины. Нормализация громкости выполняется в частотной области на основе кратковременного преобразования Фурье. Для каждого сигнала вычисляется спектральное представление, затем определяется общая частотная полоса, в которой оба сигнала обладают значимой энергией. В этой полосе рассчитывается среднеквадратичная энергия для сигналов (*RMS*), после чего вычисляется коэффициент усиления на основе отношения полученных энергий. Такой подход минимизирует влияние потерь энергии, возникающих при сжатии с потерями.

Следующим этапов является анализ относительных характеристик двух аудио-сигналов. Сначала определяется временная маска, отражающая эффект маскировки. Для этого анализируется разностный сигнал, для которого вычисляется огибающая через скользящее *RMS*-окно:

$$E(n) = \sqrt{\frac{1}{W}\sum_{k=0}^{W-1} d[n-k]^2}, \tag{1}$$

Резкие изменения огибающей выявляются через её производную и пороговое значение, используя среднее и стандартное отклонение производной. Обнаруженные сегменты соответствуют кратковременным энергетическим всплескам, за которыми могут следовать затишья, характерные для временного эффекта маскировки [1]. Эти области исключаются из дальнейшего анализа маской.

Далее выполняется спектральный анализ. Для этого вычисляется отношение полных энергий спектра, а затем распределение энергии по частотам каждого сигнала:

$$E(f) = \frac{1}{T}\sum_{t} |X(f,t)|^2, \tag{2}$$

Также находится характеристика на основе пересечения энергий спектров:

$$I = \frac{\sum_f min(\,E_a(f), E_b(f))}{\sum_f E_a(f)}, \tag{3}$$

Помимо интегральных характеристик, дополнительно анализируется форма спектра. Для этого вычисляется отношение энергии в верхнем диапазоне частот (выше 10 кГц) и частота спектрального спада, отношение этих частот для двух сигналов позволяет оценить потерю высокочастотной составляющей. Частота спектрального спада определяется как минимальная частота, при которой накапливается заданная доля энергии сигнала:

$$\sum_0^{f_r} E(f) \geq p \cdot \sum E(f), \tag{4}$$

где p принимаем равным 0.95. Дополнительно спектр разбивается на несколько диапазонов (низкие, средние и высокие частоты), в которых вычисляются относительные изменения энергии. Локальный анализ повышает вероятность выявить характерные искажения, вносимые кодеками сжатия.

На следующем этапе вычисляются ошибки спектрального представления. Амплитудная ошибка определяется как взвешенное среднеквадратичное отклонение модулей спектра:

$$E_{amp} = \sqrt{\frac{\sum_f w(f) \cdot \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(|X_a(f,t)| - |X_b(f,t)|)^2}{\sum_f w(f)}} \quad (5)$$

где $w(f) = min(E_a(f), E_b(f))$. Фазовая согласованность оценивается через когерентность:

$$C_{ab}(f) = \frac{|P_{ab}(f)|^2}{P_{aa}(f) \cdot P_{bb}(f)}, \quad (6)$$

Результат оценки когерентности сохраняется как взвешенное среднее:

$$C = \frac{\sum_f w(f)\, C_{ab}(f)}{\sum_f w(f)}, \quad (7)$$

В качестве дополнительной асимметричной характеристики используется отношение энергий сигналов. Данная метрика основана на предположении, что кодек с потерями не способен значительно изменить энергию сигнала, а значит она может служить индикатором потери информации или общих искажений.

После извлечения признаков формируется массив характеристик, который может быть сохранён в базе данных вместе с метаданными (тип кодека и битрейт). В противном случае производится поиск наиболее близких записей. Для этого используется взвешенное нормализованное евклидово расстояние:

$$D = \sqrt{\sum_k w_k \left(\frac{x_k - y_k}{|x_k| + \epsilon}\right)^2}, \quad (8)$$

где w_k – веса признаков. Наибольший вклад в расстояние вносят характеристики спектрального покрытия и высокочастотных искажений. Поиск осуществляется по принципу ближайших соседей, и пользователю выводятся три наиболее вероятных варианта преобразования.

Для оценки эффективности алгоритма была собрана база данных на основе 3-ёх различных образцов длительностью около одной минуты в 4-ёх распространённых битрейтах (от англ. *bit rate*) и двух кодеках, комбинируя до двух преобразований на образец (например, из *WAV* в *MPEG-1 Layer 3*, а затем в *OGG Vorbis*), исключая повышение битрейта в комбинации. Тестирование было проведено на отличных образцах в таких же комбинациях параметров.

В результате тестирования алгоритм смог верно определить параметры 21 из 24 тестовых образцов в тесте без комбинирования 41 из 144 с комбинациями. Данный результат говорит о наличии потенциала у подобных систем, однако ручной подбор весов и низкая эффективность некоторых признаков означают необходимость дальнейшей доработки алгоритма для получения более точных результатов.

Список использованных источников:

1. Основы психоакустики. Слуховая маскировка [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://web.archive.org/web/20051102163622/http://www.625-net.ru/archive/z0200/3.htm

2. Vorbis I specification [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://xiph.org/vorbis/doc/Vorbis_I_spec.html

3. The Theory Behind Mp3. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://reynal.etis-lab.fr/docs/audio-sia/tp/tp_mp3/mp3_theory.pdf

4. Signal Processing Course. Chapter 7 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/~wpenny/course/array.pdf

СБОРКА ИГРОВОГО ДВИЖКА ДЛЯ ОС WINDOWS 95

Вашкевич И.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Порхун М.И. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В работе описываются необходимые требования для сборки и тестирования игрового движка для компьютеров эпохи 90-ых и операционной системы Microsoft Windows 95 в частности, затрагивая ключевые отличия, с которыми столкнётся современный разработчик.

Вычислительные системы неумолимо устаревают морально и физически, однако год за годом находятся энтузиасты, что дают им новую жизнь. По этой причине перенос (портирование, от англ. *porting*) и написание нового программного обеспечения для официально неподдерживаемых платформ остаётся актуальной задачей. Так как устаревшие персональные компьютеры и их операционные системы не поддерживаются крупными разработчиками, они требуют особого подхода при разработке. Игровые движки же создаются специально для абстрагирования от платформы, что удобно при портировании. По этим причинам особенности разработки и сборки современного программного обеспечения для операционной системы *Windows 95* будет рассмотрено на примере игрового движка.

ОС *Windows 95* была выпущена в 1995-ом году *Microsoft* и привнесла многие функции и возможности, которыми мы пользуемся по сей день, включая поддержку 32-разрядных приложений и вытесняющую многозадачность, что делает её одной из старейших систем, для которых современные компиляторы, в теории, могут собирать приложения. На момент актуальности системы наиболее популярными были процессоры *Pentium*, что лишает нас инструкций *MMX* и *SSE*, представленных позже. Видеоадаптеры того времени умели отрисовывать лишь двухмерную графику, а первые трёхмерные игры полагались на процессор целиком. Однако уже годом позже вышел первый трёхмерный ускоритель, попавший к обычным пользователям: *3Dfx Vodooo* с графическим *API Glide.* Такой ускоритель ставился вместе с двухмерной видеокартой. Звуковые карты почти не изменились.

Таким образом, выбор ПО для портирования ограничен, так как необходимо низкое потребление памяти и процессора, а также *Glide*-совместимый отрисовщик. Однако в 1996-ом появился *OpenGL 1.1*, который распространился благодаря выходу аппаратно ускоренной версии игры *Quake* на нём, что привело к появлению прослоек совместимости *MiniGL* от *3Dfx* и *MesaFX* от проекта *Mesa*. Остаётся лишь найти движок с открытой лицензией, работающий с *OpenGL 1.1.*

Игровой движок *Godot* (читается “Годо”, от фр. *Godot*) изначально был проприетарным программным обеспечением Хуана Линиецкого и Ариэля Манзура и лицензировался другим разработчикам, находясь в таком состоянии с 2007 по 2014 год. После этого он вышел под открытой лицензией *MIT*, благодаря чему оброс большим сообществом. Движок работает с двухмерной и трёхмерной графикой и успел претерпеть множество изменений, однако только версия 1.0 унаследовала *OpenGL 1.3* отрисовщик, благодаря чему идеально подходит под поставленную задачу.

Далее необходимо найти комплект с компилятором, однако большинство готовых решений без модификаций не соберут программу совместимую с *Windows 95.* За основу взяты компилятор *GCC* версии 12 проекта *GNU* и библиотеки для разработки под *Windows* проекта *MinGW* версии 13.

В комплекте разработки для *Windows 95* необходимо предотвратить использования вызовов из более новых версий ядра. Одним из таких является *InterlockedCompareExchange.* Более ранние версии *GCC* включали вариант для старых версий *Windows* использующий *x86* инструкцию *xchg*. С помощью заплатки [1] секция исходного кода возвращается. Также требуется собирать компилятор для работы с *Microsoft Visual C Runtime 6* (*MSVCRT6*) [2], так как новые библиотеки, предоставляющие стандартные функции *C* и *C++*, тоже используют новые вызовы ядра. По этой причине отключается использование функций *at_quick_exit()* и *quick_exit()* в библиотеке *libstdc++-v3* из *GCC* заплаткой на файл конфигурации [1]. Большая же часть подобных вызовов производятся из библиотеки *pthreads* в *MinGW,* реализующей потоки, поэтому применяется реализация из *GCC* под названием *threads_win32.* Также выставляется целевая архитектура *Pentium* с помощью *$TARGET=i586-w64-mingw32*. Конфигурация приведена на рисунке 1.

```
../gcc-*/configure \
 --target="$TARGET" \
 --prefix="$PREFIX" \
 --disable-multilib \
 --enable-languages=c,c++ \
 --enable-threads=win32
make all-gcc -j$(nproc)
make install-gcc
```

Рисунок 1 – Конфигурация *GCC*

Стоит заметить, что данная реализация потоков поменялась в *GCC 13* и больше не подходит под поставленную задачу [3].

Далее собирается заголовочные файлы *mingw-w64-headers* и библиотеки *mingw-w64-crt* из *MinGW* с помощью полученного ранее минимального компилятора *GCC*, затем собирается *GCC* вместе с полученными библиотеками с помощью *make install*. Итоговый комплект разработки находится по пути *$PREFIX* и способен собирать рабочие исполняемые файлы для *Windows 95.*

Подходящим ответвлением *Godot 1.0* от сообщества является проект под названием *The Fusion Engine* [4]. Его разработчики уже выполнили большую часть работы по портированию движка, поэтому на данный момент его можно тестировать. Ниже приведены основные изменения относительно исходного проекта, которые касаются *Windows 95* и должны быть учтены при портировании:

– Заменены, убраны и исправлены некорректные вызовы ядра *Windows*. В старых версиях *Windows* на параметры вызовов ядра было наложено больше ограничений, в то время как на новых системах неправильные параметры могут не приводить к сбоям и оставаться незамеченными;

– Добавлена интеграция с библиотекой *Unicows* [5] от *Microsoft* для поддержки кодировок *Unicode*. Сюда относятся и улучшения работы с файловой системой для поддержки таких кодировок как *Windows-1251*, так как упомянутая библиотека не может добавить поддержку *Unicode* в *Windows* или *MSVCRT* . Например, для доступа к файлам используется *open()* вместе с *WideCharToMultiByte()*, так как *_wopen()* в *MSVCRT* работает только на *Windows 2000* и более новых;

– Добавлен отрисовщик для *OpenGL 1.1*, работающий *с прослойкой MesaFX* [6] (которая, однако, требует *Voodoo2* и новее). Изменения по сравнению с *OpenGL 1.3* сводятся к отключению *MIP*-текстурирования (из-за отсутствия встроенного метода генерации их уровней), работы с текстурными блоками (более одной текстуры за проход не используется) и экспериментальные эффекты, такие как карты нормалей;

– Исправления и изменения связанные с системой сборки, комплектом разработки и необязательными функциями.

Для тестирования применяется эмулятор *86Box* [7]. Заметим, что первые *Voodoo* не поддерживают оконный режим, а при работе наблюдаются аварийные выходы при определённых действиях и искажения текста при программной отрисовке. Демонстрация представлена на рисунке 2.

А) Б)

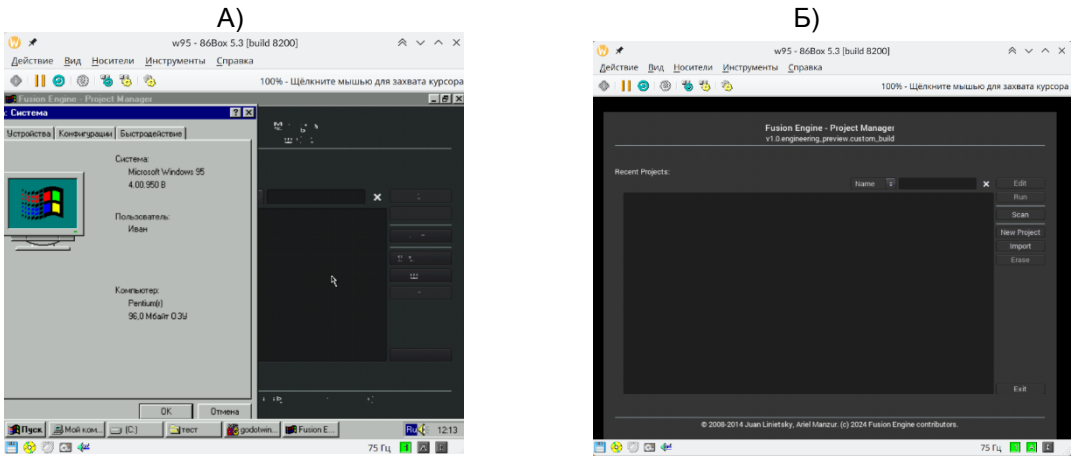


Рисунок 2 – Демонстрация: *а)* программная отрисовка; *б)* аппаратная отрисовка на *3Dfx Voodoo Banshee*

Обнаруженные проблемы к комплекту разработки не относятся и не связанны с версией самой системы, поэтому можно считать, что задача выполнена, а все особенности учтены.

Список использованных источников:

1. Страница проекта mingw-95 [Электронный ресурс] – https://github.com/ati9550/mingw-95

2. Страница загрузки Microsoft Visual C Runtime 6 [Электронный ресурс] – https://web.archive.org/web/20120610063726if_/http://download.microsoft.com/download/vc60pro/update/1/w9xnt4/en-us/vc6redistsetup_enu.exe

3. Статья об изменениях в GNU GCC 13 [Электронный ресурс] – https://gcc.gnu.org/gcc-13/changes.html

4 Страница проекта The Fusion Engine [Электронный ресурс] – https://github.com/TheFusionEngine/FusionEngine

5. Страница Unicows в библиотеке Microsoft для разработчиков [Электронный ресурс] – https://web.archive.org/web/20100116141417/http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa286515.aspx

6. Страница загрузки MesaFX [Электронный ресурс] – https://www.3dfxzone.it/dir/3dfx/mesafx/download/index.php

7. Страница эмулятора 86Box [Электронный ресурс] – https://86box.net/

8. Страница проекта MinGW [Электронный ресурс] – https://www.mingw-w64.org/

9. Страница проекта GNU GCC [Электронный ресурс] – https://gcc.gnu.org/

АКУСТИЧЕСКИЙ МОДЕМ: КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПА МОДУЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Бирицкий В.П., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лихачёв Д.С, – канд. тех. наук, доцент

Разработана модель акустического модема для исследования автоматической классификации типа модуляции (AMC) в условиях аддитивного белого гауссовского шума. Реализованы три вида цифровой модуляции (2-FSK, 2-ASK/OOK, BPSK), генерация синтетического датасета и обучение классификатора Random Forest на основе пяти статистических и спектральных признаков. Для повышения качества сигнала применена полосовая FIR-фильтрация (firwin2). Получены зависимости BER и accuracy от SNR. Показано, что точность классификации превышает 95 % при SNR ≥ 5 дБ. Результаты подтверждают эффективность машинного обучения для автоматического определения типа модуляции в акустических каналах связи.

Акустический модем представляет собой устройство, предназначенное для передачи цифровых данных по акустическому каналу связи. В рамках работы разработан классификатор типа модуляции, который позволяет автоматически определять используемый вид модуляции на приёмной стороне. Основная цель создания такого классификатора — обеспечить механизм адаптивной смены типа модуляции в зависимости от воздействия на канал различных неблагоприятных факторов, искажающих сигнал (например, изменение уровня шума, многолучёвость, доплеровский сдвиг). Это позволит повысить устойчивость и эффективность связи в реальных условиях.

Целью настоящей работы является разработка и исследование модели акустического модема с акцентом на задачу автоматической классификации типа модуляции (Automatic Modulation Classification, AMC) с использованием методов машинного обучения.

Модель позволяет генерировать сигналы трёх видов модуляции: 2-FSK , 2-ASK (OOK) и BPSK при частоте дискретизации 44100 Гц и скорости передачи 300 бод. Акустический канал моделируется добавлением аддитивного белого гауссовского шума:

$$SNR_{\text{дБ}} = 10\log_{10}(\frac{P_{\text{сигнала}}}{P_{\text{шума}}}) \quad (1)$$

где $P_{\text{сигнала}}$ и $P_{\text{шума}}$ – средние мощности сигнала и шума соответственно.

Для решения основной задачи создан синтетический датасет, содержащий 1260 сигналов (по 60 примеров на каждый класс и каждое значение SNR от –10 до +20 дБ). Из каждого сигнала извлекались пять информативных признаков: RMS, kurtosis, спектральный центроид, спектральная энтропия и скорость пересечения нуля. На этих признаках обучен классификатор Random Forest (100 деревьев). Обучение проводилось отдельно для каждого значения SNR с использованием стратифицированного разбиения 70/30.

Классификатор Random Forest, состоящий из 100 деревьев решений, интегрирован в модель модема. Структура классификатора основана на ансамблевом методе: каждое дерево обучается на случайной подвыборке данных и случайном подмножестве признаков (bagging + random feature selection). Тестирование проводилось отдельно для каждого значения SNR с использованием стратифицированного разбиения выборки 70/30. Классификатор анализирует принятый сигнал в реальном времени и выдаёт рекомендацию о наиболее подходящем типе модуляции, что позволяет динамически менять модуляцию в зависимости от текущих условий канала.

Результаты экспериментов представлены в таблице 1 и на рисунках 1–2.

Таблица 1 – Точность автоматической классификации типа модуляции (Random Forest)

SNR, дБ	Точность , %
-10	38,2
-5	67,4
0	89,7
5	96,8
10	98,9
15	99,4
20	99,7

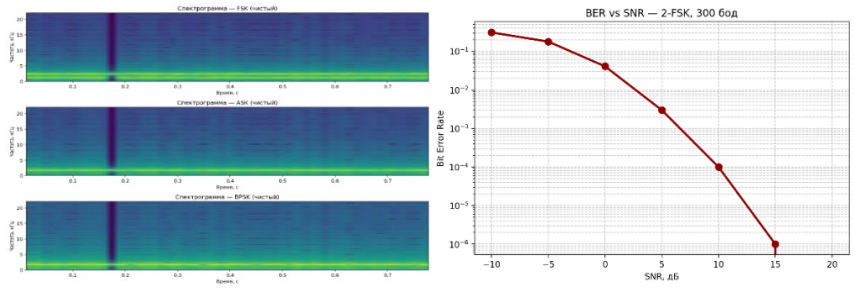


Рисунок 1 – а) Спектрограммы чистых сигналов трёх типов модуляции (FSK, ASK, BPSK) б) Зависимость BER от SNR для базового 2-FSK-модема (300 бод)

На рисунке чётко видны характерные различия: две дискретные частотные линии у FSK, прерывистая структура у ASK и постоянная несущая с фазовыми переходами у BPSK.

Для когерентного 2-FSK теоретическая вероятность ошибки на бите имеет вид

$$P_b \approx Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (2)$$

где $Q(\cdot)$ – функция ошибок Гаусса.

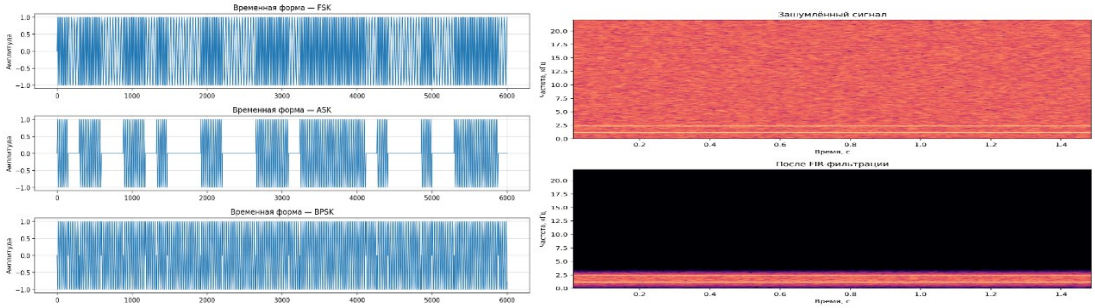


Рисунок 2 – а) Временные формы сигналов FSK, ASK и BPSK б) Спектрограммы зашумлённого сигнала и сигнала после FIR-фильтрации

Наглядно показаны различия в структуре сигналов в временной области.

Видно значительное снижение уровня шума при сохранении полезного сигнала.

Представленные результаты демонстрируют высокую эффективность разработанной модели. Как видно из рисунка 2, кривая BER для 2-FSK полностью соответствует теоретическим ожиданиям, подтверждая корректность реализации канала и демодулятора.

Таблица 1 отражает ключевой результат работы — реальную зависимость точности классификации от уровня шума. Зависимость имеет ярко выраженный пороговый характер. При низких значениях SNR (–10 … 0 дБ) точность находится в диапазоне 67–89 %, что значительно выше случайного угадывания (33 %). Это свидетельствует о хорошей информативности выбранных признаков даже в условиях сильного шума.

Начиная с SNR = 5 дБ точность резко возрастает до 96,8 %, а при SNR ≥ 10 дБ достигает 98,9–99,7 %. Небольшое снижение точности при SNR = 20 дБ объясняется статистической вариабельностью и возможным лёгким переобучением модели на почти идеальных сигналах.

Методы интеграции машинного обучения**.** Для решения задачи AMC был создан синтетический датасет объёмом 1260 сигналов. Из каждого сигнала извлекались пять информативных признаков: RMS, kurtosis, спектральный центроид, спектральная энтропия и скорость пересечения нуля. Классификатор Random Forest (100 деревьев) обучался отдельно для каждого значения SNR с использованием стратифицированного разбиения 70/30. Такой подход позволил получить устойчивые и интерпретируемые результаты, а также оценить влияние уровня шума на качество классификации.

Для борьбы с шумом в акустическом канале применяется полосовая FIR-фильтрация.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов машинного обучения в интеллектуальных акустических системах связи.

Список использованных источников:

1. Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2008. – 1150 p.

2. Dobre O.A. [et al.] Survey of automatic modulation classification techniques // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2007. – Vol. 9, № 2. – P. 56–81.

3. Oppenheim A.V., Schafer R.W. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. – Pearson, 2010. – 1120 p.

4. Stojanovic M. Underwater acoustic communications // Wiley Encyclopedia of Telecommunications. – 2003. – P. 1–15.

АКУСТИЧЕСКИЙ МОДЕМ: КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Масколенко Г.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лихачёв Д.С, – канд. тех. наук, доцент

Разработана система для автоматической классификации помех в подводных акустических каналах с использованием методов машинного обучения. Реализованы симуляция пяти типов помех (чистый сигнал, белый шум, судоходный, биологический, сейсмический), извлечение восьми спектральных признаков и обучение классификаторов Random Forest и SVM. Применены методы цифровой фильтрации для предпроцессинга сигналов. Получены зависимости точности классификации от типа помехи. Результаты подтверждают эффективность машинного обучения для автоматического определения типа помехи в акустических системах.

Целью настоящей работы является разработка и исследование модели классификации акустических помех с использованием методов машинного обучения. Система позволяет автоматически идентифицировать пять типов помех в подводных коммуникационных каналах при различных условиях сигнал-шум (SNR).

Модель принимаемого сигнала в дискретном виде описывается уравнением:

$$y[n] = s[n] + \text{□}_{type}[n] \quad (1)$$

где $s[n]$ – полезный сигнал, $\text{□}_{type}[n]$ – аддитивная помеха одного из пяти типов.

Для исследования создан синтетический датасет, содержащий 1000 акустических сигналов по 200 примеров на каждый класс помехи (табл. 1). Параметры генерации: частота дискретизации 1000 Гц, длительность сигнала 1 секунда.

Каждый класс помехи характеризуется определенной спектральной структурой:

- Чистый сигнал – модулированный сигнал с минимальным шумом (SNR > 20 дБ)
- Белый шум – гауссовский шум с равномерной спектральной плотностью
- Судоходный шум – низкочастотные импульсы на частоте 50 Гц
- Биологический шум – импульсивные сигналы, имитирующие щелчки морских животных
- Сейсмический шум – низкочастотные синусоидальные волны (5–25 Гц)

Таблица 1 – Состав синтетического датасета

Класс помехи	Кол-во примеров	Частотный диапазон, Гц
Чистый сигнал	200	1000–10000
Белый шум	200	0–500
Судоходный шум	200	50–500
Биологический шум	200	1000–50000
Сейсмический шум	200	5–25
ИТОГО	1000	

Для классификации используются два алгоритма машинного обучения:
1. Random Forest (РФ): ансамбль из 100 деревьев решений с критерием расщепления Джини. Глубина деревьев не ограничена (max_depth = None). Параметр min_samples_split = 2.
2. Support Vector Machine (SVM): метод опорных векторов с радиальным базисным функциональным (RBF) ядром. Параметр регуляризации C = 1.0, γ = 'scale', Методология оценки: Разделение данных: 80% для обучения (800 примеров), 20% для тестирования (200 примеров), Стратификация: сохранение пропорций классов в обоих наборах, Метрики качества: accuracy, precision, recall, F1-score, confusion matrix, Кросс-валидация: 5-fold CV для оценки обобщающей способности модели

Результаты классификации помех приведены в таблицах 3 – 4.

Таблица 3 – Общие результаты классификации помех

Модель	Точность(Accu-racy)	Precision (macro)	Recall (macro)	F1-score (macro)
Random Forest	99.0%	0.990	0.990	0.990
SVM (RBF)	99.5%	0.995	0.995	0.995

Таблица 4 – Результаты классификации по классам помех (модель SVM RBF)

Класс помехи	Precision	Recall	F1-score	Поддержка(тесты)
Чистый сигнал	1.000	1.000	1.000	40
Белый шум	0.976	1.000	0.988	40
Судоходный	1.000	1.000	1.000	40
Биологический	1.000	0.975	0.987	40
Сейсмический	1.000	1.000	1.000	40
Взвешенное среднее	0.995	0.995	0.995	200

Анализ результатов показывает, что SVM с RBF ядром обеспечивает лучшую точность классификации (99.5%) по сравнению с Random Forest (99.0%). Высокие значения recall (≥ 0.975) для всех классов свидетельствуют о хорошей способности модели выявлять образцы каждого класса без существенных пропусков.

Достигнутая точность классификации демонстрирует высокую эффективность предложенного подхода. Преимущество SVM над Random Forest объясняется лучшим поиском нелинейных границ между классами в многомерном пространстве признаков. RBF ядро эффективно работает с перекрывающимися классами (например, белый шум и биологический шум имеют пересекающиеся спектральные характеристики).

Ограничения текущего исследования: датасет синтетический; требуется валидация на реальных акустических записях, обучение проводилось на данных одного частотного диапазона (1000 Гц); обобщение на другие частоты требует переобучения, система требует переобучения при значительном изменении условий окружающей среды.

Список использованных источников:

1. Scikit-learn: Machine Learning in Python / F. Pedregosa [et al.] // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – P. 2825–2830.

2. Random Forests / L. Breiman // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5–32.

3. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition / C. J. C. Burges // Data Mining and Knowledge Discovery. – 1998. – Vol. 2, № 2. – P. 121–167.

4. Machine Learning Applications in Ocean Acoustics / M. J. Buckingham // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2005. – Vol. 30, № 2. – P. 271–290.

5. ГОСТ 7.32-2001. Межгосударственная система по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – Введ. 2001-07-01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 28 с.

СЧЁТЧИК ПОСЕТИТЕЛЕЙ МАГАЗИНА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Королёв М. А., Шахновский С. А. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Порхун М.И. – маг. техн. наук, старший преподаватель

В рамках данной работы разработана система автоматического подсчёта посетителей магазина на базе двух платформ Arduino Uno и Wemos D1 R1. Arduino Uno выполняет основную обработку сигналов от двух лазерных датчиков (на основе фоторезисторов) и ультразвукового датчика HC-SR04. Wemos D1 R1 осуществляет беспроводную передачу данных по протоколу MQTT и приём управляющих команд. Обмен между платами реализован по протоколу I2C. Система различает направления движения (вход/выход), подтверждает наличие человека ультразвуком и позволяет включать/выключать подсчёт удалённо.

Счётчик посетителей – устройство, предназначенное для автоматического подсчёта количества людей, входящих и выходящих из помещения. Система обеспечивает двунаправленный подсчёт с защитой от ложных срабатываний и передачу актуальных данных в реальном времени по MQTT.

Разработанное устройство позволяет в реальном времени отображать количество посетителей, передавать данные на сервер/мобильное приложение и управлять работой системы (ON/OFF) удалённо. Для повышения точности подсчёта используется подтверждение ультразвуковым датчиком. Все данные сохраняются и передаются даже при кратковременных сбоях связи.

Структурная схема устройства представлена на рисунке 1.

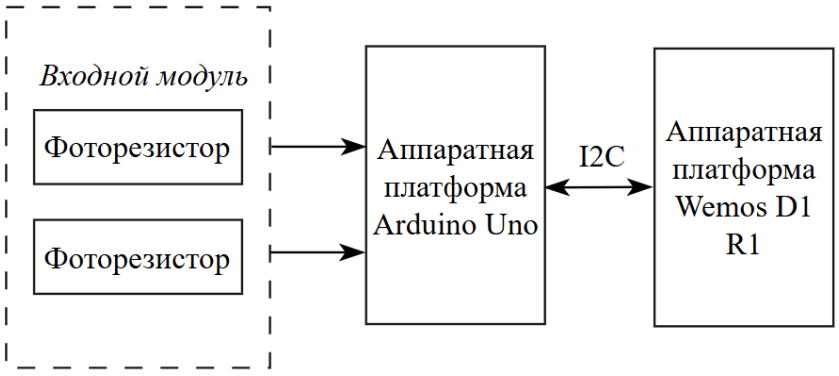


Рисунок 1 – Структура разработанного устройства

Основным модулем обработки является аппаратная платформа Arduino Uno. Она принимает аналоговые сигналы от двух фоторезисторов (лазерные барьеры), обрабатывает данные ультразвукового датчика HC-SR04 и реализует логику определения направления прохода. Плата Wemos D1 R1 выступает в роли I2C-slave и MQTT-клиента: получает текущее количество посетителей, публикует данные в топик store/people_count и принимает команды управления в топик store/control. Обмен данными между платами осуществляется по I2C (с level-shifter 5 В - 3,3 В).

Ниже приведен обобщенный алгоритм работы системы:

1. Инициализация устройства: настройка пинов, калибровка порогов фоторезисторов, подключение к Wi-Fi и MQTT-брокеру.
2. Основной цикл Arduino Uno: непрерывное чтение аналоговых значений фоторезисторов, определение первого прерванного луча, ожидание второго луча в течение 1,8 с, подтверждение наличия человека ультразвуковым датчиком (диапазон 40–280 см). При успешном проходе инкремент/декремент счётчика (при одновременном прерывании обоих лазеров засчитывается вход).
3. Передача данных по I2C на Wemos D1 R1 (2 байта — количество людей + 1 байт — статус включения).
4. Wemos D1 R1 публикует количество посетителей по MQTT каждые 4 секунды и передаёт команды ON/OFF обратно на Uno.
5. При получении команды OFF система приостанавливает обработку сенсоров до получения команды ON.

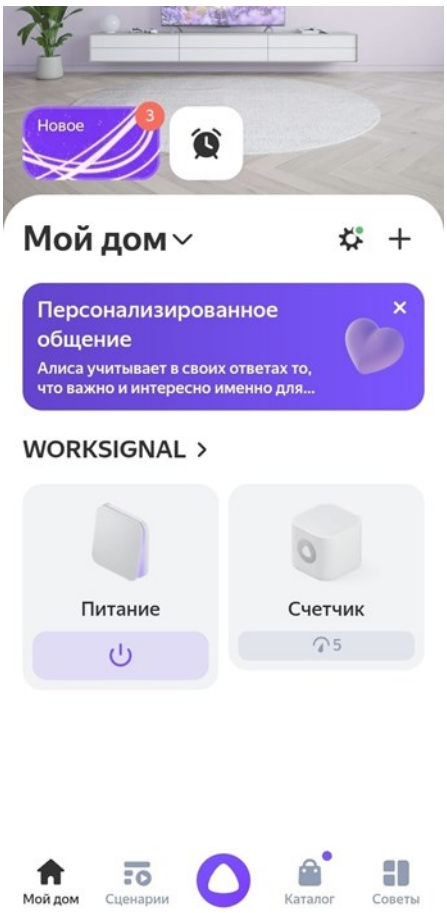


Рисунок 2 - Главная страница интерфейса

В ходе работы разработан двуплатформенный счётчик посетителей магазина на базе Arduino Uno и Wemos D1 R1. Реализована точная логика двунаправленного подсчёта с ультразвуковым подтверждением, беспроводная передача данных по MQTT и удалённое управление. Макетирование и тесты подтвердили стабильную работу системы в реальных условиях магазина.

Список использованных источников:

1. Статья про модуль часов реального времени с будильником [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://marobotic.com/2023/12/09/real-time-clock-with-alarm-using-arduino-and-rtc-ds3231/?amp=1

2. Описание платформы Arduino Uno [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf

3. Описание часов реального времени DS3231 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf

4. Описание экрана LCD-1602 с модулем I2C [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.handsontec.com/dataspecs/module/I2C_1602_LCD.pdf

ШУМОМЕР НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Калашников А.О., Нечай Г.И., Кислицкий А.И., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Щепанский В.Е. – маг. техн. наук, старший преподаватель

Работа посвящена разработке портативного шумомера на базе микроконтроллера ATmega328, предназначенного для измерения уровня звукового давления в помещениях. Устройство использует электретный микрофон для преобразования звуковых колебаний в электрический сигнал, который оцифровывается с помощью встроенного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Разработанный прибор позволяет оперативно оценивать акустическую обстановку в учебных аудиториях, офисных помещениях и лабораториях, выдавая результаты измерений в децибелах (дБ) на LCD-дисплее.

Длительное воздействие повышенного уровня шума может приводить к снижению концентрации внимания, утомляемости и нарушениям слуха. Контроль акустической обстановки актуален для образовательных учреждений, офисных пространств и производственных помещений. Цель работы – разработка портативного шумомера для оперативного анализа акустической обстановки в помещениях.

Шумомер реализован на базе микроконтроллера ATmega328 с тактовой частотой 16 МГц. Входным элементом является электретный микрофон, подключённый к аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера. Для отображения результатов измерений используется LCD-дисплей 16x2 символов, подключённый по 4-битному интерфейсу. Структура устройства включает следующие функциональные блоки: микрофон с усилительным каскадом; АЦП для оцифровки сигнала; микроконтроллер ATmega328 для обработки данных; LCD-дисплей для визуализации результатов измерений.

Алгоритм функционирования шумомера включает следующие этапы:

1. Инициализация устройства: настройка портов ввода-вывода, инициализация АЦП и дисплея.
2. Основной цикл измерений:
   2.1. Запуск АЦП и считывание значения с микрофона;
   2.2. Вычисление отклонения от нулевого уровня покоя $MIC_ADC_VAL = 459$;
   2.3. Определение пикового значения $peak$ амплитуды за 128 выборок;
   2.4. Расчёт уровня звукового давления в децибелах по формуле:

$$dB = MIN_{DB} + \frac{(peak \times 15)}{100}, \quad (1)$$

где MIN_DB – нижняя граница диапазона (33 дБ), MAX_DB – верхняя граница диапазона (100 дБ);

   2.5. Отображение значения на LCD-дисплее;
   2.6. Индикация качества акустической обстановки: «GOOD» (< 80 дБ) или «BAD» (> 80 дБ);
   2.7. Задержка 1 секунда и переход к следующему циклу измерений.

Проведена проверка работоспособности разработанного устройства путем макетирования в различных условиях: в тихом помещении прибор стабильно показывает значения 33–45 дБ; при разговоре 3-4 человек уровень шума составляет 50–65 дБ; в условиях повышенного шума прибор фиксирует значения до 85–95 дБ. На рисунке 1 приведено фото разработанного макета.

Рисунок 1 – Макет шумомера

В рамках данной работы был разработан портативный шумомер на базе микроконтроллера ATmega328. Устройство позволяет оперативно оценивать уровень шума в помещениях и отображает результаты измерений на LCD-дисплее в децибелах. Прибор показал корректную работу в различных акустических условиях.

Список использованных источников:

1. ATMEGA328P Datasheet : Data Sheet/ ATMEL Corporation. – San Jose, USA, 2016.
2. Шум. Затухание звука при распространении на местности : ГОСТ 31295.2-2005.

СЕКЦИЯ 5
«ВЫСШАЯ МАТЕМАТИКА»

UDC 004.8:519.673

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR AUTOMATIC GENERATION OF MATHEMATICAL PROBLEMS

Stepanov D.E., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Kniaziuk N.V. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. Local software to perform the process of generating test tasks in higher mathematics with the possibility of training. Developed considering machine learning practices and technologies.

Keywords. EdTech, Python scikit-learn, machine learning, HDBSCAN, AST, question generation, artificial intelligence, higher mathematics.

The task was set to implement a question generator, using the latest technologies in the field of machine learning and artificial intelligence, aim was reached. Sole purpose of software is to generate questions on relevant mathematical topics that are high-on-demand in modern higher education. The project allows to create mathematical problems in various popular formats (Moodle XML - specifically for integration with LMS BSUIR; Tex; Word; Text file). Also while being completely sustainable for local work, no connection of third-party providers or systems is required, considering defined accuracy is achieved. The models are trained and data being stored in a local database, which in the future, picking up the concept of a certain subtype of tasks, are able to generate the required number of correct, solvable and customizable tasks.

The software development was carried out in the Python programming language, proceeded with SOLID standards and the principles of system design. Tho algorithms and data structures bases were used to optimize the work of algorithms, which allowed to significantly optimize the course of actions. For example, the transition to parallelism was made, which allowed to reduce the generation time of large amounts of data by more than 10 times, as shown in Figure 1:

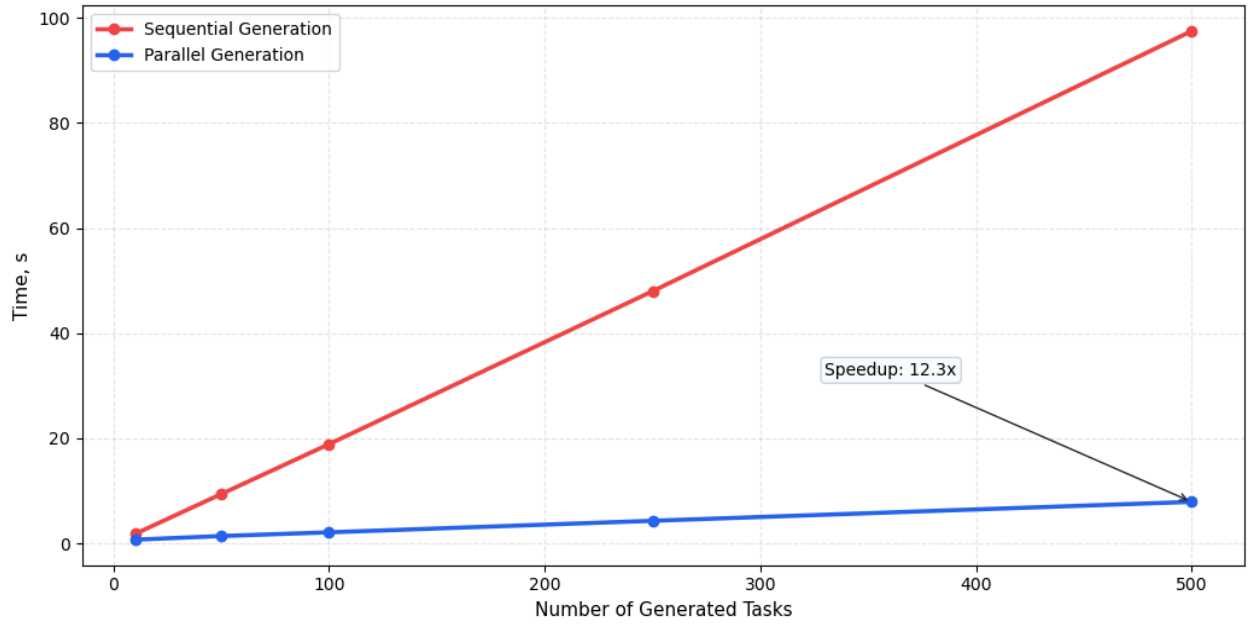


Figure 1 - Illustration of the comparison of the generation time rate of sequential(1) and optimized(2)

Before the introduction of the system, the algorithm of the entire generation process was time-heavy complex:

$$T_n = O(cn), \quad (1)$$

where T_n – generation time, c – average costs for processing one task, n – the number of generated tasks.

Now, after optimization, the estimated execution time became:

$$T_n = O(\frac{cn}{p}), \quad (2)$$

where T_n – generation time, c – average costs for processing one task, n – the number of generated tasks, p – number of parallel processes.

It follows from the expression (1) that with sequential processing, the execution time of the generation algorithm increases linearly with an increase in the number of tasks. After the implementation of parallel processing, the load is distributed between p workflows, as a result of which the estimated execution time is reduced and described by the expression (2). At the same time, the theoretical nature of the dependence on the volume of input data remains linear, but the actual operating time of the system decreases in the first approximation in proportion to the number of processes involved (taking into account the overhead costs for synchronization and data exchange)

Additional acceleration that allowed to slightly reduce the total overhead of the system. was achieved by caching validation results, reducing the number of generation retries and optimizing the data processing pipeline.

If we talk about the architecture of the software tool itself, it is recreated as a modular pipeline, each divided into submodules, within, which are responsible for data conversion, analysis and validation, input-output, etc. Each significant core module has implemented appropriate auxiliary modules and methods that perform certain tasks within the framework of the entire, seam pipeline. An important aspect of the design of the initial architecture, taking into account the modern trends in the continuous development of capabilities and widespread integration of machine learning and artificial intelligence systems, the idea of subsequent use, integration and applications of the PS (PS — Programmed solution) in the initial test, and with the successful effectiveness of the project and functioning training environments, the output interfaces of integration with popular technologies using API [7] (API -– Application Programming Interface) and endpoint simulations were set. As one of them, the development of a well structured API of the request node to the local LLM (LLM -– Large Language Model) for additional consolidation of the quality check of the training module in the context of the PS, the interface with access to the updated local database was recreated.

In the process of recreation, author got brainstormed with modern scientific articles and methods of working with artificial intelligence and machine learning in general [8]. The knowledge gained was applied and the relevant technologies were implemented. RAG [5] (RAG — Retrieval Augmented Generation) was recreated — a subsystem within the PS, allowing local data storage using a relational database with JSON (JSON — Data Format) fields. The approach allowed to develop a combination of combinations of both the advantages of the classical scheme for metadata and the local relational storage, ensuring consistency between the data and the context of the models. The purpose of the subsystem is to save information about the processed tasks, form their internal representations and further extract the closest examples when generating new tasks.

Returning back, if we consider the architecture of the software tool as a whole, it includes the stages of loading a sample of tasks, normalizing input data, segmenting the condition, parsing the mathematical expression, analyzing features, generating, validating and subsequent exporting the results. This organization allows us to divide the common task into a number of interrelated stages, (that's basically the pipeline concept) each of which is responsible for its own subtask within a single processing process, a detailed description is shown in Figure 2.

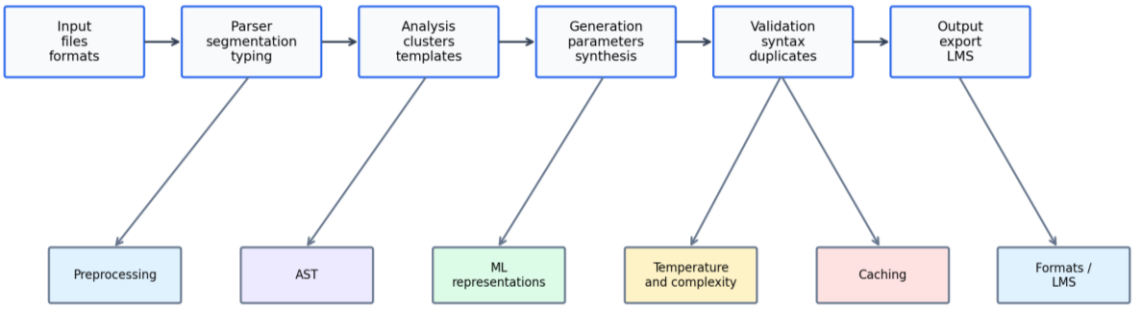


Figure 2 - Illustration of the stages of the pipeline and its auxiliary mechanisms

In addition to the main pipeline, the system provides a set of supporting components that provide data storage, structural analysis of expressions, prototyping, search for relevant examples and interaction with additional intelligent services. In the assembly, the components form an internal circuit of data storage, analysis and extraction, on which this solution, the system uses the accumulated ideas about previously processed examples.

A detailed description is given in Figure 3.

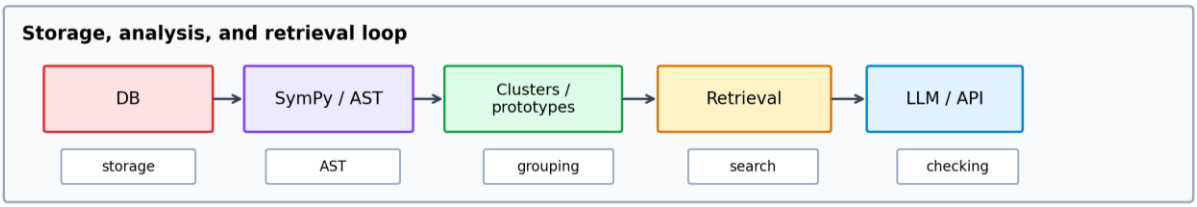


Figure 3 - Illustration of supporting components

Summarizing about architecture of the PS, three major factors were considered and applied.

1. Setting up a proper pipeline for the task. Strict principles were set about modules that should be used. Only the essential functionality is on. That ensures codebase was made clean and flexible for improvements and refactoring.

2. Keeping PS architecture maintainable and scalable for future additions. Implemented patterns, examples of which were explained up above, allow us to grow and scale.

3. Usage of modern principles in the machine learning field. We did our research to be certain that's the technologies retrieved is the pinnacle and up to date.

Now, slowly descending into the deeper end, let us talk about the processes within the pipeline itself.

It is useful to consider the operation of the system in two modes: with a trained and with an untrained model. In the untrained state, the generator mainly relies on predefined templates, configuration parameters, heuristic rules and standard mechanisms of symbol analysis. Such mode allows the system to function even without special adjustment to a specific data body, but the variety and objective accuracy of the created tasks are limited in case, and the untrained mode itself is not recommended for production use.

But after learning on a set of real examples, we stumble upon a trained model, which is much reliable and qualified for our tasks. The system forms a more meaningful internal representation of the subject area. Text templates, equation templates, parameter distributions, vector representations of tasks, class centroids, prototypes and generation indices are extracted from the sample of the original tasks, all data is arranged according to optimized data structures. Thanks to this, the trained model begins to take into account real formulations, typical expression structures and statistical features of parameters. As a result, new tasks become closer to the style of the training sample, better preserve the thematic focus and reflect real methodological patterns to a greater extent.

On the next graph we can witness the comparison between two. Summarizing, the untrained system works on the principle of generation based on rules and basic templates, while the trained system switches to the generation mode based on the studied examples and their structural characteristics. It is this difference that makes model training an important stage in improving the quality of automatic generation.

The comparison is shown in Figure 4.

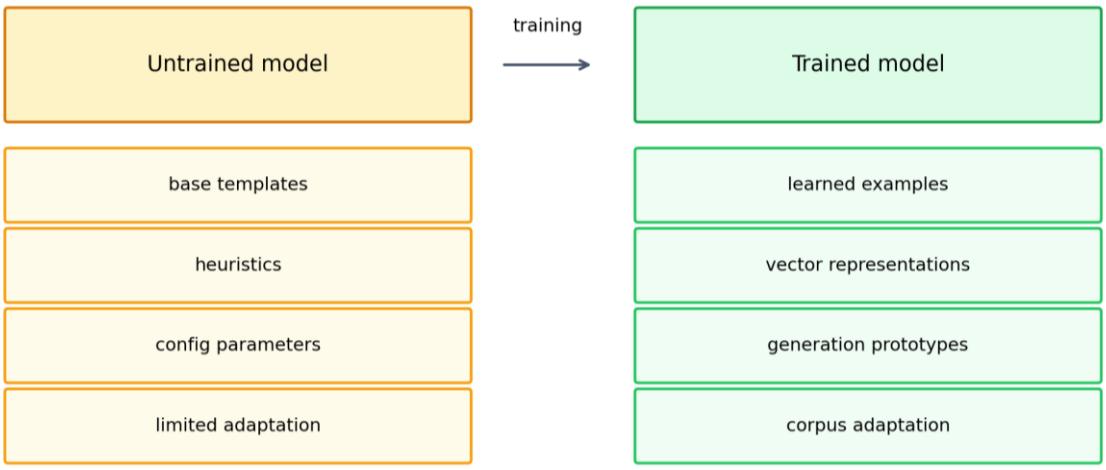


Figure 4 - Comparison of a trained and untrained generator.

Speaking of trained models, the latest technologies in the field of mathematics and machine learning are used to train models. It is worth distinguishing the essence of their work, that's because we could just "arrange the GUI for a LLM wrapper", instead, we stick to ours' own decisions; even thought PS uses local LLM for additional layer of validation, we do not rely on it. Components involved in the processes are described below. Note that the entire system is operational locally.

SymPy [1] and Ollama [6] components are used in the project and perform various functions and are not interchangeable. SymPy is a Python library used as a tool for strict symbolic analysis of mathematical

expressions. With its help, the system converts formulas into an internal representation, allocates variables, operations, functions, determines the structural properties of the expression and forms features based on the analysis tree. Its use allows you not to prescribe mathematical logic, but to use a ready-made component to speed up development.

Ollama, on the contrary, acts as an additional intellectual module focused on processing the text side of the task and supporting classification in cases where strict rules are not enough. By building an entry point, the generator is able to train the model in completely new types of tasks that have not been encountered before, access takes place in cases where additional verification of the task type or the possibility of its solution is required.

If SymPy can be considered as a mathematical formula analyzer, Ollama acts as a language assistant capable of working with formulations, context and non-rigid text descriptions. Consequently, the first component is responsible for strict formalization, and the second is responsible for interpretation flexibility and extensibility. Details are shown in Figure 5.

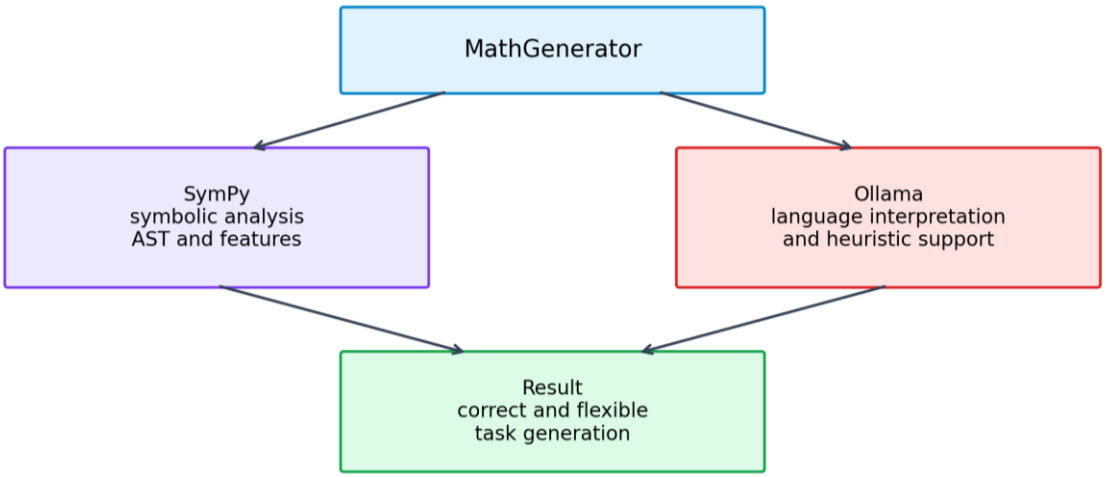


Figure 5 - Illustration of the use of SymPy, Ollama in the project architecture

For distinguishing the maths, we use AST [2] (AST - Abstract Syntactic Trees). The analysis of abstract syntactic trees, or AST, plays an essential role in the project. After converting a mathematical expression into a symbolic form, the system receives a parsing tree in which the nodes correspond to operations, functions, numbers and variables. Based on this tree, you can determine the depth of the expression, the number of operations, the number of variables, the presence of degrees, functions and other structural features. Such analysis is much more informative than a simple comparison of strings, as it allows you to take into account the internal organization of a mathematical object.

The use of AST is especially important in situations where different-looking records actually describe tasks that are similar in structure. For example, two expressions may differ in specific coefficients or form of record, but have the same architecture of the operations tree. In this case, the system is able to recognize them as close in terms of generation, classification and training. Working with parsing trees increases the content of the feature description and makes generation more meaningful, the use of parsing trees was justified by their widespread use when working with grammars, in particular in compiler technologies. With addition of AST's alone, we, of course, unable to build things right straight away. That's where we implement machine learning.

Machine learning methods in the project are used as part of a general system of analysis and generation of mathematical problems. The main idea is that the program receives a set of ready-made examples(which retrieved via AST's) , extracts textual, numerical and structural features from them, and then forms a representation of tasks in the general feature space. This allows not only to distinguish the types of tasks, but also to identify similarities between them, find characteristic templates and use them when building new options. This approach is especially important in educational systems, where the quality of generation is determined not by random selection of coefficients, but by the preservation of semantic and structural proximity to the original examples.

Among the methods used are the vector representation of tasks (we're talking about clustering, more of HDBSCAN information can be found here [3],[4]), the search for the nearest similar examples, the construction of class prototypes and groupings. Vectorization is based on the combination of text features, structural tokens and numerical characteristics of the expression. This allows us to take into account several levels of task description at once: the formulation of the condition, the mathematical structure of the expression and quantitative parameters. As a result, each task is converted into a set of features suitable for further comparison, grouping and classification.

Clustering in the project is used as a way to group tasks with a similar structure and similar features. The system provides usage of the HDBSCAN algorithm [3], which is convenient because it is able to allocate groups of objects without rigidly setting the exact number of clusters in advance. This is especially useful for the educational task corps, because real samples often contain uneven families of examples: some types are represented by a large number of samples, others are rare, and some of the tasks can be intermediate or mixed in structure. In such conditions, density-based clustering helps to detect natural groups of examples and are perfectly suited for use in building generation patterns.

In practice, this means that the system is able to distinguish individual groups of tasks not only by explicit label, but also by the similarity of the internal representation. Due to this, the stability of the generator increases: it is based not on a single example, but on a whole family of close tasks, which makes the created options more diverse and at the same time more consistent in structure [4]. We can see the logic used behind clustering in Figure 6.

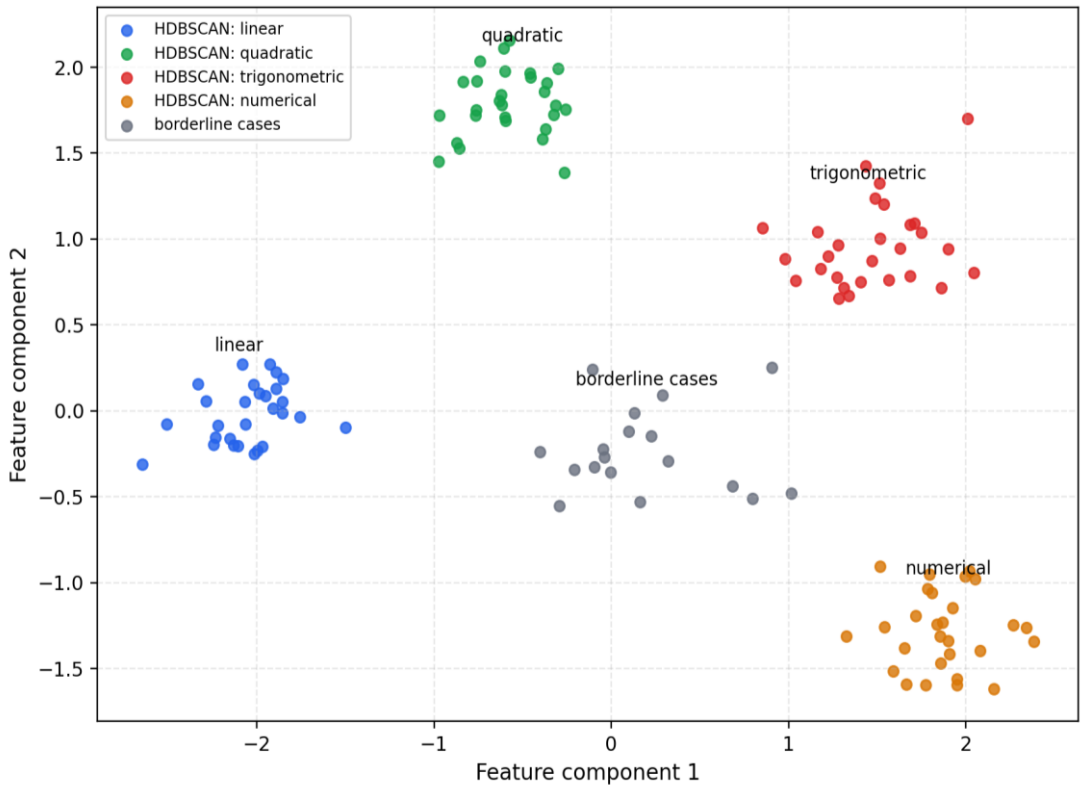


Figure 6 - Illustration of the principle of clustering in the context of software

Going through some additional clarity improving parameters, we can look at temperature and complicity:

A separate parameter affecting the generation process is temperature [9]. It is now used everywhere in modern AI-systems. It determines the degree of variability of the created results. At low values, the temperature makes generation more stable and predictable, because the system more often chooses the most typical and safe options for constructing a problem. As the temperature “rises”, the variety of results increases, but at the same time the proportion of correct and stable examples may decrease. The choice of temperature is a compromise between variability and reliability of generation. The graph shown in Figure 7.

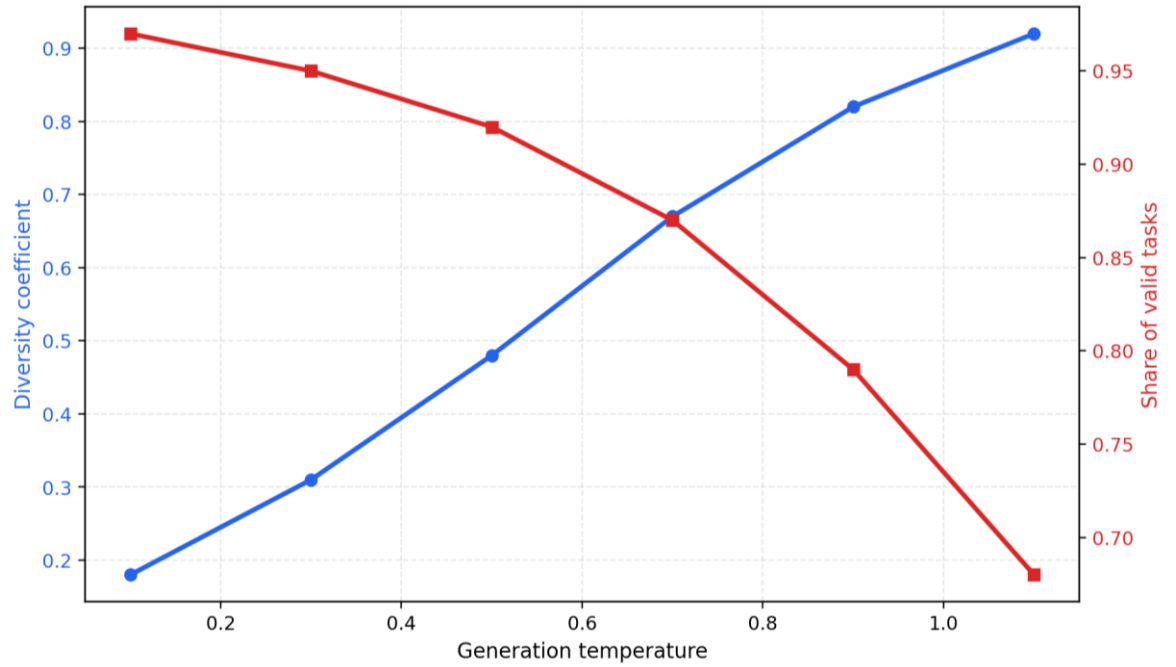


Figure 7 - Illustration of the principle of temperature influence on generation stability

No less important parameter is the target complexity of the task. The very concept of complexity was introduced as an additional factor affecting the flexibility of the final result, which made it possible to successfully select the required flexibility [10]. As it increases, the number of restrictions that must be taken into account when building a task increases, and the probability of rejected unsuccessful options also increases. This leads to an increase in generation time and increases the requirements for verification mechanisms, but as a result, the model successfully copes with the task. Although the complexity and significantly affects the cost of generation time, optimization processes have reduced the expected divergence as much as possible. The dependency graph is shown in Figure 8.

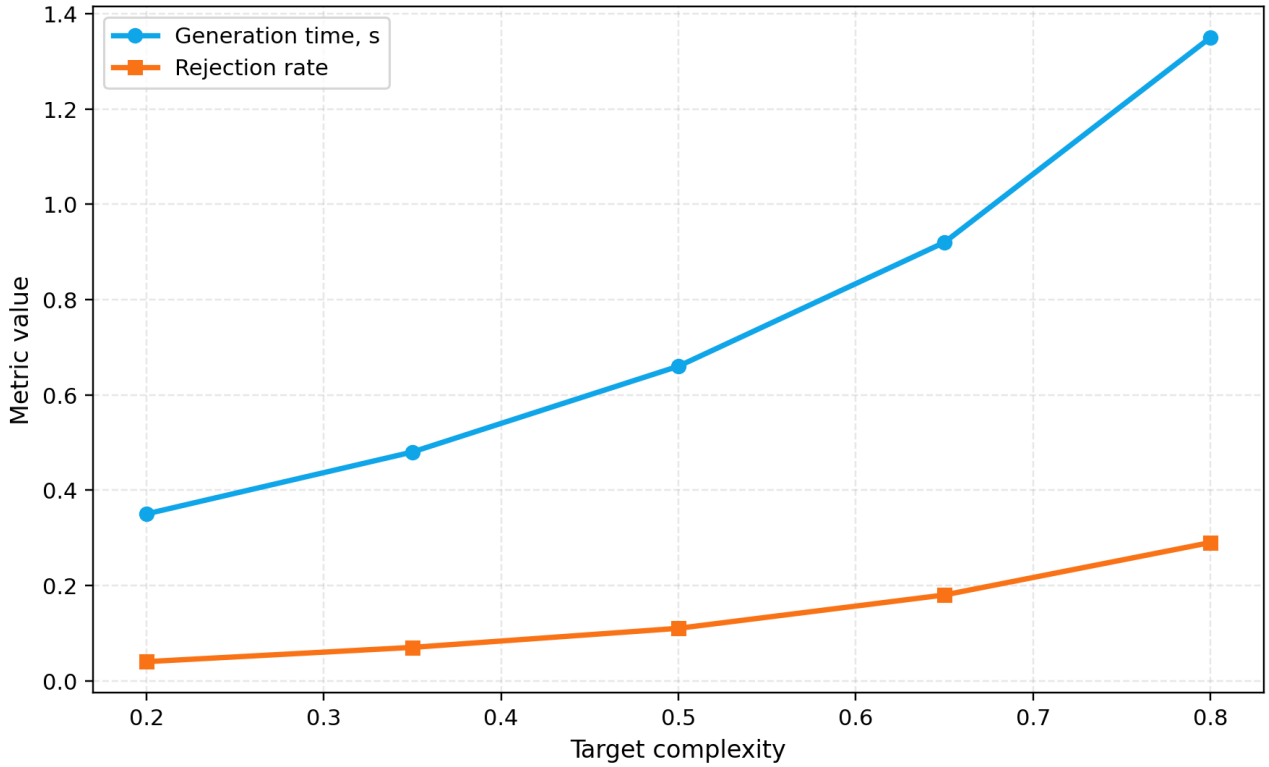


Figure 8 - Illustration of the principle of the impact of complexity on generation

During the development, of course a graphical implementation of the application functions was provided even though that's not the best authors solution in terms of UI, still it suits as a great interaction tool and provides with all the information needed. the entire process can be monitored through the user interface

created to perform all the required tasks without the need to access the console or code. For detailed debugging of the system, a logging system was implemented, which allows you to track all the logic of the passage, analysis results, errors and intermediate artifacts of generation, which makes the behavior of the system and its further support as transparent as possible.

A detailed representation is shown in Figures 9 and 10.

Figure 9 - Illustration of the graphical interface of the application

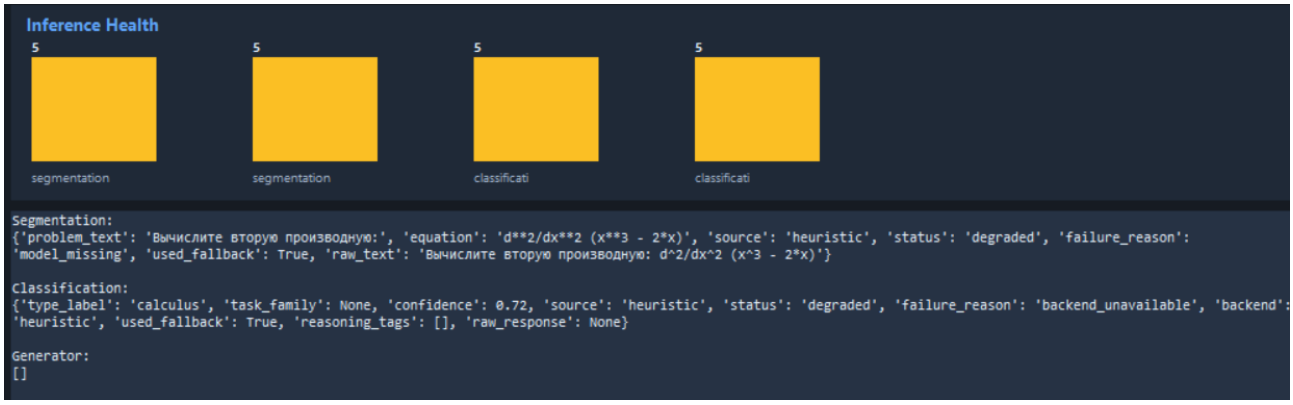


Figure 10 - Illustration of the error debugging system inside the application

The PS we've gone through in the work demonstrates that the automated generation of mathematical problems can be implemented as a full-fledged intellectual system that combines methods of symbolic analysis, machine learning, structural data representation and local context storage. Approach shown is especially relevant in the context of the development of digital education, where the need for scalable tools for the preparation of training and control materials is increasing, without the use of third-party tools.

The practical value of the developed solution lies in the possibility of local formation of problems in higher mathematics, taking into account the structure of the training sample, generation parameters, required complexity and available export formats. This creates the prerequisites for the use of the software not only within the experimental environment, but also as part of real educational platforms, electronic courses, distance learning systems and internal teaching tools for task preparation, as well as personal use. At the moment, the program has already been used for the successful preparation of several test courses in the Moodle training system.

The prospects for further development of the project are primarily related to the expansion of the number of supported topics, increasing the accuracy of classification and improving generation mechanisms. In the future, the system can be supplemented with a more developed adaptation to the subject area, improved algorithms for ranking close examples, mechanisms for automatic explanation of the results obtained, as well as closer integration with existing training services.

Of particular interest is the further application of the developed approach in functioning educational environments. In subsequent development, the system can be used as a tool for generating individual task options, preparing training kits, automated filling of LMS systems, as well as an auxiliary module in intelligent learning platforms. The presented solution can be considered not only as a research and training project, but also as a basis for the subsequent construction of applied EdTech systems.

References:

1. SymPy Development Team. SymPy Documentation [Electronic resource]. – Mode of access: https://docs.sympy.org/latest/index.html. – Date of access: 13.03.2026.

2. Python Software Foundation. AST — Abstract Syntax Trees. Python Documentation [Electronic resource]. – Mode of access: https://docs.python.org/3/library/ast.html. – Date of access: 10.03.2026.

3. McInnes, L., Healy, J., Astels, S. hdbscan: Hierarchical density based clustering // Journal of Open Source Software. – 2017. – Vol. 2, No. 11. – P. 205. – DOI: 10.21105/joss.00205.

4. Campello, R. J. G. B., Moulavi, D., Sander, J. Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. – 2013. – P. 160–172.

5. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W.-t., Rocktäschel, T., Riedel, S., Kiela, D. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // NeurIPS. – 2020. – Mode of access: https://nlp.cs.ucl.ac.uk/publications/2020-05-retrieval-augmented-generation-for-knowledge-intensive-nlp-tasks/. – Date of access: 19.03.2026.

6. Ollama. Official Documentation [Electronic resource]. – Mode of access: https://docs.ollama.com/. – Date of access: 15.03.2026.

7. Ollama. API Reference / Introduction [Electronic resource]. – Mode of access: https://docs.ollama.com/api/introduction. – Date of access: 15.03.2026.

8. Scikit-learn developers. TfidfVectorizer — scikit-learn documentation [Electronic resource]. – Mode of access: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.TfidfVectorizer.html. – Date of access: 14.03.2026.

9. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York : Springer, 2006. – 738 p.

10. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. Deep Learning. – Cambridge : MIT Press, 2016. – 785 p.

УДК 510.589:628.81

ПРОГНОЗИРУЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОТОПЛЕНИЕМ

Асимова С.Р., Емельянчиков М.Ю., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Данная статься посвящена разработке математической модели тепловых процессов в помещении. Была рассмотрена система дифференциальных уравнений, включающая в себя теплообмен с внешней средой и работу радиатора. Проведено численное моделирование, показавшее оптимальность модели и её пригодность для практического применения. Доказано, что использование прогнозирующей модели повышает продуктивность системы, ускоряя прогрев помещения. Модель может быть применена как основа для создания энергоэффективных систем отопления с виртуальными датчиками температуры.

Ключевые слова. Термодинамика, УПМ, теплоемкость, дифференциальные уравнения, математическая модель.

Управление с прогнозирующими моделями (УПМ) – современный метод управления процессами, при котором будущее состояние переменных предсказывается на основе динамической модели системы. На основе такого прогноза управляющие воздействия могут быть рассчитаны с упреждением, что поднимает эффективность управления.

Одной из перспективных областей применения метода являются системы отопления и кондиционирования. Как правило, процесс изменения микроклимата в помещениях глубоко инерционный, и упреждающее управление, которое предлагает УПМ, позволит существенно повысить скорость и точность контроля [1].

Однако, использование классических методик расчета тепловой эффективности зданий не пригодно [2] для УПМ, так как в них исследуются характеристики помещений в условиях установившегося теплового баланса. Так же известные термодинамические модели [1, 4], мало применимы для УПМ, так как требуют большой вычислительной мощности и не могут использоваться в котроллерах управления.

Таким образом, разработка упрощенной математической модели, описывающей термодинамику помещения, является первоочередной задачей. В данной работе предложена такая модель, а также представлены результаты ее реализации и тестирования, поскольку разработка упрощенной термодинамической модели помещения является актуальной и позволит достаточно хорошо описать динамику тепловых процессов, в то же время не требуя определения большого количества параметров и существенной вычислительной мощности.

Базовая структура модели и применение формул. При разработке термодинамической модели были сделаны следующие допущения: прирост тепловой энергии в помещении происходит за счет отопительных приборов, а ее убыль за счет теплопотерь через внешние стены; смежные помещения имеют ту же температуру, что и исследуемое помещение, поэтому теплообменом с ними можно пренебречь; теплообмен через внешние стены описывается аппроксимацией показанной на рисунке 1.

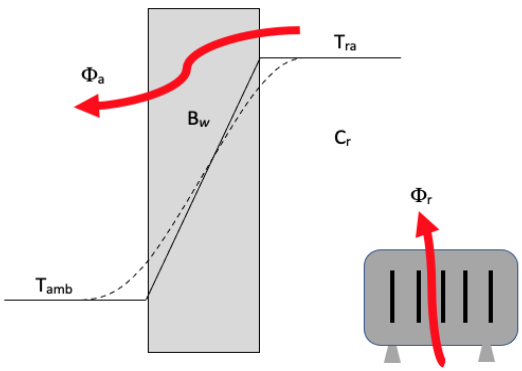


Рисунок 1 – модель теплообмена через внешние стены

Здесь T_{amb} и T_{ra} – температуры внешней среды и комнаты соответственно; параметр B_w описывает теплопроводность внешних стен; C_r – теплоемкость воздуха в помещении; Φ_r – тепловая

мощность, поступающая от радиатора отопления, а Φ_a – тепловая мощность, отдаваемая помещением через стены во внешнюю среду, которая описывается формулой:

$$\Phi_a = B_w \cdot (T_{amb} - T_{ra}). \quad (1)$$

Динамика теплообмена в такой модели может быть представлена простым дифференциальным уравнением.

$$C_r \frac{dT_{ra}}{dt} = \Phi_a + \Phi_r, \quad (2)$$

где левая часть уравнения (2) описывает процесс накопления тепла, а его правая часть – тепловую мощность, подаваемую и теряемую помещением.

Теплоемкость воздуха в помещении C_r можно рассчитать через удельную теплоемкость C_{air} и массу воздуха M_{air} следующим образом:

$$C_r = C_{air} \cdot M_{air}, \quad (3)$$

учитывая, что $C_{air} = 1010$ Дж/(кг · К), а M_{air} можно получить через плотность воздуха 1.2 кг/м^3, умноженную на объем помещения V, уравнение (3) запишется в виде:

$$C_r = 1010 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}\right] \cdot 1.2 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right] \cdot \text{V}[\text{м}^3] = 1212 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{·К}}\right] \cdot \text{V}[\text{м}^3]. \quad (3)$$

Тепловая мощность, отдаваемая радиатором отопления, может быть описана формулой (4) как:

$$\Phi_r = C_h \cdot \rho \cdot q \cdot (T_s - T_r), \quad (4)$$

где T_s – температура поступающей в радиатор воды, а T_r – температура возвращающейся из радиатора воды; ρ = 1000 кг/м^3 – плотность воды; q – поток воды через радиатор в м^3/с, а C_h – теплоемкость системы отопления. Если пренебречь теплоемкостью труб и радиатора, то теплоемкость системы отопления можно определить как:

$$C_h = C_w \cdot M_w, \quad (5)$$

где $C_w = 4180.6$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воды, а M_w – масса воды, задействованная в системе отопления.

Массу воды, задействованной в процессе, можно рассчитать, как плотность воды ρ =1000 кг/м^3, умноженную на поток воды через радиатор q в м^3/сек. Таким образом, формулу (4) можно переписать в виде:

$$\Phi_r = 4180.6 \left[\frac{\text{дж}}{\text{кг·К}}\right] \cdot 1000 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right] \cdot q \left[\frac{\text{м}^3}{\text{сек}}\right] \cdot (T_s - T_r). \quad (6)$$

С дугой стороны, тепловую мощность радиатора можно так же описать как его тепловое сопротивление B_r, умноженное на разницу температур радиатора и воздуха в комнате, при этом температуру радиатора можно приближенно описать как среднее значение между температурами поступающей и возвращающейся из радиатора воды:

$$\Phi_r = B_r \cdot \left(\frac{T_s + T_r}{2} - T_{ra}\right). \quad (7)$$

Запись системы уравнений исходных и искомых параметров. Используя формулы (1), (2), (3), (6) и (7), можно записать систему уравнений, описывающую теплообмен моделируемого помещения

$$\begin{cases} \Phi_r = B_r \cdot \left(\frac{T_s+T_r}{2} - T_{ra}\right), \\ \Phi_r = 4180600 \cdot q \cdot (T_s - T_r), \\ C_r \frac{dT_{ra}}{dt} = B_w \cdot (T_{amb} - T_{ra}) + \Phi_r, \\ C_r = 1212 \cdot V, \end{cases} \quad (8)$$

где входными (задаваемыми) параметрами являются T_{amb} – внешняя (наружная) температура, B_w – теплопроводность стены (стен), выходящих наружу, Br – теплопроводность радиатора, q – поток воды через радиатор, T_s – входная температура воды в радиаторе, V – объем помещения; а искомыми параметрами служат T_{ra} – температура помещения, T_r – температура возвращающейся из радиатора воды.

Результаты моделирования. Для оценки предложенной работоспособности модели была разработана программа на языке C^{++} и выполнены расчеты динамики температурных изменений для помещения размером 10м x 3м x 3м (объем V=90 м^3).

При расчете были использованы параметры модели: $V = 90$ м^3, $Bw = 2{,}9$ Вт/˚С, $Br = 10$ Вт/˚С, $q = 0{,}0001667$ м^3/сек, $T_{amb} = 0$˚С, $T_{ra} = 0$˚С .

На первом этапе имитировался прогрев комнаты при фиксированной температуре воды, подаваемой в батарею $T_s = 30$˚С. Результат симуляции представлен на рисунке 2.

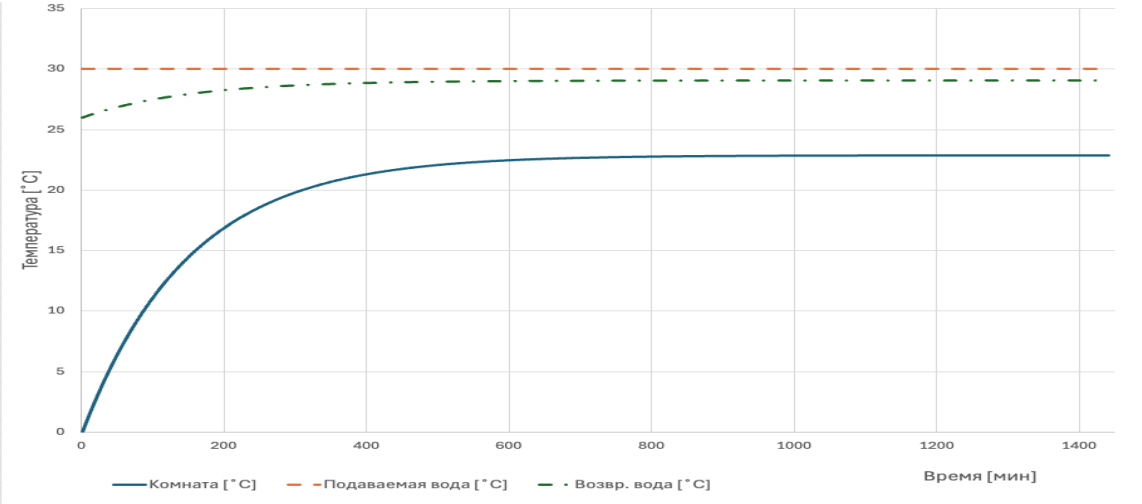


Рисунок 2 – симуляция прогрева комнаты при постоянной температуре подаваемой воды

Из полученного графика видно, что температура в комнате стабилизировалась на уровне 22˚С примерно через час после начала подачи воды, при этом разница температур подаваемой в радиатор и возвращаемой воды была сначала около 4 градусов и постепенно снижалась, достигнув со временем 1˚С. Это соответствует процессу снижения тепловой мощности, отдаваемой радиатором по мере прогрева помещения.

Графики, проиллюстрированные на рисунке 2, соответствуют ситуации, когда температура воды, подаваемой в радиатор фиксирована. Это не очень эффективный метод, так как стабилизация температуры комнаты происходит довольно долго. Если же активно управлять температурой подаваемой воды в зависимости от наблюдаемых условий, время прогрева можно будет существенно сократить.

На рисунке 3 приведены результаты симуляции, когда температура подаваемой воды меняется пропорционально разнице желаемой и текущей температуры в комнате. Для этой симуляции желаемая температура в комнате была установлена $T = 22$˚С и температура воды менялась с помощью управляющего воздействия в диапазоне от 0 до 100%, рассчитываемого пропорционально разнице текущей и заданной температуры в комнате. Управляющее воздействие в 100% приводило к подаче воды температурой 70˚С, а нулевое его значение снижало температуру до минимума в 30˚С.

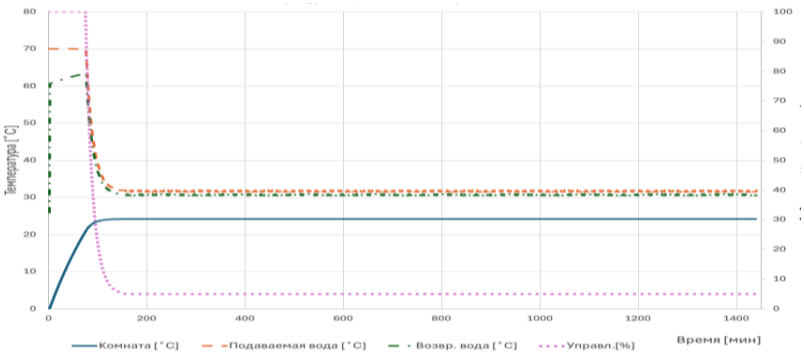


Рисунок 3 – симуляция прогрева комнаты при управлении температурой воды

Результаты симуляции показывают, что активное управление температурой воды позволит сократить время прогрева комнаты с одного часа до примерно трех минут. Однако на практике для реализации такого управления необходимо использовать датчик температуры в комнате, на основе показаний которого будет вырабатываться управляющее воздействие. Установка такого датчика в помещении может быть проблематичной, так как он должен располагаться на удалении от радиатора отопления и от других управляющих устройств.

Вместе с тем разработанная математическая модель позволяет отказаться от физического датчика, заменив его виртуальным. Таким виртуальным датчиком может служить расчетная температура комнаты, которую можно вычислить на основе косвенных параметров таких, как внешняя (наружная) температура и разница температур подаваемой и возвращаемой горячей воды. Наружная температура T_{amb} может быть получена из сети интернет с помощью сервисов прогноза погоды, а температуры T_s и T_r могут быть измерены прямо на трубах системы отопления. Параметры B_w, B_r и V будут неизменными и могут задаваться расчетным или экспериментальным путем при установке системы отопления.

При определении потока воды q через радиатор можно считать, что он не будет меняться часто, поскольку сопротивление труб и радиатора потоку практически постоянны, а давление воды в системе меняется редко и его можно периодически рассчитывать из системы (8), учитывая, что в условиях теплового равновесия изменение температуры в комнате стремиться к нулю:

$$\frac{dT_{ra}}{dt} \to 0. \tag{9}$$

Тогда из системы (8) можно записать следующее уравнение:

$$B_r \cdot \left(\frac{T_s+T_r}{2} - T_{ra}\right) + B_w \cdot (T_{amb} - T_{ra}) = 0. \tag{10}$$

Решив уравнение (10) для T_{ra}, получим:

$$T_{ra} = \frac{B_r \cdot \frac{T_s+T_r}{2} - B_w \cdot T_{amb}}{B_r+B_w}. \tag{11}$$

Отсюда и используя формулу (6), можно вычислить q.

Разработанная математическая модель, хотя и является упрощенной, позволяет достаточно хорошо описывать динамику тепловых процессов в отапливаемом помещении. Она может быть использована как прогнозирующая модель в системах УПМ, что позволит реализовать принцип упреждающего управления и повысив скорость и точность контроля. Так же на ее основе может быть разработана система управления отоплением с использованием виртуального датчика температуры помещения, что позволит снизить ее стоимость и трудоёмкость инсталляции.

Список использованных источников:

1. Марьясин О.Ю., Колодкина А.С. “Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей”, вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия Технические науки. 2017. № 1 (53). – С.122-132.

2. Богословский В.Н., Сканави А.Н. “Отопление”. Стройиздат. Москва. 1991. – 736 с.

3. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. – М.: Стройиздат, 1979. – 249 с.

4. Klaus Kaae Andersen et. al. “Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations”, Energy and Buildings 3 1 2000. – P. 13-24.

5. А.В. Пуговкин, и др. “Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения”, Доклады ТУСУРа, № 2 (22), часть 1, декабрь 2010. – С.293-298.

UDC 510.589:628.81

PREDICTIVE MATHEMATICAL MODEL OF A ROOM FOR HEATING CONTROL SYSTEMS

Asimava S.R., Emelyanchikov M.Y., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This article is devoted to the development of a mathematical model of indoor thermal processes. A system of differential equations was examined, including heat exchange with the external environment and radiator operation. Numerical simulation demonstrated the model's optimality and suitability for practical application. It was demonstrated that using a predictive model improves system performance, accelerating room heating. The model can be used as a basis for creating energy-efficient heating systems with virtual temperature sensors.

Keywords. Thermodynamics, MPC, thermal capacity, differential equations, mathematical model.

УДК 004.85

АНАЛИЗ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ В КОНТЕКСТЕ SVM

Березина С. В., Романов Д. А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лущакова И. Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной работе рассматриваются теоретические и практические аспекты ядерных методов в машинном обучении с фокусом на метод опорных векторов (SVM). Анализируется математический аппарат гильбертовых пространств и "ядерного трюка", позволяющего эффективно решать нелинейные задачи. Подробно разбираются геометрические свойства разделяющих гиперплоскостей, формулируются прямая и двойственная задачи оптимизации SVM, а также исследуется роль опорных векторов в построении классификатора.

Ключевые слова. Машинное обучение, метод опорных векторов, ядерные методы, нелинейная классификация, линейная разделимость, радиальная базисная функция, полиномиальное ядро, сигмоидальное ядро, обучение модели.

Ядерные методы решают нелинейные задачи классификации данных, неявно перенося данные в пространство большей размерности, где классы становятся линейно разделимыми, с помощью функции ядра $K(x, y)$, которая вычисляет скалярное произведение образов объектов без явного построения отображения. Метод опорных векторов (SVM) использует эту идею для поиска разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором между классами: линейный SVM применяется, когда данные линейно разделимы; в противном случае нелинейный SVM за счёт ядерного трюка строит более гибкие разделяющие поверхности.

1. Математические основы ядерных функций и метода опорных векторов

1.1 Линейный классификатор: постановка задачи

Фундаментальной задачей машинного обучения является задача классификации (разделения) данных на два класса. Рассмотрим формальную постановку: имеется обучающая выборка $(X, t) = \{x_n, t_n\}_{n=1}^{N}$, где каждый объект представлен признаковым описанием $x_n \in R^d$, и для него известна метка класса $t_n \in \{-1, +1\}$. Цель заключается в построении модели, способной предсказывать метку класса t для нового объекта x на основе выявленных закономерностей.

Одним из ключевых представителей линейных классификаторов является метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM). Линейные классификаторы принимают решение о принадлежности объекта классу на основе линейной комбинации признаков. Формально, это решение определяется знаком линейного решающего правила:

$$f(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{d} \omega_j x(j) + b = \boldsymbol{\omega^T x} + b, \qquad t(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} +1, \text{если } f(\boldsymbol{x}) \geq 0, \\ -1, \text{если } f(\boldsymbol{x}) < 0. \end{cases}$$

Здесь $\omega_j \in R$ представляют собой веса признаков, $b \in R$ — параметр сдвига (смещение). С геометрической точки зрения, линейный классификатор определяет в признаковом пространстве R^d разделяющую плоскость, задаваемую уравнением $f(\boldsymbol{x}) = 0$. Объекты, для которых значение $f(\boldsymbol{x})$ положительно, относятся к первому классу (+1), а объекты с отрицательным значением — ко второму (-1). Введем вспомогательную функцию $h(\boldsymbol{x}, t)$, формализующую правило принятия решения.

$$t(\boldsymbol{x}) = arg \max_{t \in \{-1,+1\}} h(\boldsymbol{x}, t) = arg \max_{t \in \{-1,+1\}} tf(\boldsymbol{x})$$

Объект *x* относится к такому классу *t*, для которого значение соответствующей линейной функции максимально.

1.2 Геометрия разделяющей гиперплоскости

Пусть заданы вещественные числа $\boldsymbol{\alpha_1, \ldots, \alpha_n}$, b, причем не все $\{\boldsymbol{\alpha_j}\}_{\boldsymbol{j=1}}^{\boldsymbol{n}}$ равны нулю. Уравнение

$$\boldsymbol{\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \ldots + \alpha_n x_n = b}$$

относительно переменных $\boldsymbol{x_1, \ldots, x_n}$ задает в пространстве $\boldsymbol{R_n}$ множество, называемое гиперплоскостью. Скалярное произведение векторов $\boldsymbol{X} = (\boldsymbol{x_1, x_2, \ldots, x_n})$ и $\boldsymbol{W} = (\boldsymbol{\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_n})$ задается формулой $\langle \boldsymbol{X, W} \rangle = \boldsymbol{x_1 \omega_1 + x_2 \omega_2 + \ldots + x_n \omega_n}$. Тогда уравнение гиперплоскости принимает следующий вид:

$$\langle \boldsymbol{X, W} \rangle + b = 0$$

Вектор $\boldsymbol{W} = (w_1, w_2, \ldots, w_n)$ интерпретируется как нормальный вектор к гиперплоскости.

Гиперплоскость разделяет R_n на два открытых полупространства: множество точек, для которых $\langle \boldsymbol{X}, \boldsymbol{W} \rangle + b > 0$, и множество точек, для которых $\langle \boldsymbol{X}, \boldsymbol{W} \rangle + b < 0$. Если к открытому полупространству присоединить все точки самой гиперплоскости, то получится замкнутое полупространство.

Если множество $S_1 \subset R^n$ целиком содержится в замкнутом полупространстве, а множество S_2 полностью лежит в противоположном открытом полупространстве, то гиперплоскость отделяет S_1 от S_2 и называется разделяющей гиперплоскостью для этих множеств. Для классов S_1, S_2 разделяющая гиперплоскость удовлетворяет условию $S_1 \subset \{\langle \boldsymbol{X}, \boldsymbol{W} \rangle + b \geq 0\}, S_2 \subset \{\langle \boldsymbol{X}, \boldsymbol{W} \rangle + b < 0\}$ (или наоборот).

1.3 Оптимальная разделяющая гиперплоскость

Среди бесконечного множества гиперплоскостей, разделяющих два класса, SVM выбирает ту, которая максимизирует зазор. Оптимальная гиперплоскость находится максимально далеко от точек обоих классов. Рассмотрим опорные векторы — объекты, которые лежат ближе всего к разделяющей гиперплоскости. Обозначим через $\boldsymbol{X}^+$ опорный вектор (т.е. точку) из класса +1, а через $\boldsymbol{X}^-$ — из класса −1. Оптимальная разделяющая гиперплоскость проходит через середину отрезка, соединяющего точки $\boldsymbol{X}^+$ и $\boldsymbol{X}^-$, и перпендикулярна этому отрезку. В векторной форме это условие записывается как:

$$\langle \boldsymbol{X} - \boldsymbol{X_C}, \boldsymbol{X}^+ - \boldsymbol{X}^- \rangle = 0, \qquad \text{где} \quad \boldsymbol{X_C} = \frac{\boldsymbol{X}^+ + \boldsymbol{X}^-}{\boldsymbol{2}}$$

Рассмотрим случай, когда объекты двух классов могут быть разделены линейно без ошибок. В этом случае мы можем провести гиперплоскость таким образом, чтобы она не просто отделяла классы друг от друга, а делала это с максимально возможным «зазором».

Введем понятие зазора (margin). Для фиксированной разделяющей гиперплоскости зазором между ней и классом называется наименьшее расстояние от гиперплоскости до объектов данного класса. Обозначим зазоры для положительного и отрицательного классов как d_+ и d_- соответственно. Тогда оптимальной разделяющей гиперплоскостью будет та, которая максимизирует минимальный из этих двух зазоров:

$$\min(d_+, d_-) \rightarrow \max_{\boldsymbol{\omega}, b}.$$

Чтобы выразить этот критерий в терминах параметров модели $\boldsymbol{\omega}$ и b, необходимо преодолеть их неоднозначность. Дело в том, что гиперплоскость, задаваемая уравнением $\boldsymbol{\omega^T x} + b = 0$, не меняется при умножении $\boldsymbol{\omega}$ и b на произвольную ненулевую константу. Устраним это, зафиксировав шкалу специальным образом.

Рассмотрим ближайшие к разделяющей гиперплоскости объекты обучения. Условимся, что линии (поверхности) уровня, проходящие через эти объекты, будут описываться уравнениями $f(\boldsymbol{x}) = 1$ для объектов класса (+1) и $f(\boldsymbol{x}) = -1$ для объектов класса (-1). Такая нормировка возможна, поскольку оптимальная гиперплоскость, всегда проходит ровно посередине между этими двумя линиями (поверхности) уровня.

Теперь вычислим величину зазора. Возьмем произвольный вектор $\boldsymbol{u_1}$, лежащий на самой гиперплоскости $\boldsymbol{\omega^T u_1} + b = 0$, и вектор $\boldsymbol{u_2}$ на линии (поверхности) уровня для первого класса $\boldsymbol{\omega^T u_2} + b = 1$. Вычитая первое равенство из второго, получаем $\boldsymbol{\omega^T}(\boldsymbol{u_2} - \boldsymbol{u_1}) = 1$. Зазор d_+ — это не что иное, как длина проекции вектора $(\boldsymbol{u_2} - \boldsymbol{u_1})$ на направление нормального вектора $\boldsymbol{\omega}$. Вычислив эту проекцию, находим:

$$pr_{\boldsymbol{\omega}}(\boldsymbol{u_2} - \boldsymbol{u_1}) = \frac{\boldsymbol{\omega^T}(\boldsymbol{u_2} - \boldsymbol{u_1})}{\|\boldsymbol{\omega}\|} = \frac{1}{\|\boldsymbol{\omega}\|}$$

Таким образом, искомый зазор обратно пропорционален норме вектора весов: $d_+ = d_- = 1/\|\boldsymbol{\omega}\|$. Следовательно, максимизация зазора эквивалентна минимизации величины $\|\boldsymbol{\omega}\|$.

Условия корректной классификации всех объектов с учетом введенной нормировки принимают вид системы неравенств:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega^T x_n} + b \geq 1, & \text{если } t_n = +1 \\ \boldsymbol{\omega^T x_n} + b < 1, & \text{если } t_n = -1 \end{cases}$$

Эти два условия можно объединить в одно:

$$t_n(\boldsymbol{\omega^T x_n} + b) \geq 1, \quad \forall n.$$

Объединив критерий максимизации зазора с ограничениями на корректную классификацию и заменив максимизацию $1/\|\omega\|$ на более удобную для оптимизации минимизацию $\frac{1}{2}\|\omega\|^2$, приходим к стандартной постановке задачи обучения SVM для линейно разделимого случая:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}\|\boldsymbol{\omega}\|^2 \to \min_{\boldsymbol{\omega},b} \\ t_n(\boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{x_n} + b) \geq 1, \quad n = 1,\dots,N \end{cases}$$

1.4 Прямая и двойственная задачи SVM.

Метод опорных векторов базируется на двух эквивалентных формулировках оптимизационной задачи. Прямая задача заключается в непосредственном поиске параметров разделяющей гиперплоскости — вектора весов $\boldsymbol{\omega}$ и сдвига b. Её цель — минимизировать норму $\boldsymbol{\omega}$ (что эквивалентно максимизации зазора) и суммарную ошибку на обучающих данных (если введены ослабляющие переменные ξ_n):

$$\frac{1}{2}\|\boldsymbol{\omega}\|^2 + C\sum_{n=1}^{N}\xi_n \to \min_{\boldsymbol{\omega},b,\xi}, \qquad t_n(\boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{x_n} + b) \geq 1 - \xi_n, \quad \xi_n \geq 0 \ \ \forall n.$$

Однако для дальнейшего развития метода гораздо удобнее оказывается двойственная задача, которая получается из прямой с помощью метода множителей Лагранжа и теоремы Куна–Таккера. Вместо $\boldsymbol{\omega}$ и b здесь переменными становятся множители λ_n (по одному на каждый объект обучения), а целевая функция и ограничения принимают вид:

$$-\frac{1}{2}\sum_{n,m=1}^{N}\lambda_n\lambda_m t_n t_m\langle x_n, x_m\rangle + \sum_{n=1}^{N}\lambda_n \to \max_{\lambda}, \qquad 0 \leq \lambda_n \leq C, \qquad \sum_{n=1}^{N}\lambda_n t_n = 0.$$

Решающее правило для нового объекта x представляется следующим образом:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{N}\lambda_n t_n(x_n, x) + b^*$$

где b^* находится из условий дополняющей нежёсткости для любого опорного вектора.

Двойственная формулировка удобна тем, что объекты входят в неё только через скалярные произведения, что позволяет заменить их на ядерную функцию и неявно перейти в пространство большей размерности. Кроме того, решение получается разреженным: большинство множителей λ_n равны нулю, а ненулевые соответствуют опорным векторам, которые и определяют положение разделяющей границы.

1.5 Нелинейный SVM, применение "ядерного трюка"

До сих пор мы рассматривали метод опорных векторов как способ построения оптимальной разделяющей гиперплоскости в исходном признаковом пространстве R^d. Однако реальные задачи классификации редко бывают линейно разделимыми. Граница между классами часто имеет сложную нелинейную форму. Основная идея преодоления нелинейности: если данные не разделяются линейно в текущем пространстве, нужно преобразовать их в другое пространство, где они станут линейно разделимыми.

В более общем виде, мы рассматриваем некоторое отображение $\Phi : R^d \to H$, которое переводит исходный объект *x* в новое пространство признаков *H*, обычно гораздо более высокой (иногда бесконечной) размерности. Задача SVM теперь заключается в построении оптимальной разделяющей гиперплоскости не для исходных объектов x_n, а для их образов $\Phi(x_n)$ в этом новом пространстве.

В данном случае не получится решить стандартную задачу SVM в простанстве *H.* Обратимся к *двойственной задаче оптимизации SVM*. Если мы переходим в пространство признаков *H*, все скалярные произведения заменяются на $\langle\Phi(x_n), \Phi(x_m)\rangle$. Ключевая идея ядерного метода заключается в том, чтобы заменить это скалярное произведение в пространстве признаков специальной функцией ядра, которая работает непосредственно с исходными объектами:

$$K(x_n, x_m) = \langle\Phi(x_n), \Phi(x_m)\rangle_H$$

Это и есть "ядерный трюк". Нам не нужно знать, как выглядит преобразование *Ф* или какова размерность пространства *H*. Достаточно определить функцию *K*, которая, будучи примененной к двум объектам исходного пространства, возвращает результат, эквивалентный их скалярному произведению в новом, более сложном пространстве. Все вычисления остаются в исходном пространстве, но мы при этом решаем нелинейную задачу.

Двойственная задача и решающее правило приобретают вид:

$$-\frac{1}{2}\sum_{n,m=1}^{N}\lambda_n\lambda_m\, t_n t_m K(x_n,x_m)+\sum_{n=1}^{N}\lambda_n \to \max_{\lambda}, \qquad 0\le\lambda_n\le C, \qquad \sum_{n=1}^{N}\lambda_n t_n = 0,$$

$$f(x)=\sum_{n=1}^{N}\lambda_n t_n K(x_n,x)+b^*.$$

Очевидно, что не любая функция двух аргументов может служить ядром. Чтобы функция $K(x,y)$ действительно соответствовала скалярному произведению в некотором пространстве *H*, она должна удовлетворять условию Мерсера. Не вдаваясь в тонкости, это условие требует, чтобы для любой интегрируемой со своим квадратом функции g выполнялось неравенство:

$$\iint_{X\,x\,X} K(x,y)g(x)g(y)dxdy \ge 0,$$

где X x X – область определения признаковых описаний. На практике это означает, что матрица попарных сходств (матрица Грама) для любого набора данных должна быть положительно полуопределенной.

Существует несколько классических ядер, удовлетворяющих этому условию и широко используемых на практике:

1. Линейное ядро: $K(x,y)=x^Ty$. Фактически возвращает нас к линейному SVM.
2. Полиномиальное ядро: $K(x,y)=(x^Ty+\theta)^d$, где $\theta\ge 0$, а $d\in N$ — степень полинома. Позволяет строить полиномиальные разделяющие поверхности.
3. Радиально-базисное ядро (RBF) или гауссово ядро: $K(x,y)=exp(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2})^d$, где $\sigma>0$ — ширина окна. Это самое популярное ядро, способное аппроксимировать любую гладкую границу. Оно обладает свойством локальности: близкие объекты влияют друг на друга сильнее, чем далекие.
4. Сигмоидное ядро: $K(x,y)=tanh(\alpha x^Ty+\beta)$. При определенных параметрах оно ведет себя как нейронная сеть.

2. Визуализация метода на основе простейших примеров.

2.1. Визуализация метода опорных векторов.

Пусть нам дана выборка линейно разделимых признаков, которые можно однозначно разместить на плоскости OXY. Выборка представлена на рисунке 1.

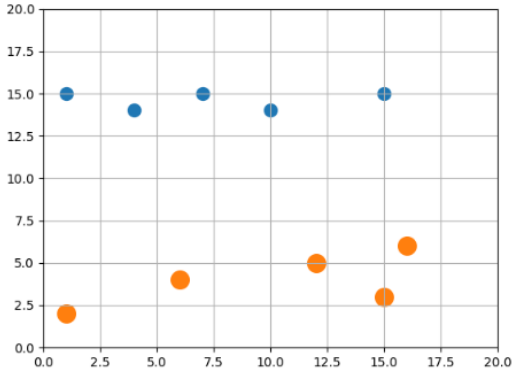


Рисунок 1 - Линейно разделимая выборка на плоскости.

Для решения задачи классификации осуществляется построение прямой, разделяющей пространство признаков. Существует множество возможных вариантов такого разделения, часть из которых представлена на рисунке 2. С использованием метода опорных векторов определяется оптимальная прямая, изображённая на рисунке 3. На данном рисунке центральная линия,

обозначенная как «separating hyperplane», представляет собой оптимальную разделяющую гиперплоскость, в рассматриваемом случае — прямую, максимизирующую ширину зазора.

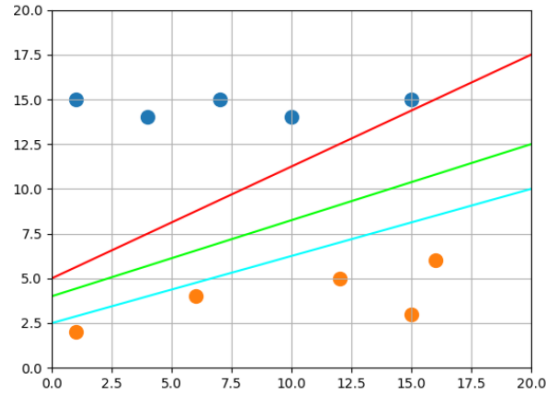


Рисунок 2 - Различные прямые, которые можно построить.

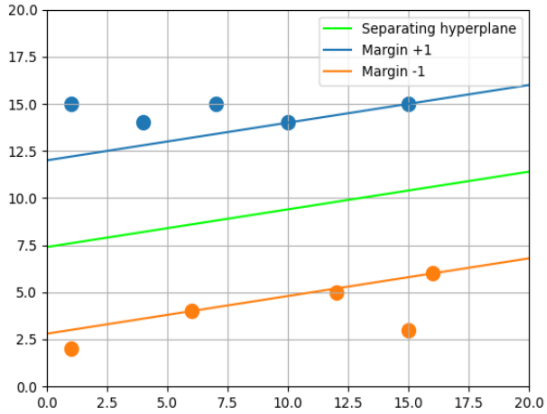


Рисунок 3 - Оптимальная прямая.

После определения оптимальной разделяющей гиперплоскости (в данном случае — прямой), можно перейти к проверке её практической эффективности. Для этого выполним предсказание принадлежности новых точек к одному из двух классов. На представленных рисунках объекты класса 1 отображены синими маркерами, тогда как объекты класса -1 обозначены оранжевыми маркерами. Такой шаг позволяет убедиться, что построенная модель корректно разделяет пространство признаков и способна обобщать информацию, выходящую за пределы обучающей выборки.

Пусть дана выборка из 3 точек с координатами (5, 19), (18, 1), (10, 7) (см. рисунок 4). Выполним предсказание для этих точек. Если модель предсказала что точка принадлежит классу 1, перекрасим метку в синий цвет, для класса -1 - в оранжевый. Результаты представлены на рисунке 5.

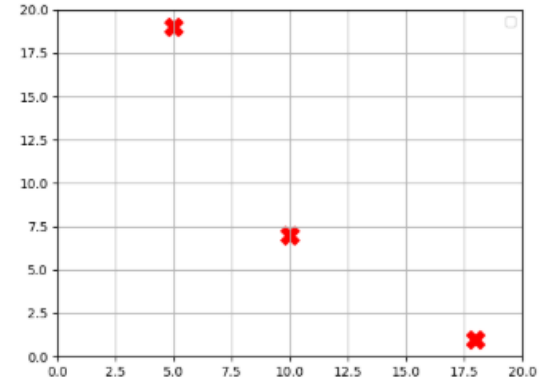


Рисунок 4 - Отображение на плоскости выборки для тестирования модели.

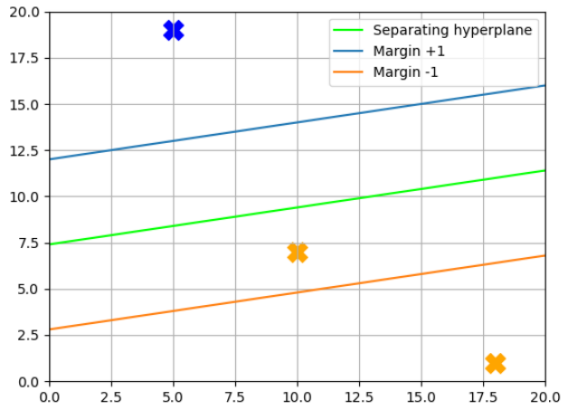


Рисунок 5 - Отображение предсказаний модели.

Проведённая проверка подтверждает, что обученная модель SVM обеспечивает устойчивое разделение классов и корректно классифицирует новые объекты, не участвовавшие в обучении.

2.2 Визуализация метода опорных векторов с применением ядерных методов.

Пусть дана выборка, представляющая собой классическую задачу "два кольца" — две концентрические окружности с добавлением небольшого шума. Такой набор данных широко используется для демонстрации ограничений линейных методов классификации: точки внутреннего круга относятся к первому классу, точки внешнего кольца — ко второму. В исходном двумерном пространстве невозможно провести прямую линию, которая разделила бы эти классы (см. рисунок 6). Возникает проблема линейной неразделимости, которую классический линейный SVM не способен преодолеть.

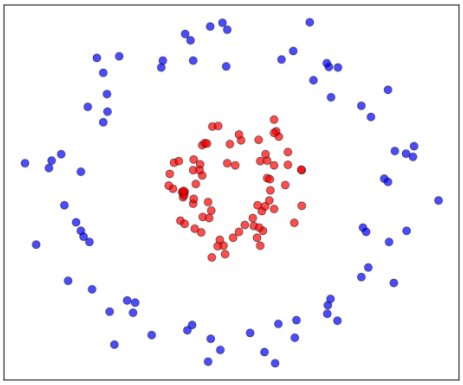


Рисунок 6 - Исходные данные (два кольца).

Для демонстрации эффективности ядерного подхода были обучены две модели SVM: с линейным ядром и с радиальным базисным ядром (RBF). Параметры моделей выбраны стандартными, обеспечивающими устойчивую работу алгоритма.

Как видно из представленной визуализации (см. рисунок 7), линейное ядро не справляется с поставленной задачей — разделяющая граница представляет собой прямую линию, которая не может корректно отделить один класс от другого. Точность классификации в данном случае оказывается на уровне случайного угадывания (~50%).

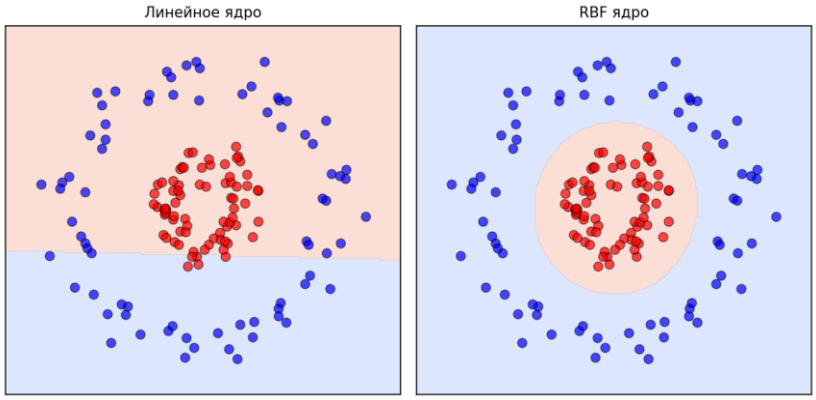


Рисунок 7 - Сравнение линейного и RBF ядер.

В отличие от линейного подхода, RBF ядро демонстрирует высокую эффективность. Разделяющая граница принимает сложную нелинейную форму, повторяющую геометрию исходных данных. Это наглядно иллюстрирует основное преимущество ядерных методов — возможность построения нелинейных разделяющих поверхностей без явного перехода в пространство признаков большей размерности.

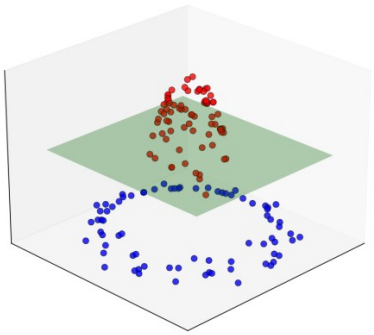


Рисунок 8 - Преобразование данных в трехмерное пространство.

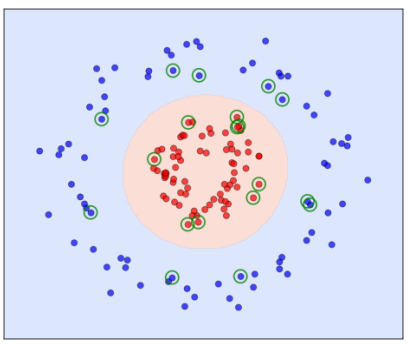


Рисунок 9 - Опорные векторы в модели с RBF ядром.

Для понимания механизма работы ядерных методов рассматривается геометрическая интерпретация RBF-ядра (см. рисунок 8). Идея заключается в неявном отображении исходных признаков в пространство большей размерности, где новые признаки зависят от расстояний между точками. Для каждой точки формируются характеристики, значения которых убывают с увеличением расстояния до других точек. Чем ближе точки расположены друг к другу, тем больше соответствующее значение признака; чем дальше — тем оно меньше. Благодаря этому классы становятся разделимыми простой плоскостью, проведенной на некоторой промежуточной высоте (зеленая плоскость на графике). То, что было невозможно в двумерном пространстве с помощью прямой, достигается в трехмерном пространстве с помощью плоскости.

Важной особенностью SVM является то, что решение определяется только опорными векторами — точками, которые лежат на границе разделяющей полосы или внутри нее. В случае нелинейной границы опорные векторы располагаются вдоль кривой, разделяющей классы. На представленном графике (рисунок 9) опорные векторы обведены окружностями. Можно заметить, что они располагаются преимущественно вблизи границы раздела классов, формируя "скелет" разделяющей поверхности. Именно эти точки вносят основной вклад в определение формы границы решения.

Проведенные эксперименты демонстрируют принципиальное преимущество ядерных методов перед линейным подходом в случае нелинейно разделимых данных. Геометрическая интерпретация ядерного преобразования показывает, что добавление даже одного признака, нелинейно зависящего от исходных, может перевести задачу в разряд линейно разделимых в пространстве большей размерности. Роль опорных векторов в формировании нелинейной границы решения оказывается определяющей — именно они задают форму разделяющей поверхности через ядерную функцию.

3. Применение метода опорных векторов на практике.

В рамках практического применения метода опорных векторов была рассмотрена задача бинарной классификации уровня дохода на основе социально‑демографических характеристик. Исходная выборка включала параметры, описывающие возраст, сферу занятости, уровень образования и другие социально‑экономические признаки. Для упрощения постановки задачи непрерывная переменная дохода была преобразована в бинарный признак: «доход выше 50 тысяч» и «доход ниже или равен 50 тысячам». Такое преобразование позволяет корректно использовать метод опорных векторов, ориентированный на решение задач бинарной классификации, и оценить его эффективность в условиях реальных данных.

Для начала была проведена предварительная обработка исходных данных, включающая анализ структуры выборки и устранение наиболее очевидных источников шума. Фрагмент необработанных данных представлен в таблице 1. С целью повышения линейной разделимости признакового пространства и соответственно улучшения качества классификации методом опорных векторов в набор данных была добавлена новая категориальная переменная *age_type*, отражающая возрастные группы (young, adult, old). Дополнительно было выявлено, что в столбцах *workclass*, *occupation* и *native_country* часто встречается символ «?», что, вероятно, связано с нежеланием респондентов раскрывать соответствующую информацию. Вместо удаления таких записей, что могло бы привести к потере значимых наблюдений, отсутствующие значения были заменены на *None*, что позволяет корректно обработать их в процессе обучения модели. Также для целевой переменной *income* была сформирована бинарная версия *income_num*, принимающая значение 1 при доходе выше или равном 50 тысячам и 0 в противном случае, что делает задачу полностью совместимой с бинарной природой метода опорных векторов. Фрагмент очищенной выборки приведён в таблице 2.

После выполнения предварительной очистки данных был проведён анализ ключевых признаков с целью выявления потенциальных недостатков выборки. Анализ распределения целевой переменной выявил существенный дисбаланс классов: доля наблюдений с доходом ниже 50 тысяч составила 76%, тогда как на долю наблюдений с доходом выше данного порога пришлось лишь 24% от общего объема выборки. Подобная диспропорция способна привести к переобучению модели и снижению её обобщающей способности, поэтому на последующих этапах была выполнена нормализация и балансировка данных. Дополнительный анализ признаков выявил выраженные выбросы в столбцах *capital_gain* и *capital_loss*, что видно из таблицы 1. Наличие подобных аномальных значений может негативно повлиять на устойчивость и точность модели, поэтому наблюдения с экстремальными значениями по данным признакам были исключены из выборки.

Таблица 1 - Необработанные данные.

	age	workclass	education	education_num	marital_status	occupation	relationship	sex	capital_gain	capital_loss	hours_per_week	native_country	income	age_types	income_num
20227	40	?	Masters	14	Divorced	?	Own-child	Female	0	0	55	United-States	<=50K	adult	0
1888	22	Self-emp-not-inc	HS-grad	9	Never-married	Other-service	Own-child	Male	0	0	40	Greece	<=50K	young	0
10564	38	Federal-gov	HS-grad	9	Married-civ-spouse	Transport-moving	Husband	Male	0	2051	40	United-States	<=50K	adult	0
9117	25	Private	Some-college	10	Never-married	Craft-repair	Own-child	Female	0	0	50	United-States	<=50K	adult	0
21754	49	Self-emp-inc	Some-college	10	Married-civ-spouse	Exec-managerial	Husband	Male	15024	0	50	United-States	>50K	adult	1
4922	30	Local-gov	Some-college	10	Never-married	Adm-clerical	Not-in-Family	Male	0	0	40	United-States	<=50K	adult	0
9339	46	Private	Some-college	10	Divorced	Sales	Unmarried	Female	0	0	40	Cuba	<=50K	adult	0
4680	39	Private	Bachelors	13	Married-civ-spouse	Exec-managerial	Husband	Male	15024	0	50	United-States	>50K	adult	1
17258	23	Private	HS-grad	9	Never-married	Other-service	Own-child	Male	0	0	12	United-States	<=50K	young	0
16294	34	?	HS-grad	9	Married-civ-spouse	?	Husband	Male	2885	0	80	United-States	<=50K	adult	0

Таблица 2 - Обработанные данные.

	age	workclass	education	education_num	marital_status	occupation	relationship	sex	capital_gain	capital_loss	hours_per_week	native_country	income	age_types	income_num
21086	43	Private	Some-college	10	Married-civ-spouse	Handlers-cleaners	Husband	Male	0	0	40	United-States	>50K	adult	1
22657	51	Private	HS-grad	9	Married-civ-spouse	Tech-support	Husband	Male	0	0	40	United-States	<=50K	adult	0
6037	26	Self-emp-not-inc	7th-8th	4	Married-civ-spouse	Transport-moving	Husband	Male	0	0	75	United-States	<=50K	adult	0
25145	52	Private	7th-8th	4	Married-civ-spouse	Other-service	Husband	Male	0	0	48	Cuba	<=50K	adult	0
15638	39	Private	Prof-school	15	Divorced	Exec-managerial	Not-in-family	Male	0	0	50	United-States	<=50K	adult	0
20894	19	Private	HS-grad	9	Never-married	Other-service	Own-child	Male	0	0	15	United-States	<=50K	young	0
15313	57	Private	HS-grad	9	Married-civ-spouse	Craft-repair	Husband	Male	0	0	40	United-States	<=50K	adult	0
25813	56	NaN	HS-grad	9	Divorced	NaN	Not-in-family	Male	0	0	40	United-States	<=50K	adult	0
4719	39	Private	Bachelors	13	Divorced	Exec-managerial	Not-in-family	Female	0	0	25	United-States	<=50K	adult	0
6492	50	Self-emp-inc	Prof-school	15	Married-civ-spouse	Prof-specialty	Husband	Male	0	0	75	United-States	>50K	adult	1

После выполнения предварительной очистки данных был сформирован набор признаков, пригодный для последующего обучения модели. Далее была проведена категоризация всех строковых признаков посредством процедуры кодирования, что позволило преобразовать их в числовое представление, совместимое с алгоритмами машинного обучения. На заключительном этапе была выполнена нормализация данных. Результат всех этапов подготовки данных представлен в таблице 3.

Таблица 3. Результат подготовки данных.

	age	workclass	education	education_num	marital_status	occupation	relationship	sex	capital_gain	capital_loss	hours_per_week	native_country
0	0.301370	0.750	0.600000	0.800000	0.666667	0.000000	0.2	1.0	0.052626	0.0	0.397959	0.926829
1	0.452055	0.625	0.600000	0.800000	0.333333	0.214286	0.0	1.0	0.000000	0.0	0.122449	0.926829
2	0.287671	0.375	0.733333	0.533333	0.000000	0.357143	0.2	1.0	0.000000	0.0	0.397959	0.926829
3	0.493151	0.375	0.066667	0.400000	0.333333	0.357143	0.0	1.0	0.000000	0.0	0.397959	0.926829
4	0.150685	0.375	0.600000	0.800000	0.333333	0.642857	1.0	0.0	0.000000	0.0	0.397959	0.097561

После завершения этапов очистки и нормализации данных выборка была разделена на обучающую и тестовую подвыборки. Такой подход позволяет объективно оценить способность модели обобщать информацию и корректно работать с данными, которые модель еще не видела.

Проведённые эксперименты показали, что метод опорных векторов демонстрирует устойчивые результаты при решении задачи бинарной классификации уровня дохода. Обучение модели с линейным ядром дало среднюю точность 0.834 на обучающей выборке (по результатам перекрёстной проверки) и 0.827 на тестовой выборке, что свидетельствует о хорошем балансе между способностью модели выявлять закономерности и её обобщающей способностью. Применение радиально‑базисного ядра (RBF) не привело к улучшению качества классификации: показатели точности полностью совпали с результатами линейной модели. Это может указывать на то, что после предварительной обработки, нормализации и кодирования признаков структура данных стала близкой к линейно разделимой, и использование более сложного ядра не дало дополнительного выигрыша. В совокупности результаты позволяют заключить, что для данной задачи линейная модель SVM является не только достаточной, но и оптимальной с точки зрения соотношения сложности и качества классификации.

Список использованных источников:

1. Метод опорных векторов [Электронный ресурс]. – URL: https://vmath.ru/vf5/users/au/svm. – Дата доступа: 03.03.2026.

2. Метод опорных векторов в стандартной задаче классификации [Электронный ресурс]. – URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/2/25/smais11_svm.pdf. – Дата доступа: 03.03.2026.

3. Понимание пространства ядер в машинном обучении [Электронный ресурс] / Хабр. – URL: https://habr.com/ru/articles/814343/. – Дата доступа: 03.03.2026.

4. Income classification dataset [Электронный ресурс] – URL: https://www.kaggle.com/datasets/lodetomasi1995/income-classification - Дата доступа: 06.03.2026.

UDC 004.85

ANALYSIS OF KERNEL METHODS IN THE CONTEXT OF SVM

Biarezina S. V., Romanov D. A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Lushchakova I. N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This article examines the theoretical and practical aspects of kernel methods in machine learning, focusing on the support vector machine (SVM). It analyzes the mathematical formalism of Hilbert spaces and a "kernel trick" that allows for the efficient solution of nonlinear problems. The geometric properties of separating hyperplanes are examined in detail, the primal and dual SVM optimization problems are formulated, and the role of support vectors in classifier construction is explored.

Keywords. Machine learning, support vector machine, SVM, kernel methods, kernel trick, classification, feature space, nonlinear classification, linear separability, radial basis function, polynomial kernel, sigmoid kernel, model training, test set.

УДК 517.9:004.8

ОБЫКНОВЕННЫЕ ДИФФЕПЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ КАК МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ВРЕМЕНИ

Богуш Р.Д.; Телипко Д.А.; Доценко Е.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь.

Лущакова И.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматривается класс рекуррентных нейронных сетей с непрерывным временем – нейронные сети с текучей временной константой, в которых динамика скрытых состояний описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). В отличие от традиционных подходов, константа времени таких сетей не является фиксированной, а изменяется в зависимости от входных данных, что обеспечивает повышенную выразительность и стабильность модели. Описываются математические основы модели, метод численного решения, сферы применения и дальнейшие перспективы ее использования. В данной работе представлены результаты экспериментального сравнения двух моделей (ДКП и ТКВ), выполненного с использованием языка программирования Python. Полученные результаты демонстрируют превосходство архитектуры ТКВ над ДКП.

Ключевые слова. Обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ), нейронные сети непрерывного времени, рекуррентные нейронные сети (РНС), нейронные обыкновенные дифференциальные уравнения (нейронные ОДУ), текучая константа времени (ТКВ), нейронные сети с текучей временной константой, долгая краткосрочная память (ДКП).

1. Введение. Нейронные сети с непрерывным временем, основанные на обыкновенных дифференциальных уравнениях, представляют собой перспективное направление в области глубокого обучения. Они позволяют моделировать временные зависимости в данных, которые имеют нерегулярную природу – например, медицинские показатели, промышленные датчики или финансовые временные ряды.

Классические рекуррентные нейронные сети (РНС), например, ДКП работают в дискретном времени и не способны естественным образом описывать непрерывную динамику систем. Для решения проблемы с описанием непрерывных событий были предложены нейронные ОДУ [1]. Данный способ устранил этот недостаток, однако обладал ограниченной выразительностью. В работе [2] предложена модель ТКВ, которая расширяет семейство нейронных ОДУ за счёт введения входозависимой константы времени.

2. Математическая модель ТКВ. Классические РНС имеют дискретную среду и описываются следующим уравнением:

$$h_{n+1} = h_n + f(h_n, \Theta), \tag{1}$$

где h_n – скрытое состояние сети РНС; h_{n+1} – скрытое состояние сети РНС на следующем шаге; $f(h_n, \Theta)$ – нейросеть, вычисляющая поправку скрытого состояния на каждом шаге; Θ – обучаемые веса нейросети f.

Уравнение (1) представляет собой базовое уравнение РНС. В данное уравнение не входит переменная времени, следовательно, такая нейронная сеть не может качественно реагировать на непрерывные события.

Для решения описанной проблемы, от базового уравнения РНС (1) переходят к дифференциальному уравнению.

Для этого уравнение (1) запишем в следующем виде:

$$h_{n+1} - h_n = f(h_n, \Theta)$$

До этого между шагами проходила одна единица времени, после она была заменена на Δt – реальный промежуток времени между шагами. Тогда формула примет вид:

$$\frac{h_{n+1} - h_n}{\Delta t} = \frac{f(h_n, \Theta)}{\Delta t}$$

При $\Delta t \to 0$ левая часть $\frac{h_{n+1}-h_n}{\Delta t}$ становится равной производной от h по переменной t, а правая часть превращается в совершенно новую функцию. Тогда новое уравнение примет вид дифференциального уравнения:

$$\frac{dh}{dt} = f(h(t), I(t), \Theta)$$

Однако нейроны имеют свойство затухания их состояния, поэтому для сохранения этого свойства к уравнению добавим затухание, зависящее от константы времени τ *:*

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{h(t)}{\tau} + f(h(t), I(t), \Theta), \quad (2)$$

где $h(t)$ – скрытое состояние сети в момент времени *t;* $\frac{dh}{dt}$ – скорость изменения скрытого состояния в момент времени *t;* τ – константа времени, определяющая скорость затухания; $I(t)$ – входной сигнал в момент времени *t; t* – непрерывное время*;* Θ – обучаемые веса нейросети *f;* $f(h(t), I(t), \Theta)$ – нейронная сеть, вычисляющая поправку скрытого состояния на основе текущего скрытого состояния*,* входного сигнала и обучаемых весов.

Уравнение (2) представляет собой нейронное ОДУ (Neural ODE).

В уравнении учитывается константа времени, однако она является фиксированной, что ограничивает её выразительную способность. Реальные биологические нейронные сети демонстрируют широкий спектр временных масштабов и способны менять скорость реакции нейронов. Поэтому имеет смысл рассмотреть усовершенствованную версию нейронных ОДУ – так называемую модель ТКВ.

Если в ОДУ (2) заменить нелинейный член $f(h(t), I(t), \Theta)$ на специальную структуру вида $S(t) = f(h(t), I(t), \Theta) \cdot (A - h(t))$, где *A* – это константный вектор, который представляет точку равновесия, к которой стремится система, а *h(t)* тоже представляет собой вектор с запоминаемой информацией в момент времени *t*. Тогда подставим $S(t)$ в уравнение (2) вместо $f(h(t), I(t), \Theta)$ и раскроем скобки:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{h(t)}{\tau} + f(h(t), I(t), \Theta) \cdot (A - h(t)) \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{h(t)}{\tau} + f(h(t), I(t), \Theta) \cdot A - f(h(t), I(t), \Theta) \cdot h(t)$$

$$\frac{dh}{dt} = -h(t) \cdot \left(\frac{1}{\tau} + f(h(t), I(t), \Theta)\right) + f(h(t), I(t), \Theta) \cdot A\,, \quad (4)$$

В уравнении (2) коэффициент затухания $-\frac{1}{\tau}$, где τ – это независимая константа, теперь же коэффициент затухания зависит ещё и от $f(h(t), I(t), \Theta)$. Обозначим этот коэффициент затухания τ_{sys}

$$\frac{1}{\tau_{sys}} = \left(\frac{1}{\tau} + f(h(t), I(t), \Theta)\right) = \left(\frac{1+\tau \cdot f(h(t), I(t), \Theta)}{\tau}\right),$$

$$\tau_{sys} = \left(\frac{\tau}{1 + \tau \cdot f(h(t), I(t), \Theta)}\right)$$

Тогда уравнение (4) примет вид:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{h(t)}{\tau_{sys}} + f(h(t), I(t), \Theta) \cdot A \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой идею ТКВ. Ключевым отличием данной формулировки является то, что эффективная константа времени системы τ_{sys} теперь зависит от входных данных.

Это свойство и дало название модели – «жидкая» (liquid). Каждый нейрон сети адаптирует свою динамику под текущие входные данные, что позволяет сети выделять специализированные динамические режимы для различных входных признаков.

3. Биологическая мотивация LTC. Идея модели LTC изначально была основана на наблюдениях за биологически мотивированной динамикой несинаптических нейронов малых организмов, в

частности нематоды *C. Elegans*, у которой всего 302 нейрона, но она способна ориентироваться в пространстве, находить пищу и избегать опасных веществ. Несмотря на минимальное количество нейронов, червь демонстрирует температурную память и даже элементы социального поведения. Строение нейронной системы нематоды представлено на рисунке 1.

Внутри этих организмов не происходит дискретных вычислений, вместо этого нейроны в реальном времени могут изменять свои свойства и реагировать на различные входные данные.

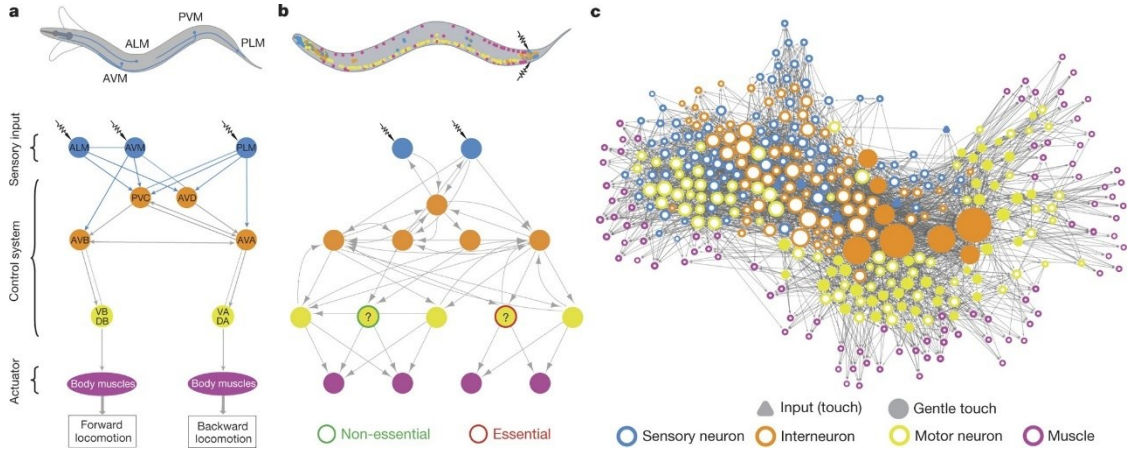


Рисунок 1. Нейронная система нематоды *C. Elegans*

Таким образом, для описания такого поведения математически необходимо представить его с помощью дифференциальных уравнений. Потенциал нейрона *v(t)* описывается уравнением:

$$\frac{dv}{dt} = -g_l \cdot v(t) + S(t)\ , \tag{6}$$

где $v(t)$ – потенциал мембраны нейрона; $\frac{dv}{dt}$ – скорость изменения потенциала; g_l – проводимость утечки; $S(t)$ – суммарный синаптический ток.

$$\boldsymbol{S(t) = f(v(t), I(t), \Theta) \cdot (A - v(t))}\ , \tag{7}$$

где $f(v(t), I(t), \Theta)$ – сила синаптической связи; $(A - v(t))$ – разница потенциалов между точкой равновесия и текущим состоянием; $I(t)$ – входной сигнал.

Раскрывая скобки, получаем следующее уравнение:

$$\frac{dv}{dt} = -v(t) \cdot \Big(g_l + f\big(v(t), I(t)\big)\Big) + f\big(v(t), I(t)\big) \cdot A \tag{8}$$

Нетрудно заметить, что уравнения (3) и (8) одинаковы. В них g_l и $\frac{1}{\tau}$ являются идентичными величинами.

4. Численное решение ОДУ: метод слитного решателя. При решении ОДУ учитываются два ключевых фактора:

- устойчивость – свойство численного метода не усиливать ошибки при интегрировании.
- эффективность – соотношение между точностью результата и вычислительными затратами на его получение.

ОДУ, описывающее динамику ТКВ, является “жёстким”, то есть решение его явными численными методами (например, методом Рунге-Кутты) является неудовлетворительным из-за резкого увеличения числа вычислений (при малом шаге интегрирования) или из-за резкого возрастания погрешности.

Поэтому необходимо использовать более комплексный подход. Например в статье [2] предложен специальный слитный решатель (Fused ODE Solver), объединяющий явный и неявный методы Эйлера. Идея состоит в том, чтобы нелинейные части $(-\frac{h(t)}{\tau_{sys}})$ вычислять в точке $h(t_i)$ (как в явном методе), а линейные – в точке $h(t_{i+1})$ (как в неявном). Аналитическое решение полученного уравнения даёт формулу обновления:

$$h(t + \Delta t) = \frac{h(t) + \Delta t \cdot f(x(t), I(t), t, \Theta) \cdot A}{1 + \Delta t \cdot (\frac{1}{\tau} + f(x(t), I(t), t, \Theta))} \quad (9)$$

Данная формула сочетает вычислительную эффективность явного метода Эйлера с устойчивостью неявного. Вычислительная сложность алгоритма составляет O(L×T), где L – число шагов дискретизации, T – длина входной последовательности.

5. Свойства модели: стабильность и ограниченность. Одним из важных теоретических результатов является доказательство ограниченности как константы времени, так и скрытых состояний нейронов LTC, то есть доказательство того, что они остаются в конечном диапазоне при любых входных данных и не уходят в ноль или в бесконечность.

Теорема 1 [2] (ограниченность константы времени). При использовании ограниченной монотонно возрастающей сигмоидальной функции f эффективная константа времени τ_{sys} нейрона i ограничена диапазоном:

$$\frac{\tau_i}{1+\tau_i \cdot W_i} \leq \tau_{sys} \leq \tau_i \ , \quad (10)$$

где τ_i – базовая константа времени *i*-ого нейрона; τ_{sys} – изменяемая константа времени нейрона; W_i – это максимально возможное значение функции *f* для нейрона *i, i* – номер нейрона.

Из формулы $\tau_{sys} = \left(\frac{\tau_i}{1+\tau_i \cdot f(h(t), I(t), \Theta)}\right)$ следует:

если f$(h(t), I(t), \Theta)$=0 (нейрон не получает значимого входа), то знаменатель минимален, τ_{sys}=τ_i – это верхняя граница;

если f$(h(t), I(t), \Theta) = W_i$ (нейрон насыщен), то знаменатель максимален, $\tau_{sys} = \left(\frac{\tau_i}{1+\tau_i \cdot W_i}\right)$ – это нижняя граница.

Теорема 2 [2] (ограниченность скрытых состояний). Скрытое состояние любого нейрона *i* на конечном интервале *[0, T]* удовлетворяет неравенству:

$$\left(0, A_i^{min}\right) \leq h_i(t) \leq max(0, A_i^{max}) \ , \quad (11)$$

где A_i^{min} и A_i^{max} – минимальное и максимальное значения вектора равновесия *A* из формулы (3) для нейрона *i*.

Данное свойство, называемое стабильностью состояний, гарантирует, что выходы ТКВ никогда не «взрываются», даже если входные данные неограниченно возрастают. Это делает ТКВ пригодным для применения в системах реального времени.

6. Экспериментальные результаты. Далее представлены результаты проведённого нами эксперимента. В этом эксперименте были обучены две модели разных архитектур (ТКВ(LTC) и ДКП(LSTM) и выполнены сравнения результатов предсказаний двух нейросетей. В эксперименте используется набор данных дорожного трафика, взятый с сайта Kaggle.com [3].

Для начала были подключены основные библиотеки языка Python для работы с данными и моделями машинного обучения. Также был загружен основной файл с входными данными для обучения моделей и были обработаны признаки этих данных, в результате чего осталось только 3 обучаемых признака.

```
sns.set_theme(style="darkgrid")

# Загрузка файла с данными

df = pd.read_csv('Metro_Interstate_Traffic_Volume.csv')

# Обработка признаков

features = ['temp', 'clouds_all', 'traffic_volume']
data = df[features].values

scaler = MinMaxScaler()
data_scaled = scaler.fit_transform(data)
```

После этого данные были разбиты на тренировочную и тестовую выборку для предотвращения переобучения моделей.

```
def create_sequences(data, seq_length):  1 usage
    X, y = [], []
    for i in range(len(data) - seq_length):
        X.append(data[i:(i + seq_length)])
        y.append(data[i + seq_length, 2])
    return np.array(X), np.array(y)

SEQ_LENGTH = 24
X, y = create_sequences(data_scaled, SEQ_LENGTH)

split = int(0.8 * len(X))
X_train, X_test = X[:split], X[split:]
y_train, y_test = y[:split], y[split:]
```

При создании моделей мы указываем, что обе модели будут обучаться с использованием оптимизатора Adam, а в качестве функции потерь было выбрано среднеквадратичное отклонение(MSE). Модели импортируем из библиотек Tensorflow и ncps.

```
# Создание моделей
lstm_model = Sequential([
    Input(shape=(SEQ_LENGTH, X_train.shape[2])),
    LSTM( units: 32, activation='tanh'),
    Dense(1)
])
lstm_model.compile(optimizer='adam', loss='mse')

wiring = AutoNCP( units: 32,  output_size: 1)
ltc_model = Sequential([
    Input(shape=(SEQ_LENGTH, X_train.shape[2])),
    TimeDistributed(Dense( units: 16, activation='tanh')),
    LTC(wiring, return_sequences=False)
])
ltc_model.compile(optimizer='adam', loss='mse')
```

После этого мы обучаем наши модели на уже обработанном наборе данных и проводим прогнозирование значений

```
# Обучение моделей LSTM и LTC

EPOCHS = 10
BATCH_SIZE = 64


lstm_model.fit(X_train, y_train, epochs=EPOCHS, batch_size=BATCH_SIZE, validation_split=0.1, verbose=1)

print("\n--- Обучение LTC ---")
ltc_model.fit(X_train, y_train, epochs=EPOCHS, batch_size=BATCH_SIZE, validation_split=0.1, verbose=1)

# Прогнозирование значений
lstm_predictions = lstm_model.predict(X_test)
ltc_predictions = ltc_model.predict(X_test)

def get_final_signal(data, window=3):  1 usage
    return np.convolve(data, np.ones(window)/window, mode='same')

# Прогнозирование значений
lstm_predictions = lstm_model.predict(X_test)
ltc_predictions = ltc_model.predict(X_test)

def get_final_signal(data, window=3):  1 usage
    return np.convolve(data, np.ones(window)/window, mode='same')
```

В результате были получены следующие результаты, показанные на рисунке 2.

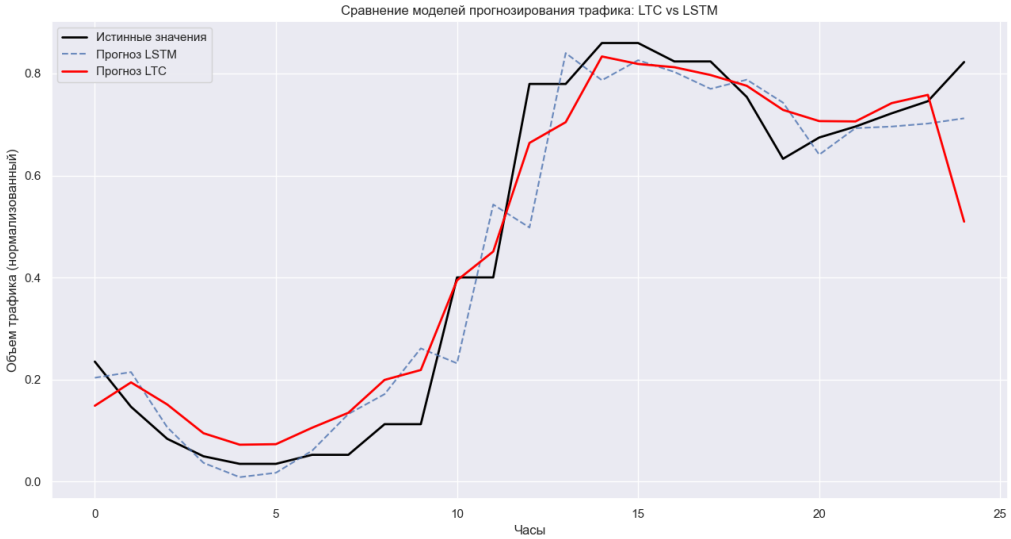


Рисунок 2. График точности предсказаний моделей LSTM и LTC

По данному графику можно увидеть, что LTC имеет более точные значения в местах взлетов и падений. Также видно, что график прогноза LTC имеет более “гладкую” форму, что обусловлено непрерывностью времени, которая заложена в нейронной сети LTC. По данным результатам можно сделать вывод, что модель LTC имеет более точные значения в случаях непрерывных поступлений данных.

7. Сферы применения и ограничения модели. ТКВ применяются в различных направлениях, где необходимо работать с данными в настоящем времени. Одно из наиболее распространенных применений заключается в управлении автономными транспортными средствами, например автомобилями и беспилотными летательными аппаратами. Это является хорошим примером использования ТКВ, так как они хорошо справляются с преобразованием шумов из входных данных, а также используют значительно меньше нейронов, что делает их более компактными, чем модели-конкуренты. Также одним из частых применений данного вида рекуррентных нейронных сетей является прогнозирование временных рядов, например в областях финансов или медицины.

Несмотря на преимущества, ТКВ имеет ряд ограничений. Во-первых, модель подвержена проблеме затухания градиентов при обучении на длинных последовательностях, что затрудняет

моделирование долгосрочных зависимостей. Во-вторых, производительность сильно зависит от выбора численного решателя ОДУ – использование простого явного метода Эйлера вместо рекомендованного слитного решателя заметно снижает качество. В-третьих, ТКВ требует значительно больше памяти по сравнению с нейронными ОДУ, что может стать ограничением при работе с большими моделями.

Дальнейшие направления исследований включают преодоление проблемы затухания градиентов для моделирования долгосрочных зависимостей, снижение вычислительных затрат, а также изучение причинно-следственных структур в динамике ТКВ.

Список использованных источников:

1. Chen T.Q., Rubanova Y., Bettencourt J., Duvenaud D.K. Neural Ordinary Differential Equations // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2018. — С. 6571–6583.

2. Hasani R., Lechner M., Amini A., Rus D., Grosu R. Liquid Time-constant Networks // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. — 2021.

3. https://www.kaggle.com/datasets/anshtanwar/metro-interstate-traffic-volume.

UDC 517.9:004.8

ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS AS THE MATHEMATICAL FOUNDSTION OF CONTINUOUS-TIME NEURAL NETWORKS

Bogush R.D.,Telipko D.A., Docenko E.V. students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Lushakova I.N. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. This paper examines a class of continuous-time recurrent neural networks known as Liquid Time-Constant Networks (LTC), in which the dynamics of hidden states are described by a system of ordinary differential equations (ODEs). Unlike traditional approaches, the time constant of such networks is not fixed but varies depending on the input data, which provides enhanced expressiveness and model stability. The mathematical foundations of the model, the numerical solution method, areas of application, and prospects of the model are described. We present the results of an experimental comparison of two models (LSTM and LTC) conducted using the Python programming language. The obtained results demonstrate the superiority of the LTC architecture over LSTM.

Keywords. Ordinary differential equations (ODE), continuous-time neural networks, recurrent neural networks (RNN), neural ordinary differential equations (neural ODEs), liquid time-constant (LTC), liquid time-constant neural networks, long short-term memory (LSTM).

УДК 003.26:511.176

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КРИПТОГРАФИИ: ПРИМЕНЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФИБОНАЧЧИ

Болбас К.В., Филипова А.Д., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лущакова И.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В статье исследована возможность применения последовательности Фибоначчи для шифрования текстовых сообщений. Основная идея заключается в использовании индексов Фибоначчи как основы для перестановочного шифра. В статье приведены теоретические основы, описана собственная реализация алгоритма на Python, проведено тестирование на различных текстах и выполнен анализ криптостойкости. Полученные результаты показывают, что предложенный метод пригоден для учебных целей и может служить основой для более сложных систем шифрования, хотя в чистом виде не обеспечивает достаточной стойкости для серьёзных применений.

Ключевые слова: криптография, последовательность Фибоначчи, шифрование, период Пизано, алгоритм.

Проблема защиты информации возникает постоянно – начиная с паролей от социальных сетей и заканчивая банковскими данными. За последние годы мы все стали свидетелями нескольких громких утечек данных, что заставляет задуматься о надёжности современных методов шифрования. В данной работе предпринята попытка разобраться в математических основах криптографии на конкретном примере. Последовательность Фибоначчи привлекает внимание по нескольким причинам. Во-первых, она изучается ещё в школе, но при этом обладает глубокими свойствами. Во-вторых, существует множество попыток использовать эту последовательность в криптографии, что говорит о её потенциальной применимости [1, с. 45].

1.ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФИБОНАЧЧИ

1.1. Математические свойства последовательности Фибоначчи. Последовательность Фибоначчи была описана европейским математиком Леонардо из Пизы (Фибоначчи) в трактате «Liber Abaci» в 1202 году при решении задачи о размножении кроликов [2, с. 456]. Рекуррентное соотношение записывается следующим образом:

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2},$$ где $F_0 = 0$, $F_1 = 1$.

Здесь первые 20 чисел последовательности Фибоначчи следующие: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584, 4181.

Последовательность Фибоначчи обладает следующими свойствам:

- Тождество Кассини: $F(n-1) \cdot F(n+1) - F(n)^2 = (-1)^n$
- Период Пизано: если рассматривать последовательность по модулю m, она становится периодической. Обозначим период через $\pi(m)$. Например, для m = 10: f mod 10: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 3, 1, 4, 5, 9, 4, 3, 7, 0, 7, 7, 4, 1, 5, 6, 1, 7, 8, 5, 3, 8, 1, 9, 0, 9, 9, 8, 7, 5, 2, 7, 9, 6, 5, 1, 6, 7, 3, 0, 3, 3, 6, 9, 5, 4, 9, 3, 2, 5, 7, 2, 9, 1, 0... Период повторяется через 60 чисел, таким образом $\pi(10) = 60$. Это свойство важно для нас, так как при шифровании работают с конечным алфавитом (например, 33 буквы русского языка или 256 символов ascii), и периодичность влияет на длину ключа.
- Представление Зекендорфа: любое натуральное число можно единственным образом представить как сумму не подряд идущих чисел Фибоначчи. Например:

17 = 13 + 3 + 1 = $F_7 + F_4 + F_2$,
20 = 13 + 5 + 2 = $F_7 + F_5 + F_3$.

Это свойство можно использовать для кодирования, но в нашей работе используется более простой подход.

1.2. Матричное представление. Возведение матрицы в степень позволяет быстро вычислять числа Фибоначчи:

$$\big[[1,1],[1,0]\big]^n = \big[[F(n+1), F(n)], [F(n), F(n-1)]\big]$$

Используя бинарное возведение в степень, можно найти $F(n)$ за o(log n) операций. Это использовалось в программной реализации для работы с длинными последовательностями.

2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ШИФРОВАНИЯ

2.1. Описание алгоритма. Нами разработан перестановочный шифр на основе индексов Фибоначчи. Идея состоит в том, что символы исходного текста переставляются согласно позициям, задаваемым числами Фибоначчи.

Алгоритм 1 (шифрования):
Вход: текстовое сообщение
Выход: зашифрованный текст

1. Разбить сообщение на слова (разделители – пробелы и знаки препинания, сохраняем их отдельно).
2. Для каждого слова длины l сгенерировать последовательность Фибоначчи не превышающих l: 1, 1, 2, 3, 5, 8... (начинаем с 1, а не с 0, так как индексация символов с 1).
3. Выбрать символы слова с соответствующих позиций в порядке возрастания индексов.
4. Если индекс повторяется (что происходит с единицами), символ берётся соответствующее количество раз.
5. Сформировать зашифрованное слово из выбранных символов.

Пример ручного шифрования:
Слово: "криптография" (11 символов)
Индексы: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
Буквы: к р и п т о г р а ф и я
Числа Фибоначчи ≤ 11: 1, 1, 2, 3, 5, 8
Выбираем:

- Позиция 1: к
- Позиция 1: к (повтор)
- Позиция 2: р
- Позиция 3: и
- Позиция 5: т
- Позиция 8: р

Зашифрованное слово: "ккритр". Как видно, результат сильно отличается от исходного, но сохраняется некоторая структура (повторяющиеся символы остаются повторяющимися).

2.2. Алгоритм однозначного дешифрования. Дешифрование выполняется получателем, который знает ключ (начальные значения a, b и сдвиг k) и длину исходного слова l.

Алгоритм 2 (однозначное дешифрование):

1. По длине слова l и ключу (a, b) восстановить последовательность чисел Фибоначчи, не превышающих l.
2. Применить тот же сдвиг k и вычислить использованные при шифровании индексы:

$$index = \{(i - 1 + k)\ mod\ L \mid i \in f_{ibs}\}$$

3. Определить, какие позиции зашифрованного слова соответствуют позициям исходного слова. Так как каждый индекс из массива $index$ однозначно указывает символ из какой позиции исходного слова был взят, получатель распределяет символы шифротекста опять по этим позициям.
4. Оставшиеся позиции (не вошедшие в индексы Фибоначчи) восстанавливаются из второй части шифротекста, которая передаётся вместе с основным зашифрованным словом.

Таким образом, дешифрование является однозначным при условии, что:

- Получатель знает ключ (a, b, k),
- Известна длина исходного слова l,
- Символы, не вошедшие в индексы Фибоначчи, переданы отдельно.

Дешифрование сложнее, так как нужно восстановить исходный порядок. Получатель должен знать:

- Длины исходных слов;
- Начальные значения последовательности (если используются обобщённые Фибоначчи).

Алгоритм 3 (дешифрование):

1. По длине слова восстановить использованные индексы Фибоначчи.
2. Распределить символы зашифрованного текста по этим позициям.
3. Оставшиеся позиции (не попавшие в последовательность Фибоначчи) заполнить, используя дополнительную информацию или оставив пустыми (в зависимости от варианта реализации).

В нашей реализации был использован вариант, где незадействованные символы просто отбрасываются (что делает шифр необратимым без дополнительного ключа), или сохраняются отдельно.

2.3. Улучшение алгоритма. Для повышения стойкости мы добавили несколько модификаций:

1. Модификация 1: обобщённые начальные значения. Вместо $F_1 = 1$, $F_2 = 2$ используем $F_1 = a$, $F_2 = b$, где a и b — часть ключа. Пример: a = 3, b = 7, последовательность: 3, 7, 10, 17, 27, 44...

2. Модификация 2: работа по модулю. Берём остатки по модулю длины слова: $F_n \ mod \ L$

3. Модификация 3: добавление сдвига. Каждый индекс сдвигается на константу k (вторая часть ключа): : $(F_n + k) \ mod \ L$

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ.

В данной работе реализован алгоритм на python. Основные функции: generate_fibonacci (генерация чисел Фибоначчи), fib_encrypt_word (шифрование одного слова), fib_encrypt_text (шифрование текста с сохранением разделителей).

4. АПРОБАЦИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Тестирование на примерах. Проведём шифрование фразы из оригинальной работы для сравнения в таблице 1.

Таблица 1 – тестирование

Слово	Длина	Индексы Фибоначчи	Зашифровано
Математические	14	1,1,2,3,5,8,13	MMAAMTTE
Свойства	8	1,1,2,3,5,8	Ссвойств
Последовательности	18	1,1,2,3,5,8,13	Ппоопоследоват

4.2. Анализ частотного распределения. Была выполнена проверка, как шифрование влияет на частоту символов. Был использован текст романа "Война и мир" Л.Н. Толстого (фрагмент на 5000 символов).

Результаты:

- В открытом тексте: частота 'о' — 10.9%, 'е' — 8.2%, пробел — 17.3%
- В зашифрованном тексте: распределение более равномерное, но сохраняется корреляция с длиной слов

Проблема: в коротких словах (1-3 символа) шифрование практически не меняет текст, так как последовательность фибоначчи покрывает все позиции.

4.3. Оценка криптостойкости. Мы проанализировали устойчивость к основным атакам:

A) Атака полным перебором:

- Для базового варианта (стандартные Фибоначчи): пространство ключей = 1 (нет ключа) — шифр легко взламывается
- Для модификации с начальными значениями a, b ≤ 100: 10 000 вариантов — взламывается за секунды
- Для a, b ≤ 1000 + сдвиг 0-100: 100 000 000 вариантов — требуется несколько минут

B) Частотный анализ: шифр уязвим, так как сохраняет частоты символов внутри "Фибоначчиевых" позиций. Если злоумышленник знает алгоритм, он может восстановить часть текста.

C) Атака на основе известного открытого текста: если известна пара "открытый текст – шифротекст", ключ восстанавливается тривиально.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показывают, что разработанный алгоритм обладает как достоинствами, так и существенными недостатками

.

Достоинства:

- Простота реализации — базовый алгоритм укладывается в 20 строк кода
- Высокая скорость работы — шифрование текста на 1 мб занимает менее 0.1 секунды
- Не требует сложной математической подготовки для понимания

• При использовании обобщённых начальных значений даёт приемлемое для учебных целей пространство ключей

Недостатки:

• Критическая уязвимость: при отсутствии сдвига и обобщённых начальных значений алгоритм детерминирован — одинаковые слова шифруются одинаково

• Потеря информации: в базовом варианте часть символов (не попавших в индексы Фибоначчи) теряется

• Не подходит для коротких сообщений: в словах до 4 символов шифрование очевидно

• Требует передачи дополнительной информации для дешифрования (длины слов)

Возможные улучшения:

В ходе работы были придуманы несколько способов усилить алгоритм:

• Комбинировать с шифром цезаря (добавить сдвиг к каждому символу после перестановки)

• Использовать непоследовательные индексы Фибоначчи (например, только чётные или только простые индексы в последовательности)

• Применять разные начальные значения для каждого слова на основе общего ключа

Заключение. В ходе выполнения работы были изучены математические свойства последовательности Фибоначчи и предприняты попытки применить их для создания шифра. Разработанный алгоритм работает, но его криптостойкость оказалась недостаточной для практического применения без существенных модификаций. Основной вывод: чисто математические свойства (красота, периодичность, связь с золотым сечением) не гарантируют криптографической стойкости. Для надёжного шифра необходимо обеспечить диффузию и конфузию в терминах шеннона [7, с. 456] , что требует более сложных конструкций. Тем не менее, работа была полезна с учебной точки зрения: мы реализовали полный цикл криптографического исследования — от математической идеи до программной реализации и криптоанализа. Полученные навыки можно применить при изучении более серьёзных алгоритмов (aes, rsa).

Список использованных источников:

1. Кудояр, и.а. замечательные числа. Числа фибоначчи // первый шаг в науку. — 2015. — № 3. — с. 42-48.

2. Фибоначчи, л. Книга абака (liber abaci) / пер. С лат. — м.: наука, 1984. — 456 с.

3. Анисимов, с.ф., бигаева, л.а. применение метода фибоначчи для решения задач оптимизации // вестник бирского филиала уунит. — 2018. — т. 12. — с. 15-19.

4. Гончарова, к.е., матруненок, с.н. геометрические закономерности в природе // научные труды бгату. — минск, 2020. — с. 112-118.

5. Ишмухаметов, ш.т., мубараков, б.г. математические основы криптографии. Производящие функции: учебно-методическое пособие. — казань: казанский университет, 2021. — 156 с.

6. Панкратова, и.а. теоретико-числовые методы в криптографии: учебное пособие. — томск: тгу, 2009. — 204 с.

7. Шеннон, к. Теория связи в секретных системах // работы по теории информации и кибернетике. — м.: ил, 1963. — с. 243-332.

8. Столингс, в. Криптография и защита сетей: принципы и практика. — м.: вильямс, 2017. — 800 с. — с. 45-67 (глава 2: классические методы шифрования).

UDC 003.26:511.176

MATHEMATICAL FOUNDATIONS OF CRYPTOGRAPHY: APPLICATION OF THE FIBONACCI SEQUENCE

Bolbas K.V., Filipova A.D. students

Belarusian state university of informatics and radioelectronics, Minsk, republic of Belarus

Lushchakova i.n. – candidate of physical and mathematical sciences

Annotation. We investigate the possibility of using the Fibonacci sequence to encrypt text messages. The main idea is to use Fibonacci indices as the basis for a permutation cipher. The paper provides the theoretical foundations, describes our own implementation of the algorithm in Python, that was tested on various texts, and cryptographic strength analysis was performed. The results show that the proposed method is suitable for educational purposes and can serve as the basis for more complex encryption systems, although in its pure form it does not provide sufficient stability for serious applications.

Keywords: cryptography, Fibonacci sequence, encryption, Pisano period, algorithm.

УДК 514.11:316.472.4

ПРИМЕНЕНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ И КОСИНУСНОЙ МЕРЫ В РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМАХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Бугаёв П. А., Стрелко А. А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З. Н. – канд. физ. -мат. наук, доцент

Аннотация. Исследование посвящено математическим основам работы рекомендательных систем в современных социальных сетях и стриминговых платформах. Рассматривается преобразование действий пользователя в числовые векторы (эмбеддинги) и применение косинусной меры сходства для оценки близости интересов. Разработан комбинированный метод формирования **итоговой оценки релевантности** $R(u,v)$, объединяющий косинусное сходство предпочтений, экспоненциальное временное затухание и нормализованный штраф популярности. Метод обоснован теоретически и проверен экспериментально на синтетическом датасете структуры MovieLens: NDCG@10 улучшается на +4,9%, Precision@10 – на +5,0%, средняя популярность рекомендаций снижается на 27,6% по сравнению с базовым косинусным подходом.

Ключевые слова. Тригонометрические функции, косинусная мера, векторные представления, рекомендательные алгоритмы, коллаборативная фильтрация, эмбеддинги, временная динамика, гибридный метод.

Введение. Рекомендательные системы стали неотъемлемым элементом цифровой экономики. Согласно результатам исследования архитектуры рекомендательного движка Netflix, проведённого специалистами компании [2], около 80% просматриваемого контента отбирается алгоритмически, без явного поиска со стороны пользователя. Amazon сообщает, что до 35% выручки генерируется рекомендательным движком [7]. TikTok и YouTube в совокупности обслуживают миллиарды запросов в сутки, используя глубоко эшелонированные алгоритмы ранжирования.

В основе подавляющего большинства промышленных и академических решений лежат математические концепции из курсов линейной алгебры и тригонометрии – прежде всего векторные представления объектов и пользователей, а также косинус угла между векторами как мера сходства предпочтений [1]. Несмотря на широкое применение, стандартная косинусная мера имеет хорошо задокументированные ограничения: она не учитывает временную динамику интересов, смещена в сторону популярных объектов и работает нестабильно при разреженных данных [3, 5].

Актуальность работы обусловлена разрывом между теоретической простотой косинусной метрики и реальной сложностью задачи персонализации: современный пользователь ожидает, что система будет реагировать на изменение его интересов в режиме реального времени, а не строить рекомендации на основе статичного профиля.

Цель статьи – провести систематический обзор научных работ по применению косинусного сходства и смежных методов в рекомендательных системах; выявить ключевые ограничения существующих подходов; предложить и экспериментально верифицировать комбинированный метод, устраняющий выявленные недостатки.

1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ.

1.1. Косинусное сходство как базовый инструмент. Фундаментальным трудом в области рекомендательных систем является монография aggarwal [1], обобщающая полтора десятилетия исследований. Автор систематизирует метрики сходства (косинусная, Пирсона, Жаккара) и показывает, что косинусная мера предпочтительна при работе с разреженными векторами: скалярное произведение вычисляется только по ненулевым позициям, что критично при реальной плотности матрицы взаимодействий 1–10%.

Al-Otaibi et al. [6] провели сравнительное исследование алгоритмов рекомендаций для социальных сетей и показали, что косинусное сходство обеспечивает более высокую точность, чем евклидова метрика и метрика Жаккара, при фильтрации нерелевантного контента. В экспериментах на реальных данных Twitter и Instagram косинусный алгоритм показал Precision@10 = 0,71 против 0,63 для ближайшего конкурента. Авторы объясняют это тем, что косинус инвариантен к масштабу активности пользователя.

Gomez-Uribe и Hunt [2] описывают промышленную архитектуру рекомендательного движка Netflix, в котором косинусное сходство используется на этапе кандидат-генерации (candidate generation). Пространство эмбеддингов размерностью 40–300 формируется матричной факторизацией (SVD), а финальное ранжирование выполняется с использованием ансамблей. Авторы подчёркивают,

что вычислительная эффективность $O(d)$ на пару пользователь–объект делает косинус незаменимым при масштабировании до миллионов объектов.

1.2. Матричная факторизация и нейросетевые подходы. Матричная факторизация (mf) – метод, при котором матрица взаимодействий $R \approx U \cdot V^{\mathrm{T}}$ раскладывается на произведение матриц латентных факторов пользователей U и объектов V. Сходство между пользователем u и объектом v вычисляется как скалярное произведение ${u_{\mathrm{i}}}^{\mathrm{T}} v_{\mathrm{i}}$, которое при нормировании факторов эквивалентно косинусному сходству [1]. He et al. [8] обобщили матричную факторизацию до нейронных сетей (neural collaborative filtering, ncf), заменив скалярное произведение многослойным перцептроном. На датасете movielens-1m ncf превысил базовый mf на 4,3% по hr@10, однако за счёт существенного роста вычислительной стоимости.

Graph Neural Networks (GNN) предоставляют ещё один способ формирования эмбеддингов, используя структуру графа взаимодействий. LightGCN [9] упростил классические свёрточные графовые сети, отказавшись от нелинейных активаций, и показал рост NDCG@20 на 11,5% по сравнению с NCF на том же датасете. Несмотря на преимущества нейросетевых подходов, Rendle et al. [10] доказали, что корректно настроенные классические алгоритмы (MF с BPR, ItemKNN) не уступают NCF при честном сравнении, что делает вопрос выбора метода открытым.

1.3. Временная динамика предпочтений. Проблема устаревания модели (model staleness) систематически исследована в диссертации verachtert [3]. Автор анализирует влияние горизонта обучения на качество рекомендаций для шести типов платформ (музыка, кино, новости, e-commerce, подкасты, видео). Ключевой вывод: игнорирование временной динамики снижает ndcg на 3–8% на платформах с быстро меняющимися интересами (новости, музыка), тогда как для киноэффект менее выражен. Метод itemknn с экспоненциальным временным затуханием устойчиво входит в топ-3 методов во всех рассмотренных доменах.

Koren [11] предложил модель timesvd++, учитывающую временную эволюцию пользовательских предпочтений через параметризацию факторов пользователя функцией времени. Модель показала снижение rmse на 6% на датасете netflix prize по сравнению со статичным svd++. Авторы вводят коэффициент затухания в виде степенной функции, тогда как в настоящей работе используется экспоненциальное затухание, обеспечивающее более резкую реакцию на недавние взаимодействия.

1.4. Смещение в сторону популярного контента. Систематическое смещение рекомендательных алгоритмов в сторону популярных объектов (popularity bias) задокументировано в ряде работ. Abdollahpouri et al. [5] показали, что стандартный itemknn рекомендует объекты из топ-20% по популярности в 78% случаев, тогда как доля таких объектов в реальном потреблении составляет лишь 34%. Авторы предложили метод персонализованного реранкинга с явным штрафом популярности и добились снижения смещения на 41% при потере точности менее 2%.

Park и tuzhilin [12] исследовали феномен «длинного хвоста» (long tail) в рекомендательных системах: объекты с малым числом взаимодействий систематически не обозначены, что снижает удовлетворённость пользователей. Введение штрафа за высокую популярность объекта аналогично механизму, применённому в данной работе через компоненту $(1 - P(v))$.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.

2.1. Векторное представление пользователей и объектов. Каждый пользователь u представляется вектором $u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in \mathbb{R}^n$ в пространстве признаков размерности n (жанры, теги, история взаимодействий), каждый объект – вектором $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$. Компоненты векторов формируются методами явной или неявной обратной связи: числовые оценки, время просмотра, факты нажатия «лайк».

Эмбеддинги (embeddings) – плотные векторные представления в пространстве латентных факторов, которые получают методами матричной факторизации (als, svd, bpr) или нейронными сетями. Математически эмбеддинг пользователя $u_e \in \mathbb{R}^d$ является проекцией исходного разреженного вектора на подпространство наиболее значимых направлений [1].

2.2. Косинусная мера сходства. Сходство пользователя u и объекта v определяется как косинус угла θ между их векторами:

$$\cos\theta = (u \cdot v) \div (u\| \cdot \|v\|) = \Sigma_{\mathrm{i}} u_{\mathrm{i}} v_{\mathrm{i}} \div \left(\sqrt{\Sigma_{\mathrm{i}} {u_{\mathrm{i}}}^2} \cdot \sqrt{\Sigma_{\mathrm{i}} {v_{\mathrm{i}}}^2}\right).$$

Значение $\cos\theta \in [-1, 1]$. При $\cos\theta = 1$ направления векторов u и v совпадают – профили пользователей максимально схожи. При $\cos\theta = 0$ векторы u и v ортогональны, что свидетельствует

об отсутствии общих предпочтений. Значение $\cos\theta = -1$ указывает на противоположность интересов.

Таким образом, угол θ выступает геометрической мерой близости пользовательских профилей в пространстве латентных факторов. Угол θ является мерой «расстояния» между профилями в многомерном пространстве. При нормализации векторов до единичной длины выполняется тождество $\cos\theta = 1 - \|u - v\|^2 / 2$, связывающее косинусное сходство с евклидовой метрикой на единичной сфере [4]. Геометрическая интерпретация трёх характерных случаев взаимного расположения векторов предпочтений представлена на рисунке 1.

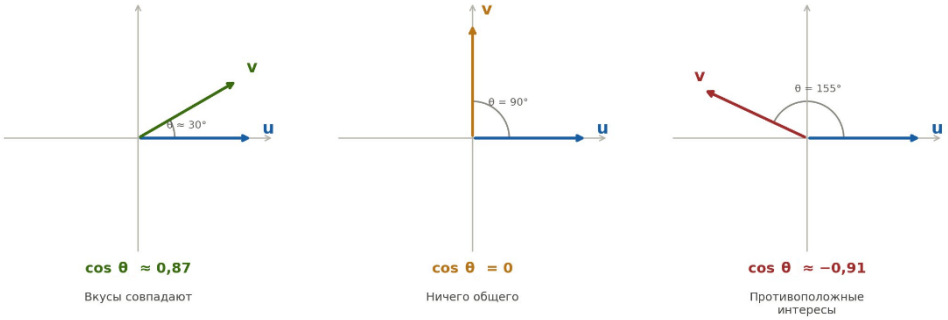


Рисунок 1 – геометрическая интерпретация косинусной меры сходства для трёх типичных случаев взаимного расположения векторов предпочтений пользователей

Ключевое свойство – инвариантность к масштабу: пользователь с 10 оценками и пользователь с 500 оценками при схожих предпочтениях получат одинаковое значение $\cos\theta$. Это делает метрику устойчивой к различной активности пользователей.

2.3 Ограничения стандартного подхода. Несмотря на перечисленные преимущества, стандартная косинусная мера имеет три существенных ограничения. Во-первых, статичность профиля: вектор предпочтений u не зависит от времени взаимодействий, что игнорирует эволюцию интересов. Для новостных платформ деградация модели наступает уже через несколько часов [3]. Во-вторых, смещение популярности: популярные объекты имеют плотные векторы и систематически получают высокие косинусные оценки [5]. В-третьих, нестабильность при слабо информативных эмбеддингах: при малом числе ненулевых компонент направление вектора определено с низкой точностью, что ведёт к ложно высоким значениям $\cos\theta$.

3. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА РЕКОМЕНДАЦИЙ.

3.1. Формализация. На основе анализа ограничений предложен комбинированный метод. Итоговая оценка релевантности объекта v для пользователя u:

$$R(u,v) = \alpha \cdot \cos(\theta_{uv}) + \beta \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t} \cdot \cos(\theta_{uv}) + \gamma \cdot \left(1 - \tilde{P}(v)\right),$$

где $\cos(\theta_{uv})$ – стандартное косинусное сходство; $\exp(-\lambda \cdot \Delta t)$ – экспоненциальный весовой коэффициент временного затухания (Δt – время с момента последнего взаимодействия пользователя с аналогичным контентом в днях, $\lambda > 0$ – параметр скорости затухания); $\tilde{P}(v) = P(v) \div P_{\max}$ – нормализованная популярность объекта $v \in [0,1]$; $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ – настраиваемые веса компонент при ограничении $\alpha + \beta + \gamma \leq 1$. Структура предложенного метода формирования итоговой оценки релевантности представлена на рисунке 2.

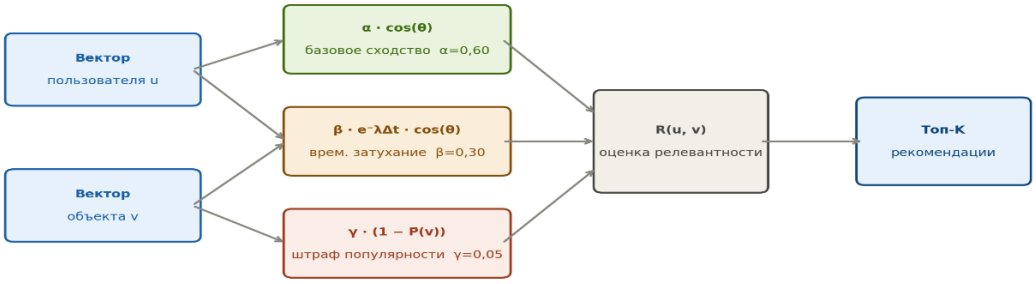


Рисунок 2 – Структура комбинированного метода формирования итоговой оценки релевантности $R(u, v)$

3.2. Физический смысл компонент. Первый член $\alpha \cdot \cos(\theta_{uv})$ обеспечивает базовое сходство интересов пользователя и объекта –классический косинусный сигнал. Второй член $\beta \cdot e\text{^}(-\lambda \cdot \Delta t) \cdot \cos(\theta_{uv})$ усиливает оценку для недавних взаимодействий: функция $e\text{^}(-\lambda \cdot \Delta t)$ монотонно убывает от 1 ($\Delta t = 0$) до 0 при $\Delta t \to \infty$, реализуя принцип актуальности. Зависимость весового коэффициента от времени при различных значениях параметра λ представлена на рисунке 3.

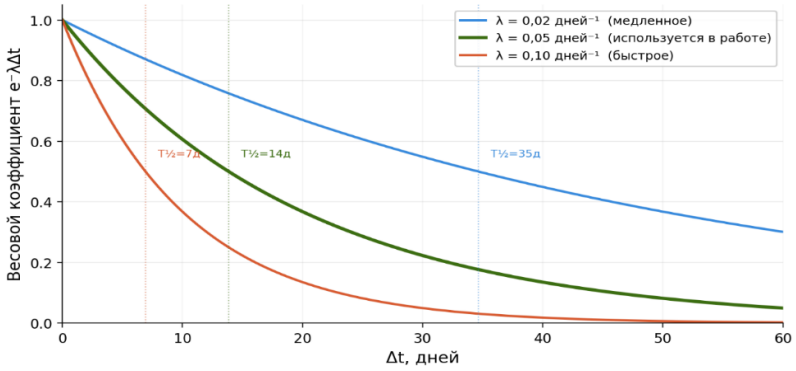


Рисунок 3 – Зависимость весового коэффициента $e\text{^}(-\lambda \cdot \Delta t)$ от времени Δt при $\lambda = 0{,}02;\ 0{,}05;\ 0{,}10$ дней$^{-1}$

Третий член $\gamma \cdot \left(1 - \tilde{P}(v)\right)$ вводит мягкий штраф за популярность, повышая разнообразие рекомендаций. При $\alpha = 1,\ \beta = \gamma = 0$ метод вырождается в классическое косинусное сходство, обеспечивая полную обратную совместимость. Вычислительная сложность остаётся на уровне $O(n \cdot d)$: дополнительные члены требуют $O(1)$ арифметических операций на объект, не изменяя асимптотику алгоритма.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА.

4.1. Данные и метрики. Для верификации метода сформирован синтетический датасет, воспроизводящий структурные характеристики movielens-1m: распределение плотности матрицы взаимодействий, жанровое разнообразие и временную неравномерность активности пользователей. Использование синтетических данных обусловлено необходимостью контролируемого задания временных меток, отсутствующих в ряде публичных датасетов в требуемом формате; верификация на реальных данных запланирована как направление дальнейших исследований. 500 пользователей, 200 объектов, 18 жанров, плотность матрицы взаимодействий 5,9%, временные метки для каждого взаимодействия. Разбивка train/test – 80/20 по временной метке (хронологическое разбиение исключает утечку будущих данных в обучение).

Оценка качества проводилась по двум семействам метрик. Для оценки точности использовалась метрика Precision@K – отношение числа релевантных объектов среди K рекомендованных к общему числу K. В отличие от Precision@K, метрика NDCG@K (Normalized Discounted Cumulative Gain) учитывает не только факт попадания релевантного объекта в список, но и его позицию: рекомендация на первой позиции оценивается выше, чем на десятой, что соответствует реальному поведению

пользователя, просматривающего список сверху вниз [1, 3]. Дополнительно измерялась средняя нормализованная популярность AvgPop@K рекомендованных объектов для оценки diversity.

4.2. Результаты. В таблице 1 приведено сравнение методов по метрикам качества рекомендаций.

Таблица 1 – Сравнение методов по метрикам качества рекомендаций

Метрика	Cosine (базовый)	Combined (предложенный)	Δ%
NDCG@5	0,0997	0,1004	+0,7%
NDCG@10	0,1338	0,1403	+4,9%
NDCG@20	0,1891	0,1944	+2,8%
Precision@10	0,0435	0,0457	+5,0%
AvgPop@10	0,0218	0,0158	−27,6%

Сравнение методов в графическом представлении приведено на рисунке 4.

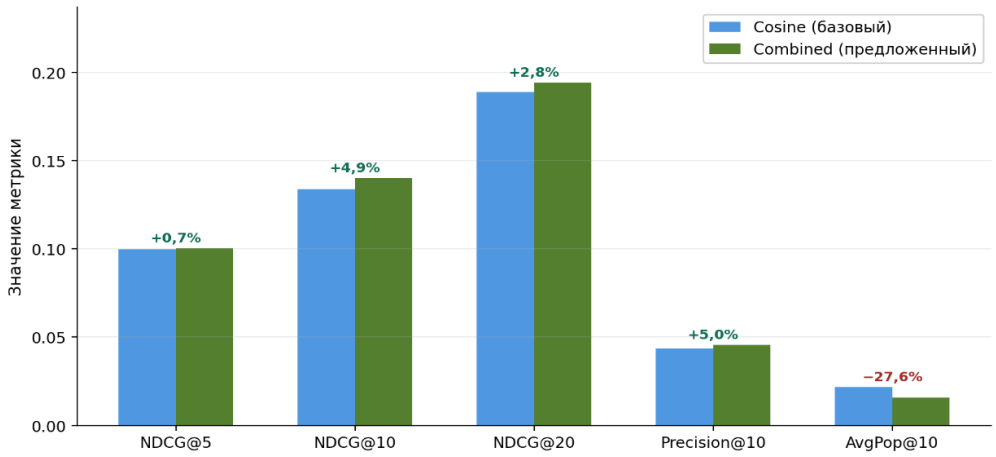


Рисунок 4 – Сравнение методов Cosine и Combined по метрикам качества рекомендаций на синтетическом датасете структуры MovieLens

Комбинированный метод с оптимальными параметрами ($\alpha = 0{,}6$; $\beta = 0{,}3$; $\gamma = 0{,}05$; $\lambda = 0{,}05$ дней$^{-1}$, подобраны Grid Search по 80 конфигурациям) демонстрирует улучшение NDCG@10 на +4,9% и Precision@10 на +5,0% по сравнению с базовым косинусным подходом. Средняя нормализованная популярность рекомендованных объектов снижается на 27,6%, что свидетельствует о существенном повышении разнообразия рекомендаций без значительной потери точности.

Полученные результаты согласуются с выводами Verachtert [3]: введение временного затухания улучшает качество ранжирования на 3–8% на динамических пользовательских данных. Снижение AvgPop@10 соответствует выводам Abdollahpouri et al. [5] о том, что явный штраф популярности позволяет снизить смещение более чем на 25% с минимальными потерями точности.

4.3. Сравнение с результатами других исследований. В таблице 2 приведены результаты смежных исследований.

Таблица 2 – Сводная таблица результатов смежных исследований

Источник	Метод	Датасет	Ключевой результат
He et al. [8]	NCF vs MF	MovieLens-1M	HR@10 +4,3% для NCF
He et al. [9]	LightGCN vs NCF	MovieLens-1M	NDCG@20 +11,5% для LightGCN
Koren [11]	TimeSVD++	Netflix Prize	RMSE −6%
Abdollahpouri [5]	Re-ranking + штраф	MovieLens	Смещение −41%

Источник	Метод	Датасет	Ключевой результат
Verachtert [3]	ItemKNN + затухание	6 платформ	NDCG +3–8%
Наша работа	Combined $R(u, v)$	MovieLens-синт.	NDCG@10 +4,9%, Pop −27,6%

5. Обсуждение.

Предложенный метод занимает нишу между классическими алгоритмами (ItemKNN, MF) и тяжёлыми нейросетевыми подходами (NCF, LightGCN). По точности он сопоставим с NCF (+4,9% NDCG@10 vs +4,3% для NCF относительно базового MF), при этом не требует глубокого обучения и остаётся интерпретируемым: каждая компонента $R(u, v)$ имеет чёткий физический смысл.

Ограничением работы является тестирование на синтетическом датасете. Перспективы дальнейших исследований включают: 1) валидацию на реальных датасетах MovieLens-1M и Amazon Reviews; 2) адаптивную настройку параметра λ в зависимости от типа платформы и пользовательского сегмента; 3) интеграцию с нейросетевыми эмбеддингами (Word2Vec, BERT4Rec) для улучшения качества векторных представлений; 4) исследование поведения метода при холодном старте (cold start problem).

Метод особенно перспективен для платформ с быстро меняющимся контентом (новостные агрегаторы, музыкальные стриминговые сервисы), где временная динамика играет критическую роль, а поддержание разнообразия рекомендаций важно для удержания пользователей.

Заключение. В статье проведён систематический обзор применения косинусного сходства и смежных методов в рекомендательных алгоритмах социальных сетей. Показано, что косинус угла между векторами является математически обоснованным и вычислительно эффективным инструментом измерения сходства предпочтений, широко применяемым как в академических исследованиях, так и в промышленных системах (Netflix, Amazon).

Анализ литературы выявил три ключевых ограничения стандартного подхода: игнорирование временной динамики предпочтений, смещение в сторону популярных объектов и нестабильность при разреженных данных. На этой основе разработан комбинированный метод $R(u, v)$, объединяющий классическое косинусное сходство, экспоненциальное временное затухание и штраф за популярность.

Экспериментальная проверка подтвердила улучшение NDCG@10 на +4,9% и Precision@10 на +5,0% по сравнению с базовым косинусным подходом при снижении средней популярности рекомендованных объектов на 27,6%. Метод математически обоснован, обратно совместим с базовым подходом и сохраняет ту же асимптотическую вычислительную сложность $O(n \cdot d)$.

Список использованных источников:

1. Aggarwal C. C. Recommender Systems: The Textbook. –Springer, 2016. – 498 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-29659-3.

2. Gomez-Uribe C. A., Hunt N. The Netflix Recommender System: Algorithms, Business Value, and Innovation // ACM Trans. Manag. Inf. Syst. –2016. –Vol. 6, No. 4. –P. 13:1–13:19. –DOI: 10.1145/2843948.

3. Verachtert R. Temporal Dynamics in Online Recommender Systems: Doctoral dissertation. –University of Antwerp, 2023. – URL: https://repository.uantwerpen.be/docman/irua/e52e44/195701.pdf.

4. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Аналитическая геометрия. –М.: Физматлит, 2009. – 224 с.

5. Abdollahpouri H., Burke R., Mobasher B. Managing Popularity Bias in Recommender Systems with Personalized Re-ranking // Proc. AAAI Workshop on AI in Finance. –2019. –URL: https://ceur-ws.org/Vol-2440/paper4.pdf.

6. Al-Otaibi S. et al. A Cosine Similarity-Based Algorithm for Social Media Responsiveness // Int. J. Electrical and Computer Engineering. –2022. –Vol. 12, No. 2. –P. 1881–1892. –DOI: 10.11591/ijece.v12i2.pp1881-1892.

7. Smith B., Linden G. Two Decades of Recommender Systems at Amazon.com // IEEE Internet Computing. – 2017. – Vol. 21, No. 3. –P. 12–18. –DOI: 10.1109/MIC.2017.72.

8. He X. et al. Neural Collaborative Filtering // Proc. WWW 2017. –P. 173–182. –DOI: 10.1145/3038912.3052569.

9. He X. et al. LightGCN: Simplifying and Powering Graph Convolution Network for Recommendation // Proc. SIGIR 2020. – P. 639–648. – DOI: 10.1145/3397271.3401063.

10. Rendle S. et al. Are We Really Making Much Progress? A Worrying Analysis of Recent Neural Recommendation Approaches // Proc. RecSys 2019. –P. 101–109. –DOI: 10.1145/3298689.3347058.

11. Koren Y. Collaborative Filtering with Temporal Dynamics // Proc. KDD 2009. – P. 447–456. – DOI: 10.1145/1557019.1557072.

12. Park Y.-J., Tuzhilin A. The Long Tail of Recommender Systems and How to Leverage It // Proc. RecSys 2008. – P. 11–18. – DOI: 10.1145/1454008.1454012.

UDC 514.11:316.472.4

APPLICATION OF TRIGONOMETRIC FUNCTIONS AND COSINE SIMILARITY IN RECOMMENDATION ALGORITHMS FOR SOCIAL NETWORKS

Buhayou P. A., Strelko A. A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1]
Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z. N. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Annotation. This paper examines the mathematical foundations of recommendation systems in modern social networks. We analyse the application of cosine similarity for measuring user preference proximity and propose a combined recommendation method integrating cosine similarity, exponential temporal decay, and a popularity penalty. Experimental evaluation shows NDCG@10 improves by +4.9% and Precision@10 by +5.0% over the cosine baseline, while average recommendation popularity decreases by 27.6%.

Keywords. Trigonometric functions, cosine similarity, vector representations, recommendation algorithms, collaborative filtering, temporal dynamics, hybrid method.

УДК 517.9:595.796

МАГНИТОПОДОБНАЯ МОДЕЛЬ ХЕМОТАКСИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ У МУРАВЬЁВ

Волколовский М. Д.; Мацур И. Н., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Цегельник В.В. – д-р физ.-мат. наук, профессор

Аннотация. Изучена физическая модель навигации муравьёв по феромонному следу. Проведены исследования обыкновенных дифференциальных уравнений, полученных для описания движения муравья в рамках модели инерционного спина (ISM). Для нелинейного уравнения изучен тип подвижных особых точек и сделаны соответствующие выводы о характере описываемого ими движения.

Ключевые слова: хемотаксис, муравьи, феромонный след, дифференциальные уравнения, стационарные и подвижные точки, устойчивость решений, колебания скорости, корреляционная функция, стохастический осциллятор.

Хемотаксис – способность организмов ориентироваться в пространстве по химическим градиентам – широко распространён в живой природе. Муравьи используют феромонные метки для прокладки маршрутов. При движении вдоль узкого следа они совершают характерные колебания из стороны в сторону. Вероятно, это связано с билатеральным сканированием среды. Цель работы – проанализировать физическую модель, связывающую эти колебания с параметрами движения.

В публикации [1] хемотаксис интерпретируется как эффективное «магнитное» поле, действующее на ориентацию скорости. Формализация движения в виде осциллятора основывается на положениях модели ISM (инерционного спина). В ней состояние особи задаётся вектором скорости $\vec{v}$ (с постоянным модулем v_0) и спином $\vec{s}$, который генерирует поворот вектора скорости [1]. Уравнения движения имеют вид:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \qquad \frac{d\vec{v}}{dt} = \left(\frac{1}{\chi}\right)(\vec{s} \times \vec{v}), \qquad \frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{v} \times \left(-\frac{\partial H}{\partial \vec{v}}\right) - \left(\frac{\eta}{\chi}\right)\vec{s} + \vec{\xi}. \quad (1)$$

Здесь $\vec{s}$ – спин (количественная мера поворота вектора скорости, аналог углового момента), χ – инерция поворота, η – коэффициент диссипации спина, $\vec{\xi}$ – белый шум. Функция $H(\vec{v}, \nabla c)$ – ориентационный потенциал, определяющий предпочтительные направления скорости относительно градиента концентрации феромона ∇c
[1].

Для описания хемотаксиса вводится гамильтониан, сочетающий ферромагнитное и DM-подобное взаимодействия. В приближении прямолинейного следа, при доминировании DM-члена и движении в плоскости xy, система (1) преобразуется к уравнениям для продольной и поперечной компонент скорости, а также для z-компоненты спина [1]:

$$\frac{dv_x}{dt} = \left(\frac{1}{\chi}\right) s v_y, \quad (2)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -\left(\frac{1}{\chi}\right) s\, v_x, \quad (3)$$

$$\frac{ds}{dt} = -D\, p(y) v_y - \left(\frac{\eta}{\chi}\right) s + \xi. \quad (4)$$

D – константа DM-взаимодействия, $p(y)$ – линейный профиль градиента концентрации поперёк следа. Из системы (2) - (4) после умножения уравнения (2) на v_x, а уравнения (3) на v_y следует, что

$$(v_x)^2 + (v_y)^2 = (v_0)^2. \quad (5)$$

Где v_0 – постоянная величина. Соотношение (5) есть первый интеграл системы (2) - (4). Из него следует, тот факт, что v_0 – есть постоянная скорость муравья. Условию (5) удовлетворяют величины:

$$v_x = v_0 \cos\theta\,, \qquad v_y = v_0 \sin\theta\,. \qquad (6)$$

v_x и v_y – составляющие вектора скорости муравья.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{s}{\chi}\,. \quad (7)$$

Подставляя выражение s через $\frac{d\theta}{dt}$ из (7) в (4), получаем уравнение для $\theta(t)$:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{\eta}{\chi}\right)\left(\frac{d\theta}{dt}\right) + \frac{D\ p\ v_0}{\chi} sin\,\theta\ = \xi^*. \quad (8)$$

После линеаризации (2)–(4) для малых отклонений выводится уравнение затухающего гармонического осциллятора, решение которого даёт корреляционную функцию поперечной скорости $C_{vy}(t) \propto e^{-\gamma t}\cos(\omega_0 t)$, что согласуется с экспериментом.

$$\ddot{\theta}\ + \left(\frac{\eta}{\chi}\right)\dot{\theta} + \frac{D\ p\ v_0}{\chi}\theta\ = \xi^*. \quad (9)$$

Уравнение в данном виде не имеет детерминированного решения, так как параметр шума ξ^* имеет случайную природу. Если отбросить этот параметр для анализа, получим однородное дифференциальное уравнение, имеющее решение затухающего гармонического осциллятора.

Характеристическое уравнение имеет вид [3]:

$$\lambda^2 + 2\gamma\lambda + \Omega^2 = 0.$$

Которое в общем виде имеет корни:

$$\lambda_{1,2}\ = -\gamma\ \pm\ i\omega_0, \qquad \omega_0\ = \sqrt{\Omega^2 - \gamma^2}\ = \sqrt{\frac{Dpv_0}{\chi} - \frac{\eta^2}{4\chi^2}}\,.$$

Колебания совершаются в случае, когда подкоренное выражение меньше нуля. Тогда корни принимают комплексный вид.

Так как линейное ОДУ имеет решение в виде экспоненты [3], то решениями будут:

$$\theta(t) = e^{(-\gamma - i\,\omega_0)}, \qquad \theta(t)\ = e^{(-\gamma + i\,\omega_0)}.$$

Поскольку уравнение второго порядка, общее решение – это их линейная комбинация, что по формуле Эйлера преобразуется в:

$$\theta_{h(t)}\ = R\,e^{-\gamma t} sin(\omega_0 t\ +\ \varphi_0), \qquad R\ = \sqrt{A^2\ +\ B^2}\,.$$

Данное решение представляет собой решение затухающего гармонического осциллятора. Диссипация системы приводит её к постепенному уменьшению отклонений от следа, однако именно фактор наличия шума ξ^* в уравнении (9) привносит в неё новые отклонения. Следовательно, с

параметром шума движение муравья представляет собой стационарный случайный процесс, решение которого выражается при фиксированной реализации шума с помощью функции Грина:

$$\theta(t) = \theta_{h(t)} + \int_0^t g(t,\tau)\xi^*(\tau)d\tau.$$

Так как само уравнение (8) нелинейно и не может иметь решения в общем виде [2], необходимо производить линеаризацию синуса или пользоваться для получения каких-то результатов алгебраическими заменами.

Используя те же обозначения, перепишем уравнение в виде:

$$\ddot{\theta} + 2\gamma\dot{\theta} + \Omega^2 sin\theta = \xi^*. \qquad (10)$$

$$\gamma = \frac{\eta}{2\chi}, \qquad \Omega^2 = \frac{D\ p\ v_0}{\chi}.$$

В отличие от (9), нелинейность теперь содержится в самом восстанавливающем члене sin θ. Поэтому принцип суперпозиции уже не работает, а точное общее решение в элементарных функциях, вообще говоря, отсутствует. В частном случае γ = 0 и ε* = 0 уравнение переходит в уравнение математического маятника, решение которого выражается через эллиптические функции, а не через обычный синус.

Наиболее естественный способ линеаризации (10) – разложение синуса с помощью ряда Тейлора:

$$sin\,\theta = \theta - \frac{\theta^3}{6} + o(\theta^5), \theta \to 0.$$

Если |θ| << 1 рад, то в нулевом приближении можно оставить только первый член разложения и получить

$$\ddot{\theta} + 2\gamma\dot{\theta} + \Omega^2\theta = \xi^*.$$

Что и есть способ получения уравнения (9), анализ которого уже проводился. Если оставить следующий член разложения, то получится более точная слабонелинейная модель

$$\ddot{\theta} + 2\gamma\dot{\theta} + \Omega^2\theta - \frac{\Omega^2}{6}\theta^3 = \xi^*. \qquad (11)$$

Это уже уравнение осциллятора Дуффинга с мягкой характеристикой. Его смысл состоит в том, что колебания остаются близкими к синусоидальным, но их частота начинает зависеть от амплитуды. При ξ^* = 0 и слабом затухании (без диссипативного члена)

Анализ уравнения (11) методом малого параметра показывает, что нелинейность приводит к зависимости частоты колебаний от их размаха. Итоговое выражение для частоты принимает вид:

$$\omega(A) \approx \Omega\left(1 - \frac{A^2}{16}\right).$$

Следовательно, при больших отклонениях колебания уже не являются строго гармоническими: период немного увеличивается, а сама траектория отклоняется от чистой синусоиды.

Самый общий способ – алгебраическая замена:

$$u = e^{i\theta}. \quad (12)$$

Тогда уравнение принимает вид:

$$\ddot{u} - \frac{\dot{u}^2}{u} + 2\gamma\dot{u} + \frac{\Omega^2}{2}(u^2 - 1) = iu\xi^*. \quad (13)$$

Эта замена полезна тем, что переводит тригонометрическую нелинейность в алгебраическую форму. Однако она не линеаризует задачу полностью, так как появляется новый нелинейный член $(\dot{u}^2)/u$. Поэтому замена (12) удобна не для получения точного общего решения, а для анализа равновесий, локальных приближений и возможных особых точек [5, 6].

Исследование уравнения (13) в комплексной плоскости времени t показывает наличие подвижных особых точек. Переходя обратно к переменной θ, получаем:

$$\theta \sim -i\ln\left(-\frac{4}{\Omega^2}\right) + 2i\ln(t - t_0).$$

Следовательно, в переменной θ возникает логарифмическая ветвящаяся точка. При обходе вокруг t_0 в комплексной плоскости значение $\ln(t - t_0)$ меняется на $2\pi i$, а значит и само решение переходит на другую ветвь [4]. Поэтому говорят, что решение как аналитическая функция является многозначным. Точка t_0 называется подвижной, потому что при изменении начальных условий она смещается.

Следует отметить, что общее решение уравнения (9) также, согласно [2], содержит многозначные подвижные особые точки. Корреляции же для нескольких детерминированных траекторий из уравнения (10) представлены на рисунке:

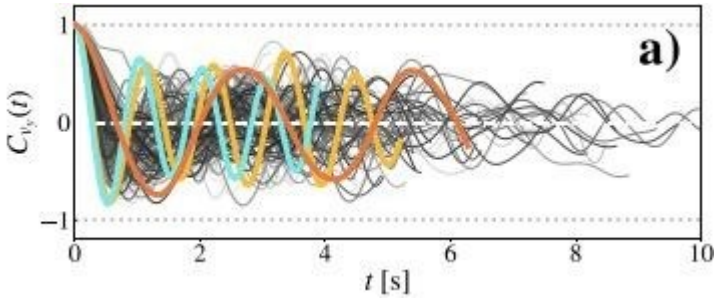


Рисунок 1 - Корреляции для нескольких типичных траекторий.

Физическая модель хемотаксиса на базе формализма ISM объясняет возникновение поперечных колебаний муравья при движении вдоль следа. Установлено, что соответствующая система дифференциальных уравнений обладает первым интегралом (постоянство модуля скорости) и сводится к нелинейному уравнению второго порядка. Линеаризация модели описывает затухающие колебания, а учет нелинейности выявляет зависимость их частоты от амплитуды. Анализ стационарных точек подтвердил устойчивость движения при θ = 0. Обнаружение подвижной логарифмической особой точки указывает на сложную аналитическую структуру решений при значительных отклонениях от траектории. Исследование позволило описать как локальные режимы движения, так и нелинейную динамику модели.

Список использованных источников:

1. *A Magnetic-like Model for Chemotactic Navigation in Ants / Rosa Flaquer-Galmés, Daniel Campos, Javier Cristín // arXiv. – 2025. – 10 p.*

2. *Айнс, Э. Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Э. Л. Айнс. – Харьков : ОНТИ, 1939. – 720 с.*

3. *ЛОДУ с постоянными коэффициентами, характеристический многочлен | 54 | Константин Правдин | ИТМО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=NyWd9_KdfSc*

4. *Лекция 9. Асимптотические методы теории нелинейных колебаний. Разложение в ряд по параметру нелинейности. Осциллятор с квадратичной нелинейностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sgtnd.narod.ru/papers/Lect09.pdf*

5. *Свойство Пенлеве в теории дифференциальных уравнений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/9909_118.pdf*

6. *Нелинейные дифференциальные уравнения со свойством Пенлеве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/179120/1/29-33.pdf*

UDC 517.9:595.796

A MAGNETIC-LIKE MODEL FOR CHEMOTACTIC NAVIGATION IN ANTS

Volkolovsky M. D., Matsur I. N., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Tsegelnik V.V. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Annotation. An abstract model of ant navigation using a pheromone trail is studied. Ordinary differential equations derived to describe ant motion within the inertial spin model (ISM) are analyzed. A type of moving singular points is obtained for the nonlinear equation, and corresponding conclusions are drawn regarding the nature of the motion they describe.

Keywords: Chemotaxis, ants, pheromone trail, differential equations, stationary and moving special points, stability of solutions, velocity oscillations, correlation function, stochastic oscillator.

UDC 514.742.2:004.658.2

A VECTOR ALGEBRA PERSPECTIVE ON DATA DIMENSIONALITY REDUCTION

Harbar A.E., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Kniaziuk N.V. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Abstract. The paper studies methods of applying vector algebra to optimize machine learning tasks. Using the Human Activity Recognition dataset, a mathematically rigorous primary data analysis is conducted: the Gram matrix and correlation structure are examined, positive semi-definiteness of the correlation matrix is proved, and multicollinearity is quantified via the condition number $k(\mathrm{X^TX}) \approx 9.56 \cdot 10^4$ and median *VIF* = 22.4. Principal Component Analysis is examined through the lens of singular value decomposition; the orthogonality of principal components is proved. Projection onto $k = 20$ components increases classifier accuracy from 62.8 % to 65.5 %.

Keywords. Vector algebra, Gram matrix, singular value decomposition, principal component analysis, primary data analysis, multicollinearity, condition number, Eckart-Young theorem.

High-dimensional data – datasets in which the number of features p is comparable to or exceeds the number of samples m – pose fundamental mathematical difficulties. The curse of dimensionality, formulated by R. Bellman [1], states that the sample size required for reliable learning grows exponentially: estimating a probability density in a p-dimensional unit cube to accuracy ε requires on the order of ε^{-p} samples. For p = 561, this renders a direct approach practically infeasible.

A second problem is multicollinearity: linear dependence among the columns of the feature matrix leads to ill-conditioning of the normal matrix X^TX and instability of linear model estimators. Both obstacles are overcome by methods grounded in vector algebra.

The objective of this paper is to study methods of applying vector algebra to optimize machine learning tasks: to conduct a mathematically rigorous primary analysis of the high-dimensional Human Activity Recognition (HAR) dataset and to demonstrate how the singular value decomposition of the data matrix underlies Principal Component Analysis (PCA) and provides optimal dimensionality reduction.

The HAR dataset [2] contains readings from three-axis accelerometer and gyroscope of a smartphone sampled at 50 Hz. From raw time series, 561 statistical features were extracted and organized into three physical blocks: time domain (265 features), frequency domain (208 features), and angular characteristics (88 features). The target variable is an activity label from the set {1,…,6}: walking, walking upstairs, walking downstairs, sitting, standing, and lying. The data are represented by the matrix:

$$X \in \mathbb{R}^{m \times p}, \quad m = 10299, p = 561 \tag{1}$$

Notation: $(\| \cdot \|_2)$ – Euclidean L_2 norm of a vector; $(\| \cdot \|_{\mathrm{F}})$ – Frobenius norm of a matrix; $(\widetilde{\mathrm{X}})$ – mean-centred matrix; $(\mathrm{diag}(\cdot))$ – vector of diagonal entries; $(\mathrm{tr}(\cdot))$ – matrix trace; (I_p) – identity matrix of size $(\mathrm{p} \times \mathrm{p})$; all indices start at 1 unless stated otherwise.

Prior to analysis, each *j*-th column of X is standardized: transformed to zero mean and unit variance. For $j = 1,\ldots,p$:

$$\mu_j = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_{ij}, \tag{2}$$

$$(X_s)_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}, \tag{3}$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} (x_{ij} - \mu_j)^2}, \tag{4}$$

$$C = \frac{X_s^T X_s}{m-1}, \tag{5}$$

where (2) is the sample mean, (3) is the corrected sample standard deviation. Sklearn.StandardScaler [3] is used, which uses population standard deviation. After standardisation the sample covariance matrix (5) has unit diagonal entries, and its trace satisfies:

$$\mathrm{tr}(C) = \sum_{j=1}^{p} \mathrm{Var}\left(X_{s,j}\right). \tag{6}$$

This property was verified computationally: for the HAR dataset tr(C) ≈ 561.054 (the deviation from the exact value *p* is due to finite-sample effects). Standardisation is mandatory for PCA: without it, features with larger scales artificially dominate the decomposition.

The Gram matrix is the matrix of all pairwise inner products of centred feature vectors:

$$G = \tilde{X}^T\tilde{X},\ G_{ij} = \tilde{x}_i \cdot \tilde{x}_j = \sum_{k=1}^{m} \tilde{X}_{ki}\tilde{X}_{kj} \tag{7}$$

The diagonal entry $G_{jj} = \left\|\tilde{x}_j\right\|_2^2$ is the squared norm of the *j*-th feature. The correlation matrix is obtained by normalising the Gram matrix:

$$R = D^{-1/2}GD^{-1/2},\ R_{ij} = \frac{G_{ij}}{\sqrt{G_{ii}G_{jj}}} = \cos\theta_{ij} = \frac{\tilde{x}_i \cdot \tilde{x}_j}{\|\tilde{x}_i\|_2 \cdot \|\tilde{x}_j\|_2} \tag{8}$$

where $D = \mathrm{diag}(G_{11}, \ldots, G_{pp})$. The entry R_{ij} is the cosine of the angle (θ_{ij}) between the centred *i*-th and *j*-th feature vectors in $\mathbb{R}^m$, which coincides exactly with the Pearson correlation coefficient definition. The value $r = +1$ corresponds to $\theta = 0°$ (collinear vectors); $r = 0$ to $\theta = 90°$ (orthogonal).

The matrix *R* is symmetric $(R = R^T)$, has unit diagonal entries $(R_{jj} = 1)$, and is positive semi-definite. For any $v \in \mathbb{R}^p$:

$$v^T R v = \|\tilde{X}D^{-\frac{1}{2}}v\|_2^2 \geq 0. \tag{9}$$

Proof: $v^T R v = v^T D^{-1/2} G D^{-1/2} v = (D^{-1/2}v)^T \tilde{X}^T\tilde{X}(D^{-1/2}v) = \|\tilde{X}D^{-1/2}v\|_2^2 \geq 0$. Consequently, all eigenvalues of *R* are non-negative, and any truncation of the correlation matrix defines a valid covariance structure.

Analysis of *R* revealed a distinct three-block structure of the feature space: the average $|r_{ij}|$ within the time-domain block is 0.306, within the frequency block 0.262, and between blocks only 0.215, confirming within-block redundancy.

The condition number of the normal matrix:

$$k(X^TX) = \frac{\lambda_{\max}(X^TX)}{\lambda_{\min}(X^TX)} = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_p^2}. \tag{10}$$

For the HAR dataset: $\sigma_1 = 1206.66,\ \lambda_1 = \sigma_1^2/(m-1) = 141.39,\ k\left(X^TX\right) \approx 9.56 \cdot 10^4$. With such a condition number, the relative error of the OLS estimator $\beta = \left(X^TX\right)^{-1}X^Ty$ may be 10^4 times larger than the relative error in the input data [4].

The Variance Inflation Factor:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}, \tag{11}$$

where $R_j^2 - R^2$ regression of x_j on x_k. On a subsample of 30 HAR features: median *VIF* = 22.4, maximum = 80 (threshold = 5). This quantitatively confirms the need for dimensionality reduction.

For any matrix $A \in \mathbb{R}^{m\times p}$ there exists a decomposition (SVD theorem):

$$A = U\Sigma V^T, \quad U^TU = I_p, \quad V^TV = I_p, \tag{12}$$

where $U \in \mathbb{R}^{m\times p}$ contains the left singular vectors; $\Sigma = diag(\sigma_1, \dots, \sigma_p)$, $\sigma_1 \geq \cdots \geq \sigma_p \geq 0$ are the singular values; $V \in \mathbb{R}^{p\times p}$ contains the principal directions (loadings), $V^TV = I_p$. The Frobenius norm is expressed through singular values:

$$\|A\|_F^2 = \sum_{i,j} A_{ij}^2 = \operatorname{tr}(A^TA) = \sum_{j=1}^{p} \sigma_j^2. \tag{13}$$

For HAR: $\|X\|_F^2 = 5{,}777{,}739$ agrees with $\sum\sigma_j^2$ to machine epsilon ($\approx 14 \times 10^{-12}$).

Substituting SVD into the sample covariance matrix $C = X_s^TX_s/(m-1)$:

$$C = V\left(\frac{\Sigma^2}{m-1}\right)V^T = V\Lambda V^T, \quad \lambda_j = \frac{\sigma_j^2}{m-1}. \tag{14}$$

This is the spectral decomposition of C: the columns of V are the eigenvectors and λ_j are the eigenvalues. The fraction of variance explained by the *j*-th component:

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{\sum_p \lambda_k} = \frac{\sigma_j^2}{\|X_s\|_F^2}. \tag{15}$$

For HAR: $\rho_1 = 25.20\%$, $\rho_2 = 8.28\%$, $\rho_1 + \rho_2 = 33.48\%$. The uniform spectrum (small ρ_1) reflects the presence of many significant directions in the data (figure 1).

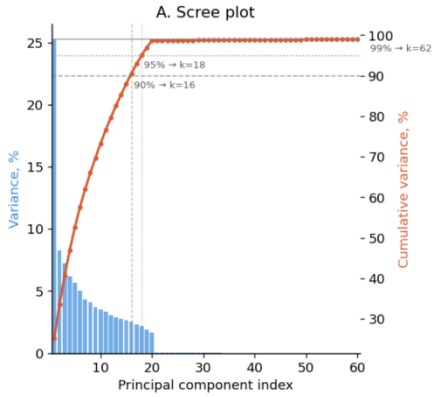


Figure 1 – Explained variance by the first eight principal components (scree plot).

The projection of the data onto the first *k* principal components:

$$Z_k = X_sV_k \in \mathbb{R}^{m\times k}. \tag{16}$$

We prove that the principal components are mutually orthogonal. The covariance matrix of the columns of Z_k:

$$Z^{\mathrm{T}}{}_kZ_k = V^{\mathrm{T}}{}_k(X^{\mathrm{T}}X)V_k = V^{\mathrm{T}}{}_k(V\Sigma^2V^{\mathrm{T}})V_k = \Lambda_k = diag\left(\sigma_1^2, \dots, \sigma_k^2\right). \tag{17}$$

The matrix Λ_k is diagonal because $V^{\mathrm{T}}{}_kV_k = I_k$ (orthonormal columns). This means zero covariances between components: multicollinearity is eliminated by construction. Verification: the maximum off-diagonal entry of $Z^{\mathrm{T}}{}_kZ_k$ for $k = 20$ is $3.7 \cdot 10^{-11}$.

The Eckart–Young theorem [5]: the truncated SVD $X_k = Z_kV^{\mathrm{T}}{}_k$ is the best rank-*k* approximation to X in the Frobenius norm:

$$\|X_s - \hat{X}_k\|_F^2 = \sum_{j>k} \sigma_j^2 = \|X_s\|_F^2 (1 - \rho_1 - \cdots - \rho_k). \quad (18)$$

The relative approximation error decreases with *k*: *k* = 1: 74.8 %; k = 5: 47.4 %; k = 10: 26.7 %; k = 18: 5.0 %; k = 20: 1.4 %.

The effective rank is an entropic measure of intrinsic dimensionality:

$$eff_{rank} = \exp\left(-\sum_{j=1}^{p} \rho_j \ln \rho_j \right). \quad (19)$$

This is the Shannon entropy of the distribution ρ_j. For HAR: $eff_{rank} \approx 16.51$ out of 561. This means that all physically meaningful information about the six activity classes is concentrated in a subspace of dimension ≈17, while the remaining 544 directions carry noise.

To quantify the effect of dimensionality reduction, a logistic regression classifier was trained – a linear model whose decision boundary is a hyperplane in feature space. Data split: 80 % training (8,239 samples), 20 % test (2,060 samples), stratified. Metrics: Accuracy and macro-F1. Results are shown in Table 1.

Table 1 – Classification results for different feature space configurations

Feature Configuration	*p*	Acc., %	F1, %	Dim. reduction / $\sum \rho_j$
Original features	561	62,8	62,7	— / 100 %
PCA, *k* = 10	10	61,1	60,8	−98 % / 73,3 %
PCA, *k* = 18	18	64,8	64,5	−97 % / 95,0 %
PCA, *k* = 20	20	65,5	65,3	−96 % / 98,6 %
PCA, *k* = 30	30	65,1	64,9	−95 % / 98,8 %

The interpretation relies on the prediction error decomposition:

$$\mathbb{E}[(f(x) - y)^2] = \text{Bias}^2(f) + \text{Var}(f) + \sigma_{noise}^2. \quad (20)$$

With all 561 features, the model overfits noise components (small σ_j, j > 20), resulting in high estimator variance. At *k* = 20, removing these components (approximation error 1.4 %) sharply reduces variance. The net result: Accuracy +2.7 pp while reducing feature count 28-fold. The Eckart–Young theorem guarantees the optimality of this choice.

The paper demonstrates that vector algebra tools form a unified mathematical foundation for primary data analysis and optimization of machine learning tasks.

The Gram matrix $G = \widetilde{X}^T \widetilde{X}$ and normalised correlation matrix $R = D^{-1/2} G D^{-1/2}$ enable quantitative characterisation of feature space structure ($R_{ij} = \cos\theta_{ij}$). The condition number $k(X^T X) \approx 9.56 \cdot 10^4$ and median *VIF* = 22.4 confirm severe multicollinearity in the HAR data.

Singular value decomposition $X = U \Sigma V^T$ is simultaneously the algebraic foundation of PCA ($C = V \Lambda V^T$, $\lambda_j = \sigma_j^2/(m-1)$) and a tool for optimal compression. Projection onto *k* = 20 components eliminates multicollinearity ($Z_k^T Z_k = \Lambda_k$), retains 98.6 % of variance, and improves accuracy from 62.8 % to 65.5 %. The effective rank $eff_{rank} \approx 16.5$ confirms that the HAR data are effectively low-dimensional despite the formal dimensionality of $p = 561$.

References

1. Bellman, R.E. Adaptive Control Processes: A Guided Tour. – Princeton University Press, 1961. – 255 p.

2. Anguita, D. [et al.] A Public Domain Dataset for Human Activity Recognition Using Smartphones // ESANN 2013. – 2013. – P. 437–442.

3. Pedregosa, F. [et al.] Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – P. 2825–2830.

4. Golub, G. H., Van Loan, C. F. Matrix Computations. — 4th ed. — Johns Hopkins University Press, 2013. – 780 p.

5. Eckart, C., Young, G. The Approximation of One Matrix by Another of Lower Rank // Psychometrika. – 1936. – Vol. 1, No. 3. – P. 211–218.

УДК 004.934.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭПИДЕМИЙ: РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ КОМПАРТМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В МОБИЛЬНОМ ПРИЛОЖЕНИИ «*EPIDEMICLAB*»

Железняков А.М., Смаловская А.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Цегельник В.В. – д-р физ.-мат. наук, профессор

Аннотация. Рассмотрены математические основы классических эпидемиологических моделей (*SIR*, *SEIR*, *SEIRD*). Описан процесс разработки и функциональные возможности программного комплекса «*EpidemicLab*», предназначенного для интерактивной визуализации и анализа динамики инфекционных заболеваний. Особое внимание уделено численным методам решения систем дифференциальных уравнений и анализу чувствительности параметров модели.

Ключевые слова. Математическое моделирование, эпидемиология, модель *SIR*, Рунге‑Кута 4‑го порядка, мобильная разработка, *EpidemicLab*.

Математическое моделирование биологических систем и социальных процессов стало неотъемлемой частью современной науки. Эпидемиологические кризисы последних десятилетий, включая пандемию *COVID*-19, вспышки лихорадки Эбола и сезонные эпидемии гриппа, подчеркнули острую необходимость в инструментах быстрого и точного прогнозирования. Основная проблема современных профессиональных аналитических систем (таких как *MATLAB*, *Wolfram Mathematica* или библиотеки *Python* типа *SciPy*) заключается в их высоком пороге входа. Для работы с ними требуются глубокие навыки программирования и понимание синтаксиса, что делает их недоступными для широкого круга медицинских работников, студентов и общественных аналитиков.

Создание мобильной среды моделирования «*EpidemicLab*» призвано решить эту проблему, перенеся мощный математический аппарат в интуитивно понятный интерфейс смартфона. Мобильные устройства позволяют проводить интерактивные симуляции «на лету», исследуя влияние различных факторов.

Математический аппарат компартментальных моделей. В основе функционирования «*EpidemicLab*» лежат детерминированные компартментальные модели. Их фундаментальный принцип заключается в разделении популяции объемом N на несколько непересекающихся групп (компартментов) в зависимости от стадии заболеваниях [2]. Модель *SIR*, предложенная Кермаком и Маккендриком в 1927 году, является базисом эпидемиологии. Она оперирует тремя классами: S (*Susceptible* — восприимчивые), I (*Infected* — инфицированные) и R (*Recovered* — выздоровевшие). Динамика описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\begin{cases} \dfrac{dS}{dt} = \dfrac{-\beta \cdot S \cdot I}{N}, \\ \dfrac{dI}{dt} = \dfrac{\beta \cdot S \cdot I}{N} - \gamma \cdot I, \\ \dfrac{dR}{dt} = \gamma \cdot I. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь ключевую роль играют параметры β (коэффициент интенсивности контактов) и γ (коэффициент интенсивности выздоровления). Важным биологическим параметром является величина $\frac{1}{\gamma}$, отражающая среднюю продолжительность инфекционного периода. Легко видеть, что система (1) обладает законом сохранения $S(t) + I(t) + R(t) = N$, что характеризует её как закрытую детерминированную систему [3].

Для многих инфекций, таких как корь, характерен значительный инкубационный период. Модель *SEIR* добавляет компартмент E (*Exposed*) — люди, которые уже заражены, но еще не способны передавать вирус. В систему вводится параметр σ, определяющий скорость перехода из латентного состояния в активное. Это существенно меняет фазовый портрет эпидемии: пик заболеваемости смещается по времени, а «размах» эпидемии становится более предсказуемым для систем здравоохранения.

Для анализа особо опасных инфекций необходимо учитывать летальность. Модель *SEIRD* добавляет класс D (*Deceased* — умершие) и коэффициент смертности μ. В этом случае

инфицированные индивиды с определенной вероятностью либо переходят в класс R, либо в класс D. Сравнительный анализ моделей в приложении наглядно показывает, как высокая смертность может парадоксальным образом «сдерживать» распространение эпидемии за счет быстрого выбывания носителей из активной фазы [1, 2].

Пороговая теорема и анализ чувствительности. Центральным понятием всех реализованных моделей является базовое репродуктивное число R_0. Для модели *SIR* оно рассчитывается по формуле $R_0 = \frac{\beta}{\gamma}$. Значение R_0 определяет судьбу популяции: при $R_0 > 1$ инфекция распространяется экспоненциально, вызывая вспышку;
при $R_0 < 1$ эпидемия затухает естественным образом [2, 3].

В «*EpidemicLab*» реализован модуль анализа чувствительности (*sensitivity analysis*), который позволяет пользователю в реальном времени наблюдать, как изменение β (например, при соблюдении дистанции) или γ (при использовании антивирусных препаратов) влияет на R_0. Визуализация этого процесса помогает понять концепцию «сглаживания кривой» [4, 5].

Фундаментальное свойство всех этих моделей. Все они являются детерминированными и автономными системами.

Это означает, что их поведение полностью предопределено начальными условиями и параметрами. Если мы задали β, γ и начальное количество зараженных, будущее развитие событий предопределено. В этих моделях нет места случайности или хаосу [2].

Математически это выражается в существовании первого интеграла — закона сохранения. Для модели *SIR* сумма всех классов постоянна:

$$S + I + R = N, \tag{2}$$

где *N* — общая численность населения.

Из этого следует важнейший вывод: система всегда стремится к устойчивому состоянию равновесия. Кривая заболеваемости неизбежно идет на спад не потому, что заканчиваются все восприимчивые (они всегда остаются), а из-за снижения числа инфицированных. График не может быть хаотичным — это строго закономерный процесс.

Техническая реализация и архитектура системы. Программный комплекс разработан для платформы *Android* с использованием языка *Kotlin*.

Приложение следует принципам *Clean Architecture* и паттерну *MVVM* (*Model-View-ViewModel*). Математическое ядро выделено в отдельный доменный слой, не имеющий зависимостей от *Android*-фреймворка. Это гарантирует точность вычислений и позволяет легко расширять список моделей. Слой представления реализован на *Jetpack Compose* — современном декларативном фреймворке, который обеспечивает реактивное обновление интерфейса при изменении параметров симуляции. Для численного интегрирования систем уравнений (1-3) используется классический метод Рунге-Кутты 4-го порядка (*RK*4). В отличие от метода Эйлера, *RK*4 обеспечивает четвертый порядок точности относительно шага дискретизации dt. В настройках приложения пользователь может выбрать точность от $dt = 0.5$ до $dt = 0.01$, что позволяет найти баланс между скоростью отрисовки графика и математической строгостью. Важной программной надстройкой стали валидаторы, гарантирующие неотрицательность численности популяций на каждом шаге итерации.

Методология *AI-Assisted Development.* Отдельного внимания заслуживает процесс разработки. В качестве эксперимента в проект была интегрирована методология *AI-Assisted Development* с использованием большой языковой модели *Google Gemini* 3 *Pro*. Искусственный интеллект выполнял функции «парного программиста» на следующих этапах:

1. Генерация шаблонов: *ИИ* помогал в написании однотипного кода для реализации дифференциальных уравнений на *Kotlin*.
2. Разработка *UI*: Создание сложных кастомных графиков на базе *Canvas* требовало точных геометрических расчетов, где *ИИ* предлагал эффективные алгоритмы масштабирования.
3. Оптимизация базы данных: Структура *Room DB* для сохранения истории симуляций была спроектирована с учетом рекомендаций модели по нормализации данных. Этот подход позволил сократить время написания кода на 35% и минимизировать количество логических ошибок в реализации математических алгоритмов.

Функциональный обзор интерфейса (анализ рисунков). Приложение «*EpidemicLab*» предоставляет пользователю полный цикл работы с эпидемиологическими данными, что отражено на скриншотах программы

На главном экране (Рис. 1, левая часть) отображается история недавних симуляций с миниатюрными графиками (спарклайнами). Это позволяет пользователю мгновенно оценить характер предыдущих расчетов без необходимости их открытия. В каталоге моделей (Рис. 1, правая часть) для каждой системы (*SIR*, *SEIR*, *SEIRD*) приведено схематичное описание, дифференциальные уравнения и формулы расчета R_0, что превращает приложение в полноценный образовательный инструмент.

Центральным элементом системы является интерактивный график (Рис. 2, правая часть). Мы реализовали поддержку жестов *pinch-to-zoom* для детального изучения пика заболеваемости. Кольцевой индикатор в правой верхней части динамически меняет цвет в зависимости от R_0: красный сигнализирует о росте эпидемии, зеленый — о затухании. Также реализован функционал сравнения (Рис. 2, левая часть), где пользователь может запустить две разные модели параллельно, чтобы выявить влияние инкубационного периода на скорость распространения.

Для интеграции результатов в научные работы предусмотрен модуль экспорта. Приложение поддерживает сохранение графиков в форматах *PNG*/*JPG*, генерацию комплексного *PDF*-отчета со всеми входными параметрами и выгрузку временных рядов в формат *CSV*. Последнее позволяет проводить более глубокий статистический анализ в специализированных пакетах, таких как *R* или *Python*.

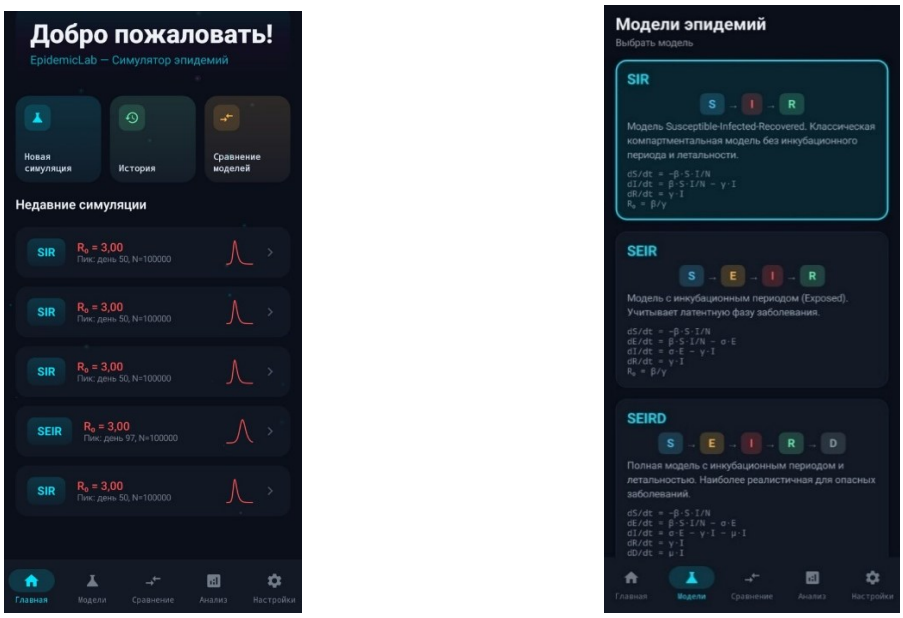


Рисунок 1 — Главное меню приложения и экран выбора математических моделей.

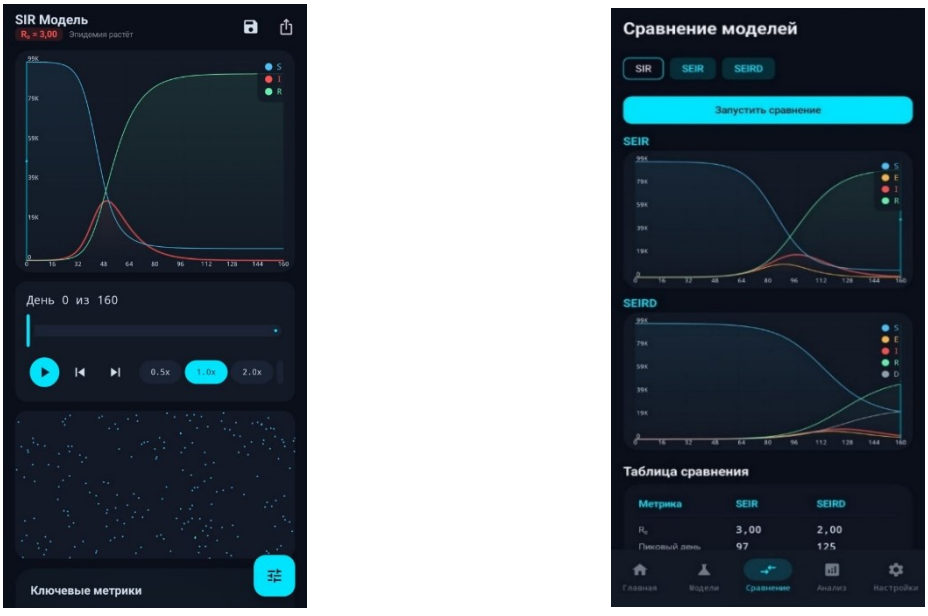


Рисунок 2 — Сравнительный анализ моделей и демонстрация интерактивного графика симуляции

Результаты и обсуждение: анализ динамики и устойчивости системы. Важнейшим результатом исследования стало подтверждение того, что все реализованные модели являются детерминированными и автономными системами. На практике это означает, что их поведение полностью предопределено начальными условиями и заданными параметрами (β, γ, σ). При проведении повторных симуляций с идентичными входными данными график всегда остается неизменным.

Мы подчеркиваем: в данных математических моделях нет места случайности или хаосу. График заболеваемости не может совершать хаотические колебания. Это строго закономерный процесс, где будущее развитие событий жестко связано с текущим состоянием системы. Пользователь приложения может наглядно убедиться в этом, наблюдая за гладкими кривыми, которые всегда стремятся к устойчивому состоянию.

Математическая стабильность моделей «*EpidemicLab*» выражается в существовании первого интеграла — закона сохранения численности популяции. Для базовой модели *SIR* сумма всех классов остается константой: $S(t) + I(t) + R(t) = N = const$. Это фундаментальное свойство гарантирует, что система не «разваливается» со временем. Наличие первого интеграла накладывает жесткое ограничение на фазовое пространство системы: траектории движения всегда лежат на определенной плоскости (в случае трех переменных).

Заключение. В данной работе проведен теоретический и практический анализ методов моделирования эпидемий. Разработанное мобильное приложение «*EpidemicLab*» успешно сочетает в себе научную строгость численных методов и удобство мобильной платформы. Экспериментально подтверждена эффективность применения ИИ-ассистентов в разработке сложного научного ПО.

Разработанный инструмент может быть рекомендован к использованию в образовательных целях для изучения эпидемиологии и системного анализа. В качестве перспектив развития планируется интеграция стохастических моделей (алгоритм Гиллеспи) для учета случайных факторов при малых выборках популяции, а также внедрение агентных моделей для пространственного моделирования распространения инфекции.

Список использованных источников

1. Brauer, F. Models for the spread of universally fatal diseases / F. Brauer // Journal of Mathematical Biology. – 2002. – Vol. 45, No. 4. – P. 341–354.

2. Brauer, F. Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology / F. Brauer, C. Castillo-Chavez. – New York : Springer, 2002. – 508 p.

3. Diekmann, O. Mathematical Epidemiology of Infectious Diseases: Model Building, Analysis and Interpretation / O. Diekmann, J.A.P. Heesterbeek. – Chichester : Wiley, 2000. – 303 p.

4. Ferguson, N.M. Transmission intensity and impact of control policies on the foot and mouth epidemic in Great Britain / N.M. Ferguson, C.A. Donnelly, R.M. Anderson // Nature. – 2001. – Vol. 413, No. 6855. – P. 542–548.

5. Gani, R. The re-emergence of smallpox / R. Gani, S. Leach // Clinical Medicine. – 2001. – Vol. 1, No. 6. – P. 455–459.

UDC 004.934.2

MATHEMATICAL MODELING OF EPIDEMIC DYNAMICS: IMPLEMENTATION OF DETERMINISTIC COMPARTMENTAL MODELS IN THE MOBILE APPLICATION "EPIDEMICLAB"

Zheleznyakov A.M., Smalovskaya A.V., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Tsegelnik V.V. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Annotation. The article discusses the mathematical foundations of classical epidemiological models (SIR, SEIR, SEIRD). The development process and functionality of the Epidemiclab software package, designed for interactive visualization and analysis of the dynamics of infectious diseases, are described. Special attention is paid to numerical methods for solving systems of differential equations and sensitivity analysis of model parameters.

Keywords. Mathematical modeling, epidemiology, SIR model, Runge-Kuta 4th order, mobile development, EpidemioLab.

УДК 519.876.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ (SIR-МОДЕЛЬ)

Житко Р.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л.В. - старший преподаватель

Аннотация. В работе рассматривается классическая SIR-модель Кермака–Маккендрика, описывающая распространение инфекционного заболевания в замкнутой популяции. Приводится постановка модели в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, анализируются её основные качественные свойства: закон сохранения численности популяции, монотонность решений, затухание эпидемии, пороговое условие начала вспышки и существование пика числа инфицированных. Также рассматривается первый интеграл системы и выводится условие достижения максимума функции инфицированных. Для конкретных параметров проводится численное моделирование методом Эйлера, результаты которого сопоставляются с аналитическими оценками. Показано, что SIR-модель, несмотря на простоту, адекватно отражает ключевые закономерности эпидемического процесса и служит основой для более сложных моделей математической эпидемиологии.

Ключевые слова. SIR-модель, математическая эпидемиология, дифференциальные уравнения, базовое репродуктивное число, пик эпидемии, численное моделирование, метод Эйлера, коллективный иммунитет.

Введение. Математическое моделирование эпидемий – одно из важнейших приложений дифференциального исчисления к реальным задачам. Пандемия COVID-19 наглядно продемонстрировала, что математические модели играют ключевую роль в прогнозировании динамики заболеваний и принятии управленческих решений. Цель данной работы – изучить классическую SIR-модель Кермака–Маккендрика, исследовать её свойства средствами математического анализа и провести численное моделирование.

SIR-модель была предложена У. Кермаком и А. Маккендриком в 1927 году. Всё население численностью N делится на три группы:

S(t) – восприимчивые (здоровые, способные заразиться);

I(t) – инфицированные (больные, распространяющие инфекцию);

R(t) – выздоровевшие (приобрели иммунитет).

Основные допущения: численность популяции постоянна (S+I+R=N), каждый индивид контактирует с остальными равновероятно, после выздоровления приобретается пожизненный иммунитет, латентный период отсутствует.

Модель описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta SI}{N} \qquad \frac{dI}{dt} = \frac{\beta SI}{N} - \gamma I \qquad \frac{dR}{dt} = \gamma I$$

Где β – скорость передачи инфекции (число заражающих контактов в единицу времени), γ=1/Tinf – скорость выздоровления (Tinf – средняя продолжительность болезни). Отношение $R_0 = {}^{\beta}/_{\gamma}$ называется базовым репродуктивным числом и равно среднему числу людей, которых заражает один больной за всё время болезни в полностью восприимчивой популяции.

Закон сохранения. Сложив все три уравнения, получим:

$$\frac{d}{dt}(S + I + R) = -\frac{\beta SI}{N} + \frac{\beta SI}{N} - \gamma I + \gamma I = 0\,,$$

Следовательно, S(t) + I(t) + R(t) = N = const. Это позволяет исключить R и работать с двумя уравнениями.

Монотонность. Поскольку $S'(t) = \frac{-\beta SI}{N} \le 0$ и $R'(t) = \gamma I \ge 0$, функция S(t) монотонно убывает, а R(t) монотонно возрастает. Обе функции ограничены отрезком [0,N], значит, по теореме Вейерштрасса существуют пределы $S_\infty = \lim_{t\to+\infty} S(t)$ и $R_\infty = \lim_{t\to+\infty} R(t)$.

Затухание эпидемии. Из равенства $R(t) - R(0) = \gamma\int_0^t I(\tau)d\tau$ и ограниченности $R(t) \le N$ следует сходимость интеграла $\int_0^{+\infty} I(\tau)d\tau < \infty$. По лемме Барбалата (производная $I'(t)$ ограничена, I(t) непрерывна) получаем $\lim_{t\to+\infty} I(t) = 0$: эпидемия всегда заканчивается.

Фазовые траектории. Разделив второе уравнение на первое:

$$\frac{dI}{dS} = -1 + \frac{N}{R_0 S}.$$

Интегрируя, получаем первый интеграл системы:

$$I(S) = I_0 + S_0 - S + \frac{N}{R_0}\ln\frac{S}{S_0}.$$

Пороговая теорема. Из второго уравнения при t = 0 и $S_0 \approx N$:

$$I'(0) = I_0\left(\frac{\beta S_0}{N} - \gamma\right) \approx \gamma I_0(R_0 - 1).$$

Если $R_0 > 1$, то $I'(0) > 0$ – число заражённых растёт, эпидемия развивается. Если $R_0 < 1$, то $I'(0) < 0$ – эпидемия затухает с самого начала. Это пороговая теорема Кермака–Маккендрика.

Пик эпидемии. Исследуем I(S) на максимум $dI/dS = 0$ при $S^* = N/R_0$. Вторая производная

$$\frac{d^2I}{dS^2} = -\frac{N}{R_0 S^2} < 0 \text{ при } S > 0$$

Так как вторая производная всегда отрицательна, найденная точка $S^* = \frac{N}{R_0}$ является точкой строгого максимума. Подставив значение S^* в уравнение фазовой траектории, получим выражение для пикового числа инфицированных I_{max}:

$$I_{max} = I_0 + S_0 - \frac{N}{R_0} + (1 + ln\frac{R_0 S_0}{N})$$

Из этого следует важный эпидемиологический вывод: пик эпидемии наступает в тот момент, когда доля восприимчивых в популяции снижается до величины $1/R_0$. Величина $1 - 1/R_0$ называется порогом коллективного иммунитета. Как только переболевшие и вакцинированные составляют эту долю популяции, число активных больных начинает снижаться.

Конечный размер эпидемии. Рассмотрим состояние системы при $t \to +\infty$. Как было показано ранее, $I_\infty = 0$. Подставив $I = 0$ и $S = S_\infty$ в первый интеграл системы (полагая $I_0 \approx 0$, $S_0 \approx N$), получаем трансцендентное уравнение для определения конечного числа восприимчивых S_∞ , которые избежали заражения:

$$ln\frac{S_0}{S_\infty} = R_0\left(1 - \frac{S_\infty}{N}\right)$$

Анализ этого уравнения показывает, что при $R_0 > 1$ всегда выполняется $S_\infty > 0$. Это означает, что эпидемия никогда не поражает 100% популяции – всегда остается часть индивидов, которые не заболеют, так как эпидемия затухнет раньше из-за истощения цепочек передачи вируса.

Численное решение и пример расчета. Система SIR не имеет решения в элементарных функциях, поэтому применяется метод Эйлера с шагом h:

$$S_{n+1} = S_n - h\frac{\beta S_n I_n}{N} \qquad I_{n+1} = I_n + h(\frac{\beta S_n I_n}{N} - \gamma I_n) \qquad R_{n+1} = R_n + h\gamma I_n$$

Рассмотрим модельную эпидемию: N = 10000, $I_0 = 1$, β = 0,4 $день^{-1}$,

γ = 0,1 $день^{-1}$, то есть $R_0 = 4$. Средняя продолжительность болезни – 10 дней, время удвоения в начальной фазе – $T_2 \approx 2{,}3$ дня.

Аналитические оценки: пик при $S^* = 2500$, $I_{max} \approx 4000$, финальная доля переболевших ≈ 98%.

Результаты численного моделирования (h=0,1 дня):

День	S	I	R
0	9999	1	0
10	9978	18	4
30	4375	3851	1774
40	682	2321	6997
70	160	19	9821
100	156	≈ 0	9844

Динамика подтверждает теоретические выводы: экспоненциальный рост в начале, резкий пик около 30-го дня, затем затухание. Итоговая доля переболевших — 98,4%, что согласуется с решением уравнения $z = e^{-4(1-z)}$.

Значение R_0 и коллективный иммунитет. Для предотвращения эпидемии необходимо, чтобы доля иммунных в популяции (например, за счёт вакцинации) превысила порог $p_c = 1 - 1/R_0$. Для кори ($R_0 \approx 15$) это 93%, для гриппа ($R_0 \approx 2$) – 50%, для исходного штамма COVID-19 ($R_0 \approx 3$) – 67%.

Заключение. В работе проведено аналитическое и численное исследование SIR-модели. Показано, что средствами математического анализа (производные, интегралы, исследование на экстремум, несобственные интегралы, предельные теоремы) можно строго доказать основные свойства модели: закон сохранения, монотонность, затухание эпидемии, существование пика и пороговый эффект. Несмотря на простоту, SIR-модель верно отражает ключевые закономерности эпидемического процесса и остаётся фундаментом современной математической эпидемиологии.

Список использованных источников:

1. Kermack W. O., McKendrick A. G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. – 1927. – Vol. 115. – P. 700–721.

2. Мюррей Дж. Д. Математическая биология. Том I. – М.–Ижевск: ИКИ, 2009.

3. Hethcote H. W. The Mathematics of Infectious Diseases // SIAM Review. – 2000. – Vol. 42, No. 4. – P. 599–653.

4. Братусь А. С., Новожилов А. С., Платонов А. П. Динамические системы и модели биологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.

5. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том I. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.

UDC 519.876.5

MATHEMATICAL MODELING OF EPIDEMIC SPREAD (SIR MODEL)

Zhitko R.V.,student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Lobanok L.V. – Senior Lecturer at the Department of Computational Mathematics

Annotation. This paper examines the classical Kermack–McKendrick SIR model describing the spread of an infectious disease in a closed population. The model formulation as a system of ordinary differential equations is presented, and its main qualitative properties are analyzed: population conservation law, monotonicity of solutions, epidemic fade-out, threshold condition for outbreak initiation, and the existence of a peak in the number of infected individuals. The first integral of the system is also considered, and the condition for achieving the maximum of the infected function is derived. For specific parameters, numerical simulation is performed using the Euler method, and the results are compared with analytical estimates. It is shown that the SIR model, despite its simplicity, adequately reflects the key patterns of the epidemic process and serves as a foundation for more complex models in mathematical epidemiology.

Keywords. SIR model, mathematical epidemiology, differential equations, basic reproduction number, epidemic peak, numerical simulation, Euler method, herd immunity.

УДК 519.61:003.26

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В КРИПТОГРАФИИ: ОТ АЛГОРИТМОВ ЕВКЛИДА ДО RSA

Кардаш Д.О., Гук Н. И., Пархонюк М. П., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Степанова Т. С. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В статье рассматривается математический фундамент современной асимметричной криптографии. Изложение строится от алгоритма Евклида и теоремы Ферма к системе RSA. Показана логическая цепочка: алгоритм деления → НОД → расширенный алгоритм Евклида → тест Миллера–Рабина → RSA. Для каждого метода приводятся формулировка, доказательство корректности и числовой пример.

Ключевые слова. алгоритм Евклида, НОД, теорема Ферма, тест Миллера–Рабина, RSA, асимметричная криптография, модулярная арифметика.

Введение. Криптография – область математики и информатики, обеспечивающая конфиденциальность, целостность и аутентичность информации. Наиболее известная асимметричная криптосистема – RSA, предложенная Ривестом, Шамиром и Адлеманом в 1978 году [1].

Как указано в учебном пособии [2], в основе построения RSA лежат два фундаментальных алгоритма теории чисел: алгоритм деления с остатком и алгоритм Евклида.

Безопасность RSA определяется вычислительной трудностью факторизации: для числа n = p·q, где p и q – большие простые, разложить n на множители без знания этих простых практически невозможно [1]. Для построения таких систем необходимо уметь эффективно проверять простоту чисел и вычислять НОД – именно этому посвящена настоящая работа.

1. Алгоритм Евклида

1.1. Наибольший общий делитель

Определение 1.1 [1]. Целое b делит целое a, если существует целое c такое, что a = b·c. Наибольший общий делитель d = НОД(a, b) – наибольшее целое, делящее оба числа. Числа взаимно просты, если НОД(a, b) = 1.

Лемма 1.1 [1]. Пусть a = b·q + r. Тогда НОД(a, b) = НОД(b, r). Доказательство: если d делит a и b, то делит и r = a − b·q, и наоборот. Следовательно, множества общих делителей пар (a, b) и (b, r) совпадают, откуда их максимумы равны.

1.2. Классический алгоритм Евклида

Алгоритм 1.1 (алгоритм Евклида) [1].
Ввод: натуральные a > b.
Вывод: НОД(a, b).
Шаг 1. A = a; B = b.
Шаг 2. R = A mod B.
Шаг 3. Если R = 0: вернуть B..
Шаг 4. A = B; B = R; перейти к шагу 2.

Теорема 1.1 (алгоритм Евклида) [1]. Последний ненулевой остаток равен НОД(a, b). Конечность алгоритма обусловлена строгим убыванием остатков: $0 \le \ldots < r_3 < r_2 < r_1 < b$. Каждая итерация сохраняет НОД по лемме 1.1.

Таблица 1 – Выполнение алгоритма Евклида для НОД(1234, 54)

Шаг	a	b	r = a mod b	НОД
1	1234	54	46	= НОД(54, 46)
2	54	46	8	= НОД(46, 8)
3	46	8	6	= НОД(8, 6)
4	8	6	2	= НОД(6, 2)
5	6	2	0	= 2

Результат: НОД(1234, 54) = 2. Число итераций алгоритма O(log min(a, b)). По теореме Ламе [1]: число шагов не превышает пятикратного числа десятичных цифр меньшего из чисел.

1.3. Расширенный алгоритм Евклида

Теорема 1.2 (тождество Безу) [1]. Для любых натуральных a и b существуют целые α, β такие, что α·a + β·b = НОД(a, b). Коэффициенты Безу вычисляются рекуррентным дополнением таблицы Евклида: $x_n = x_{n-2} - q_n \cdot x_{n-1}$, $y_n = y_{n-2} - q_n \cdot y_{n-1}$, $x_{-1} = 1$, $y_{-1} = 0$, $x_0 = 0$, $y_0 = 1$.

Пример 1.1. Для НОД(1234, 54): α = −7, β = 160. Проверка: (−7)·1234 + 160·54 = −8638 + 8640 = 2. Применение в RSA: секретный ключ $d = e^{-1} \bmod \varphi(n)$ вычисляется запуском расширенного алгоритма Евклида для пары (e, φ(n)).

2. Малая теорема Ферма

2.1. Арифметика остатков

Кольцо вычетов $\mathbb{Z}_n = \{0, 1, ..., n-1\}$ с операциями mod n. По теореме обратимости [1]: элемент ā обратим в $\mathbb{Z}_n$ тогда и только тогда, когда НОД(a, n) = 1. Обратный элемент $a^{-1} \bmod n$ вычисляется расширенным алгоритмом Евклида. Это ключевое свойство для RSA: открытая экспонента e выбирается взаимно простой с φ(n), что гарантирует существование $d = e^{-1} \bmod \varphi(n)$.

2.2. Формулировка и доказательство

Теорема 2.1 (малая теорема Ферма) [1]. Пусть p — простое, a — любое целое. Тогда $a^p \equiv a \pmod p$. Если $p \nmid a$, то $a^{p-1} \equiv 1 \pmod p$.

Доказательство проводится индукцией по a. База: $1^p = 1$. Шаг: пусть $n^p \equiv n \pmod p$. По лемме о биноме в $\mathbb{Z}_p$: $(n+1)^p \equiv n^p + 1^p \equiv n + 1 \pmod p$, поскольку биномиальный коэффициент C_p^k при $0 < k < p$ кратен p.

Следствие позволяет редуцировать большие показатели: $a^k \equiv a^r \pmod p$, где $r = k \bmod (p-1)$. Пример 2.1 [1]: $2^{5^{4^{3^{2^{6^{7^5}}}}}} \bmod 13$. Так как $2^{12} \equiv 1 \pmod{13}$ и 5432675 = 12·452722 + 11, получаем $2^{5^{4^{3^{2^{6^{7^5}}}}}} \equiv 2^{11} = 2048 \equiv 7 \pmod{13}$.

3. Тест Миллера–Рабина

3.1. Псевдопростые числа и числа Кармайкла

Определение 3.1 [1]. Нечётное составное n называется числом Кармайкла, если $b^{n-1} \equiv 1 \pmod n$ при НОД(b, n) = 1. Простейший пример: 561 = 3·11·17. Теорема Корселта [1]: нечётное n – число Кармайкла тогда и только тогда, когда для каждого простого делителя p: $p^2 \nmid n$ и $(p-1) \mid (n-1)$. Числа Кармайкла обходят тест Ферма, поэтому требуется более сильный тест.

3.2. Алгоритм теста

Основная идея [1]: записать $n-1 = 2^k \cdot q$, q нечётно. Если n простое, то для основания b в последовательности $b^q, b^{2q}, ..., b^{2^k q}$ либо первый элемент ≡ 1, либо найдётся элемент ≡ n−1 (mod n). Нарушение доказывает составность n.

Алгоритм 3.1 (тест Миллера–Рабина) [1].

Вход: нечётное n > 0, основание b: 1 < b < n−1.

Шаг 1. Найти k, q: $n-1 = 2^k \cdot q$, q нечётно.

Шаг 2. $r = b^q \bmod n$; i = 0.

Шаг 3. Если (i = 0 и r = 1) или r = n−1: «вероятно простое» – стоп.

Шаг 4. i = i+1; $r = r^2 \bmod n$.

Шаг 5. Если i < k: перейти к шагу 3. Иначе: «n составное».

Теорема Рабина [1]: при k случайных основаниях вероятность ошибки $\le 4^{-k}$. При k = 40 – это менее 10^{-24} . Тест является промышленным стандартом генерации простых чисел для RSA.

Таблица 2 – Тест Миллера для n = 561, b = 2 ($560 = 2^4 \cdot 35$)

$2^{35} \bmod 561$	$2^{70} \bmod 561$	$2^{140} \bmod 561$	$2^{280} \bmod 561$
263	166	67	1

Вывод: 561 составное, так как среди предшествующих единице элементов последовательности нет значения n−1 = 560. Тест не обманывается числом Кармайкла.

4. Алгоритм RSA

4.1. Математическое обоснование

Теорема Эйлера [3]. Для НОД(M, n) = 1: $M^{\varphi(n)} \equiv 1 \pmod n$. Если $e \cdot d \equiv 1 \pmod{\varphi(n)}$, то $(M^e)^d = M^{e \cdot d} = M^{k \cdot \varphi(n)+1} \equiv M \pmod n$. Это гарантирует корректность дешифрования: зашифровав открытым ключом, получим исходное сообщение при применении секретного.

4.2. Генерация ключей

1. Выбрать простые p и q (≥ 512 бит) с помощью теста Миллера–Рабина.
2. n = p·q – модуль RSA; φ(n) = (p−1)·(q−1) – функция Эйлера.
3. Выбрать e: 1 < e < φ(n), НОД(e, φ(n)) = 1.

Наиболее распространённое значение открытой экспоненты e = 65537 = 2^{16} + 1. Оно является простым, имеет малый вес Хэмминга (две единицы в двоичной записи), что ускоряет возведение в степень. Меньшие значения (например, e = 3) подвержены атакам при малом сообщении.

4. $d = e^{-1} \bmod \varphi(n)$ — расширенным алгоритмом Евклида.

5. Открытый ключ (e, n). Секретный ключ (d, n). p, q, φ(n) уничтожить.

Современные рекомендации (NIST SP 800-57) требуют для RSA длину модуля n не менее 2048 бит для обеспечения стойкости до 2030 года. При этом p и q выбираются примерно одинаковой длины — около 1024 бит каждое.

4.3. Числовой пример

Таблица 3. Пошаговый пример RSA (p = 61, q = 53)

Параметр	Значение	Пояснение
p	61	1-е простое
q	53	2-е простое
$n = p \cdot q$	3233	Модуль RSA (открытый)
φ(n)	3120	Функция Эйлера (секрет)
e	17	НОД(17, 3120) = 1
$d = e^{-1} \bmod \varphi(n)$	2753	$17 \cdot 2753 = 46801 = 15 \cdot 3120 + 1$
Открытый ключ	(17, 3233)	Публикуется
Секретный ключ	(2753, 3233)	Хранится в тайне
Сообщение M	65	Числовое представление
Шифртекст $C = M^e \bmod n$	2790	$65^{17} \bmod 3233$
Расшифровка $M = C^d \bmod n$	65	$2790^{2753} \bmod 3233 = 65$

Ключевой шаг – нахождение d: применяем расширенный алгоритм Евклида к паре (17, 3120). Проверка: $17 \cdot 2753 = 46801 = 15 \cdot 3120 + 1 \equiv 1 \pmod{3120}$.

4.4. Быстрое возведение в степень

При практическом применении RSA необходимо вычислять выражения вида $C = M^e \bmod n$ и $M = C^d \bmod n$, где показатель степени достигает 1024 бит и более. Прямолинейное последовательное умножение, требующее порядка e операций, при таких значениях показателя становится вычислительно неосуществимым: число шагов составило бы около 2^{1024}, что многократно превышает возможности любых современных вычислительных систем.

Эффективное решение основано на разложении показателя по степеням двойки. Запишем e в двоичном виде: $e = b_m \cdot 2^m + b_{m-1} \cdot 2^{m-1} + \ldots + b_1 \cdot 2 + b_0$, где $b_i \in \{0, 1\}$, b_m – старший бит. Тогда M^e представляется как произведение множителей вида $(M^{2^i})^{b_i}$, причём каждый множитель M^{2^i} получается из предыдущего одним возведением в квадрат. Это наблюдение лежит в основе метода бинарного возведения в степень.

Наиболее распространённым вариантом является обход битов показателя от старшего к младшему (метод MSB-first, или «слева направо»). Алгоритм поддерживает промежуточный результат R, инициализируемый единицей; на каждом шаге он возводится в квадрат, а при обнаружении единичного бита дополнительно умножается на основание M. После обработки всех битов в R накапливается искомое значение.

Алгоритм 4.4 (бинарное возведение в степень, обход слева направо) [4].

Вход*:* основание M, показатель $e = (b_m\, b_{m-1} \ldots b_1\, b_0)_2$, модуль n.

Выход*:* $R = M^e \bmod n$.

Шаг 1. Положить R = 1.

Шаг 2. Для i от m до 0 (от старшего бита к младшему):

1) выполнить $R = R^2 \bmod n$;
2) если $b_i = 1$, выполнить $R = R \cdot M \bmod n$.

Шаг 3. Вернуть R.

Докажем, что по завершении итерации с индексом i промежуточный результат R содержит значение M^{e_i}, где e_i – число, образованное старшими битами e начиная с b_m до b_i включительно. При i = m после первого шага $R = M^{b_m}$, что соответствует инварианту. На каждой последующей итерации

возведение в квадрат сдвигает показатель влево (умножает на 2), а умножение на M добавляет единицу в показатель, если текущий бит равен 1. Таким образом, после обработки бита b_0 в R сосредоточено значение $M^e \bmod n$.

Алгоритм выполняет ровно (m + 1) возведений в квадрат и не более (m + 1) умножений, то есть не более 2(m + 1) = O(log e) модульных операций. При $e \approx 2^{1024}$ это порядка 1024, что на много порядков меньше прямолинейного подхода. Именно благодаря алгоритму 4.4 RSA остаётся практически применимым: шифрование и генерация подписи выполняются за миллисекунды даже при 2048-битном модуле.

Заключение. Алгоритм Евклида и его расширенная версия обеспечивают эффективное вычисление наибольшего общего делителя и обратного элемента в кольце вычетов, что необходимо для нахождения секретной экспоненты $d = e^{-1} \bmod \varphi(n)$. Малая теорема Ферма объясняет корректность схемы шифрования и дешифрования: возведение сообщения в степень e, а затем в степень d даёт исходное значение по модулю n. Тест Миллера–Рабина позволяет с пренебрежимо малой вероятностью ошибки удостовериться в простоте чисел p и q, из которых строится модуль RSA. Алгоритм бинарного возведения в степень сводит число модульных умножений к O(log e), делая шифрование и дешифрование практически осуществимыми при криптографически значимых длинах ключей.

Список использованных источников:

1. Rivest R., Shamir A., Adleman L. A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems // Comm. ACM. — 1978.

2. Ильин М.Е., Ципоркова К.А. Теоретико-числовые методы в криптографии. Ч. 1: учеб. пособие. — Рязань: РГРТУ, 2020. — 112 с.

3. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Т. 2: Получисленные алгоритмы. — М.: Вильямс, 2007. — 832 с.

4. Шнайер Б. Прикладная криптография. — М.: Триумф, 2002. — 816 с.

5. Menezes A., van Oorschot P., Vanstone S. Handbook of Applied Cryptography. — CRC Press, 1996. — 780 p.

UDC 519.61:003.26

NUMERICAL METHODS IN CRYPTOGRAPHY: FROM EULER ALGORITHMS TO RSA

Kardash. D. O., Huk N. I., Parkhaniuk M. P., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Stepanova T. S. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Abstract. The article discusses the mathematical foundation of modern asymmetric cryptography. The presentation is based on the Euclidean algorithm and Fermat's theorem, leading to the RSA system. A logical chain is presented: division algorithm → greatest common divisor → extended Euclidean algorithm → Miller–Rabin test → RSA. Each method is described, including its formulation, proof of correctness, and numerical example.

Keywords. Euclidean algorithm, greatest common divisor, Fermat's theorem, Miller–Rabin test, RSA, Euler function, asymmetric cryptography, modular arithmetic.

УДК 519.6:004.4

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СХОДИМОСТИ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СЛАУ

Кондратова У. О., Болбас К. В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Степанова Т. С. – канд. физ -мат. наук, доцент

Аннотация. Статья посвящена сравнительному анализу итерационных методов решения систем линейных алгебраических уравнений — Якоби, Гаусса–Зейделя и SOR. Алгоритмы реализованы в среде Wolfram Mathematica; построены графики убывания нормы невязки в логарифмическом масштабе, позволяющие наглядно оценить скорость сходимости каждого метода. Отдельно исследовано влияние параметра релаксации ω на эффективность метода SOR. Результаты вычислительных экспериментов согласуются с теоретическими оценками сходимости, основанными на спектральном радиусе матрицы итераций.

Ключевые слова. СЛАУ, метод Якоби, метод Гаусса–Зейделя, метод SOR, итерационные методы, сходимость, норма невязки, спектральный радиус, Wolfram Mathematica.

Системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) составляют основу численного решения широкого класса прикладных задач: дискретизации дифференциальных уравнений, задач теории упругости, электрических цепей, методов конечных элементов. При размерности системы порядка 10^3 и выше применение прямых методов (метод Гаусса, LU-разложение) нецелесообразно ввиду высокой вычислительной сложности и значительных требований к оперативной памяти. В таких случаях используются итерационные методы, которые строят последовательность приближений, сходящуюся к точному решению.

Теоретическим критерием сходимости стационарного линейного итерационного метода $x^{n+1} = Bx^{n} + c$ служит условие $\rho(B) < 1$, где $\rho(B)$ — спектральный радиус матрицы итераций. Скорость сходимости тем выше, чем меньше $\rho(B)$. Вместе с тем практическое сопоставление методов наглядно только при непосредственной визуализации итерационного процесса. Целью настоящей работы является реализация трёх классических итерационных методов в среде Wolfram Mathematica и визуальное сравнение динамики их сходимости.

Метод Якоби. На каждой итерации все компоненты вектора приближения пересчитываются одновременно на основе значений предыдущего шага. Матрица итераций $B_J = -D^{-1}(L+U)$, где D — диагональная часть матрицы A, L и U — строго нижняя и строго верхняя треугольные части. Метод сходится при выполнении условия строгого диагонального преобладания.

Метод Гаусса–Зейделя. При вычислении i-й компоненты немедленно используются уже обновлённые значения $x_1^{k+1},\ldots,x_{i-1}^{k+1}$. Матрица итераций $B_{GS} = -(D+L)^{-1}U$. Для симметричных положительно определённых матриц доказано соотношение $\rho(B_{GS}) = [\rho(B_J)]^2$, что обеспечивает примерно двукратное ускорение сходимости по сравнению с методом Якоби.

Метод SOR. Метод последовательной верхней релаксации обобщает метод Гаусса–Зейделя введением параметра $\omega \in (0, 2)$: обновлённое значение компоненты вычисляется как выпуклая комбинация старого значения и результата шага Гаусса–Зейделя. При $\omega = 1$ метод совпадает с Гаусса–Зейделем; при $\omega > 1$ происходит ускоряющая перерелаксация. Согласно теореме Кана, необходимым условием сходимости является $\omega \in (0, 2)$.

В качестве тестовой использовалась трёхдиагональная матрица $A \in \mathbb{R}^{20\times 20}$ с диагональными элементами 4 и внедиагональными −1. Данная матрица возникает при конечно-разностной аппроксимации одномерного уравнения Пуассона и обладает строгим диагональным преобладанием, что гарантирует сходимость всех трёх методов. Начальное приближение принималось нулевым; критерий остановки — $\|b - Ax^{n}\| < 10^{-6}$.

Каждый метод реализован в виде отдельной функции, возвращающей вектор приближения, список норм невязок по итерациям и итоговое число шагов. Ниже приведён код метода Якоби:

```
Jacobi[A_, b_, x0_, eps_:10^-6, max_:500] :=
  Module[{n=Length[b], x=N[x0], xNew, norms, k=0},
    norms = {Norm[b - A.x]};
    While[Last[norms] > eps && k < max,
      xNew = Table[(b[[i]] -
        Sum[If[j!=i, A[[i,j]] x[[j]], 0], {j,n}])/A[[i,i]], {i,n}];
      x=xNew; AppendTo[norms,Norm[b-A.x]]; k++]; {x,norms,k}]
```

Методы Гаусса–Зейделя и SOR реализованы аналогично. В методе SOR после вычисления шага Гаусса–Зейделя gs применяется коррекция: x[[i]] = (1−ω)·x[[i]] + ω·gs. Для построения сравнительных графиков использована функция ListLogPlot с наложением кривых для трёх методов.

На рисунке 1 представлены графики убывания нормы невязки $||r^{n1}|| = ||b - Ax^{n1}||$ в логарифмическом масштабе для всех трёх методов. Логарифмический масштаб позволяет непосредственно оценить скорость линейной сходимости: наклон кривой равен $\log_{10} \rho(B)$, где $\rho(B)$ — спектральный радиус матрицы итераций соответствующего метода.

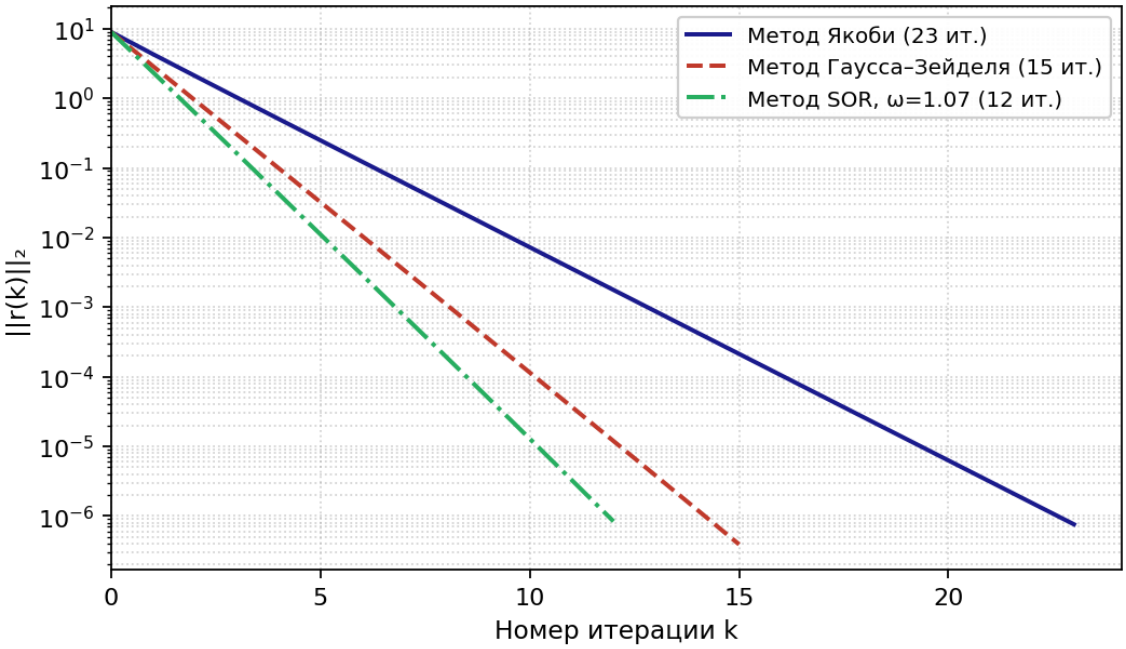


Рисунок 1 – Сходимость итерационных методов (логарифмическая шкала)

Результаты свидетельствуют о том, что метод Гаусса–Зейделя сходится примерно в 1.5 раза быстрее метода Якоби, что соответствует теоретическому соотношению $\rho(B_{GS}) \approx [\rho(B_J)]^2$. Метод SOR при $\omega = 1.07$ сходится за 12 итераций против 23 у метода Якоби. Количественное сравнение приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Число итераций до достижения точности 10^{-6}

Метод	Итераций	Ускорение
Якоби	23	—
Гаусс–Зейдель	15	×1.5
SOR (ω = 1.07)	12	×1.9

На рисунке 2 представлена зависимость числа итераций метода SOR от параметра ω. Кривая имеет характерную U-образную форму с минимумом при $\omega^* \approx 1.07$. При ω менее 0.8 метод фактически замедляется относительно Гаусса–Зейделя; при ω выше 1.9 число итераций резко возрастает, а при $\omega \geq 2$ метод теряет сходимость, что согласуется с теоремой Кана.

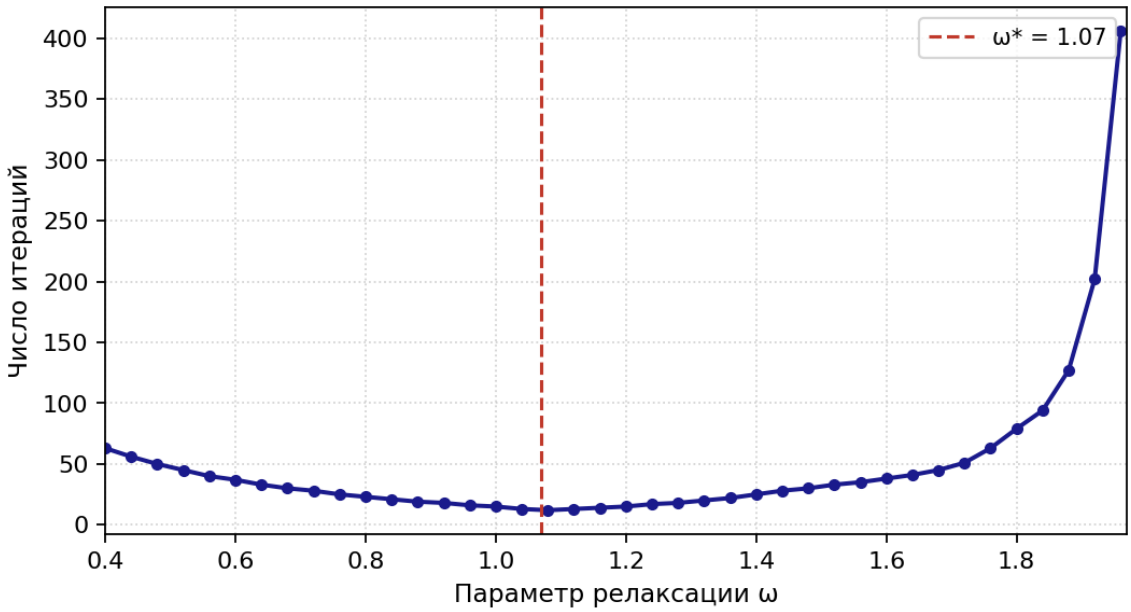


Рисунок 2 – Зависимость числа итераций метода SOR от параметра ω

В работе реализованы три итерационных метода решения СЛАУ — Якоби, Гаусса–Зейделя и SOR — в среде Wolfram Mathematica, проведено сравнение их скорости сходимости на тестовой трёхдиагональной системе. Визуализация в логарифмическом масштабе подтвердила теоретические оценки: метод Гаусса–Зейделя в 1.5 раза быстрее Якоби, метод SOR при оптимальном $\omega^* \approx 1.07$ — в 1.9 раза. Исследование зависимости числа итераций от ω показало характерный минимум и потерю сходимости при $\omega \geq 2$, что согласуется с теоремой Кана. Полученные результаты демонстрируют эффективность средств Wolfram Mathematica для визуального анализа итерационных алгоритмов и верификации теоретических оценок сходимости.

Список использованных источников:

1. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. — М. : Лаборатория Знаний, 2019. — 636 с.

2. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. — М. : Наука, 1978. — 592 с.

3. Young D. M. Iterative Solution of Large Linear Systems. — New York : Academic Press, 1971. — 570 p.

4. Saad Y. Iterative Methods for Sparse Linear Systems. — 2nd ed. — Philadelphia : SIAM, 2003. — 528 p.

5. Wolfram Research. Wolfram Language Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://reference.wolfram.com. — Дата доступа: 12.03.2025.

UDC 519.6:004.4

VISUALIZATION OF CONVERGENCE OF ITERATIVE METHODS FOR SOLVING SYSTEMS OF LINEAR EQUATIONS

Kondratova U. O., Bolbas K. V., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Stepanova T. S. –Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Keywords. SLAE, Jacobi method, Gauss–Seidel method, SOR, iterative methods, convergence, residual norm, spectral radius, Wolfram Mathematica.

Annotation. The paper presents a comparative analysis of three iterative methods for solving systems of linear algebraic equations — Jacobi, Gauss–Seidel and SOR — implemented in Wolfram Mathematica. Residual norm decay graphs are plotted on a logarithmic scale to assess convergence rates. The influence of the relaxation parameter ω on the efficiency of the SOR method is investigated. The experimental results are consistent with theoretical convergence estimates based on the spectral radius of the iteration matrix.

УДК [630*232.4+625.7]-042.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОПОЛОС ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Король А.В., Павлова М.Д., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л.В. – старший преподаватель

Аннотация. В данной научной работе рассматривается математическая модель замедления ветра в лесополосе на основе дифференциальных уравнений первого порядка. Получено аналитическое решение, описывающее экспоненциальный характер затухания скорости ветра. Модель модифицирована с учётом сезонной динамики плотности листвы и типа насаждений. На её основе создана программа на языке C++ для расчёта оптимальных параметров ветрозащиты.

Ключевые слова. Лесополосы, защита дорог, снежные заносы, песчаные заносы, скорость ветра, дифференциальные уравнения, математическое моделирование, экспоненциальное затухание, эффективность защиты, ветроустойчивость, лесоразведение, безопасность дорожного движения.

На автомобильных дорогах в любое время года должно обеспечиваться непрерывное и бесперебойное транспортное движение. По ПДД Республики Беларусь (Глава 27) обязанность обеспечивать непрерывное и бесперебойное движение возложена на должностных лиц и эксплуатационные службы [1].Требования к состоянию покрытия дороги строго нормированы. Согласно Государственным стандартам Республики Беларусь, размеры дефектов не должны превышать 5 см по глубине и 0,09 м² по площади; отклонение крышки люка от покрытия допускается не более 2 см [2].

При этом дороги подвержены воздействию неблагоприятных погодно-климатических условий. Экстремальными погодными условиями считаются: снегопад интенсивностью более 5 см/ч, продолжающийся более 6 часов; метель при скорости ветра более 9 м/с – в течение более 2 суток [2]. Снежные заносы, песчаные заносы и сильный ветер способствуют созданию дорожных происшествий, вызывают перебои в движении, что приводит к снижению скорости автомобилей, а это, в свою очередь, повышает стоимость перевозок. Решением проблем снегозаносимости могут служить посаженные вдоль автомагистралей лесополосы, так как они постепенно снижают скорость ветра и предотвращают нанесение снега или песка на дорогу.

Научное обоснование степному лесоразведению было дано российским ученым В. В. Докучаевым. В 1893 г. в Каменной степи были заложены первые лесные полосы, а спустя некоторое время создано Каменно-Степное опытное лесничество, где работали известные ученые, которые в том числе изучали защитную функцию придорожных лесополос [3].

Общую схему влияния леса на ветер с точки зрения физики процесса можно описать следующим образом. При подходе к лесу воздушный поток раздваивается: часть ускоряется вверх, часть проникает в лес, где скорость падает до 6-7% от исходной. В итоге на расстоянии около 60 м от опушки ветер ослабевает на 20-60% [4]. Эффективность защитной функции лесополос доказывается с математической точки зрения с помощью дифференциальных уравнений.

Рассмотрим, как ветер движется через лесополосу. Обозначим через ϑ скорость ветра на расстоянии S от начала леса. Ветер, встречая на своем пути лесной массив, резко снижает скорость вследствие соприкосновения и трения о кроны деревьев, стволы и другие растения, произрастающие в лесу. Физический закон, который мы используем, гласит: на бесконечно малом отрезке пути потеря скорости пропорциональна текущей скорости и длине этого отрезка [4]. Данное выражение можно записать в виде следующей формулы:

$$-d\vartheta = k\vartheta ds. \tag{1}$$

В представленном уравнении (1) потеря скорости представлена величиной $-d\vartheta$, это величина отрицательная, так как процесс убывающий; вводится дифференциал для обозначения бесконечно малой величины. Бесконечно малой величиной является и расстояние ds . Коэффициент k – коэффициент пропорциональности, ϑ – конечная скорость ветра после прохождения некоторого участка леса. Разделив исходное выражение на ϑ и домножив на -1 затем, проинтегрировав выражение и вычислив интеграл, применив свойство сложения степеней, получится следующее выражение:

$$\vartheta = e^{-ks}e^{C}. \tag{2}$$

При $s = 0$, то есть до момента вступления ветра в лес, формула приобретает следующий вид:

$$\vartheta = e^C = \vartheta_0. \quad (3)$$

Таким образом, если учесть начальное условие (3), закон физического процесса примет вид:

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-ks}, \quad (4)$$

где ϑ_0 – это начальная скорость ветра, s – пройденное в лесу расстояние, k – коэффициент пропорциональности, который показывает, какую долю от своей текущей скорости ветер теряет при прохождении одного метра лесополосы. Решение представляет собой экспоненциальную функцию затухания, что является характерным признаком процессов, где скорость изменения пропорциональна текущему значению величины.

В данном уравнении коэффициент пропорциональности k берется с усредненным значением, однако на практике он зависит и от времени года, ведь в разное время года объем листьев или иголок как защиты от ветра разный.

С физической точки зрения колебания в природе описываются с помощью периодических тригонометрических функций. Если необходимо не усредненное значение, а конкретное для данного сезона значение, то можно это представить в виде следующей функции:

$$k(t) = k_{\text{среднее}} + Asin\left(\frac{2\pi}{t} + \phi\right), \quad (5)$$

где *t* – время, T=12 месяцев – период, A – амплитуда сезонных колебаний, которая и является основным параметром для проведения данных вычислений, ϕ – фазовый сдвиг.

В сборнике задач Пономарева К.К. «Составление дифференциальных уравнений» в задаче требуется найти скорость ветра, прошедшего в лесу 150 м, если до вступления в лес начальная скорость ветра $\vartheta_0 = 12$ м/сек, а при прохождении 1 м стала $\vartheta_1 = 12$ м/сек. [5]. Путем нахождения коэффициента пропорциональности $k = 0{,}0168$, можно впоследствии с помощью формулы (4) найти и скорость ветра после прохождения 150 м: $\vartheta = 0{,}93$ м/сек. Данную математическую модель можно применить на практике для расчетов, связанных с проектированием и эффективностью лесополос. Так, например, можно еще до посадки лесополосы рассчитать будущую эффективность ее защиты. Это можно сделать с помощью формулы, которая показывает абсолютное изменение скорости ветра.

$$\eta = \frac{\vartheta_0 - \vartheta}{\vartheta_0} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где ϑ_0 – начальная скорость, ϑ – скорость ветра после прохождения леса, η – эффективность защиты лесополосы. В нашем примере эффективность лесополосы составляет: $\eta = 92\%$. Таким образом, может быть доказана эффективность защиты дороги с помощью лесополосы.

Также данная математическая модель может использоваться и для расчета необходимой ширины лесополосы. Так, например, если нужно получить снижение скорости ветра на 90%, тогда, используя основное уравнение, описывающее физический процесс, получим:

$$0{,}1 \cdot \vartheta_0 = \vartheta_0 \cdot e^{-ks}, \quad (7)$$

где ϑ_0 – начальная скорость, s – пройденное в лесу расстояние. И, выразив из уравнения (7) s, получится $s = 137$ м при ранее найденном *k*. Стоимость создания лесополосы пропорциональна её площади. Зная стоимость посадки 1 га и требуемую эффективность, можно рассчитать минимальные затраты на достижение цели.

Для рассмотрения зависимости леса от густоты леса и типа леса необходимо составить уравнение движения ветра в лесу. Ветер, проходя в лесу путь, равный единице длины, теряет n-ю часть своей скорости (n – параметр, постоянный для данного вида леса, например, для смешенного леса $n = 59$, а для очень редкого высокого леса $n = 125$). Как раз зависимость от данного n при движении ветра в лесу нам и нужно найти [6]. Пусть ϑ – скорость ветра, x – пройденный ветром путь, t – время движения ветра в лесу, тогда можно составить следующее уравнение.

$$\frac{d\vartheta}{dx} = -\frac{\vartheta}{n}. \quad (8)$$

Перенеся в одну сторону множители с ϑ, проинтегрировав выражение, выразив искомую скорость, учитывая, что $e^C = C_1$, получим:

$$\vartheta = C_1 e^{-\frac{x}{n}}. \quad (9)$$

Далее следует подстановка $x = 0: \vartheta = C_1 = \vartheta_0$, значит, если учесть, что $\vartheta = \frac{dx}{dt}$, при дальнейшем интегрировании получим:

$$ne^{\frac{x}{n}} = \vartheta_0 t + C. \quad (10)$$

В самом начале, когда ветер только зашел в лес, $t = 0$, путь $x = 0: n = C$. Подставив эти нули в формулу, разделив все на n и выразив x, уравнение движения ветра в лесу имеет вид:

$$x = n \ln\left(\frac{\vartheta_0 t}{n} + 1\right), \quad (11)$$

где x – координата ветра, n – параметр леса, ϑ_0 – начальная скорость ветра.

Уравнение (6) иллюстрирует влияние различных параметров леса на перемещение ветра в лесу и скорость ветра.

Данная математическая модель прогнозирует распространение лесных пожаров (глубину проникновения ветра и скорость огня), что помогает планировать тушение. Она также применяется в сельском хозяйстве для расчёта оптимальной ширины ветрозащитных лесополос и в лесном хозяйстве – для оценки ветровой нагрузки на деревья при ураганах.

Зависимость от параметра n для разных типов лесов можно проследить и с помощью программы которая автоматически, используя выведенное выражение установит различные параметры пройденного пути, времени и скорости, зависимость между величинами для различных типов лесов. Базовые функции, написанные на языке программирования C++, на основе которых и создавался весь код и велись расчеты, отражают два физических процесса, которые были выведены в работе ранее с помощью математических формул (4) и (11).

По результатам работы программы были построены три графика. График пути ветра от времени для разных типов леса (рисунок 1) показывает, что в густом лесу ветер за 60 с проходит 91 м, а в лесопарковой зоне – 278 м, что в 4,5 раза больше, подтверждая высокую защитную эффективность густых насаждений.

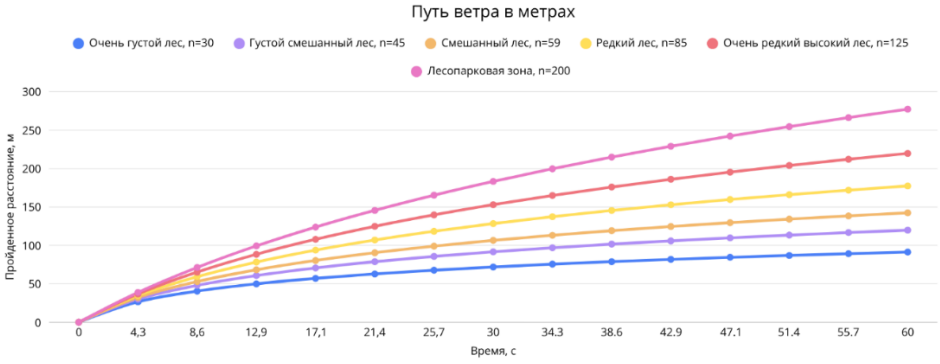


Рисунок 1 – Путь, пройденный ветром за разное время в разных типах леса

График скорости ветра на разных расстояниях (рисунок 2) показывает, что в густом лесу скорость ветра падает почти до нуля уже на 300 м, а в лесопарковой зоне сохраняется 3,68 м/с до 500 м, что в 5 раз дальше и доказывает высокую защитную эффективность густых насаждений.

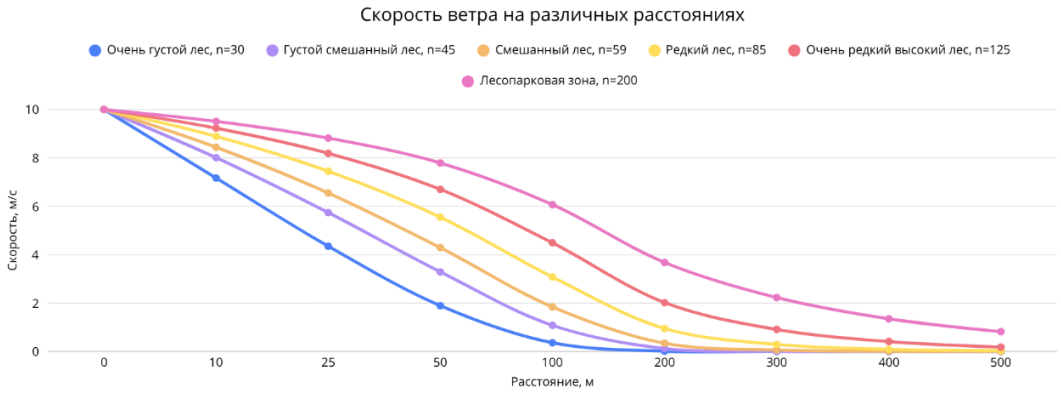


Рисунок 2 – Скорость ветра на разных расстояниях в разных типах леса

График достижения ветром заданных расстояний (рисунок 3) показывает, что расстояние 300 м ветер в очень густом лесу проходит за 10 000 с, а в редком – за менее, чем 500 с (в 20 раз быстрее), что подтверждает: густота леса – ключевой фактор скорости ветра.

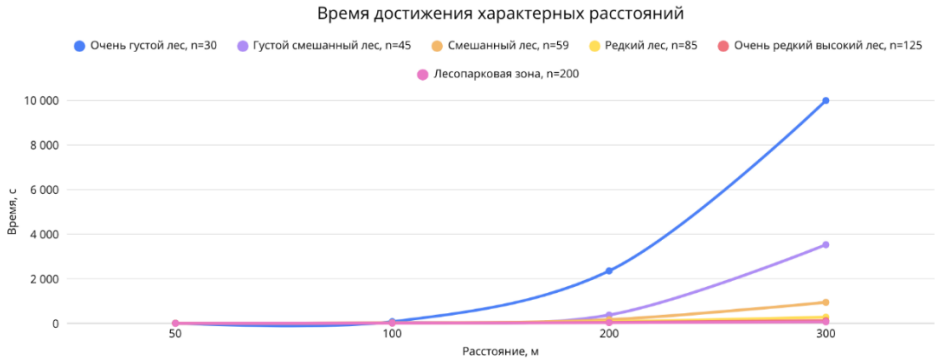


Рисунок 3 – Время, за которое ветер достигнет заданных расстояний в конкретных типах леса

Программа наглядно демонстрирует, следующие факты.

1 В густом лесу (маленькое n) ветер быстро теряет скорость и проходит меньшее расстояние
2 В редком лесу (большое n) ветер сохраняет скорость дольше и проходит большее расстояние
3 Зависимость носит логарифмический характер, что соответствует физике процесса

Таким образом, в результате исследования разработана математическая модель замедления ветра в лесополосе на основе дифференциальных уравнений первого порядка, аналитическое решение которой описывает экспоненциальное затухание скорости ветра и подтверждает высокую эффективность защиты дорожных магистралей. Модель адаптирована под сезонные изменения плотности листвы и тип насаждений через параметр густоты, а также реализована в виде программы на языке C++ для расчёта оптимальной ширины лесополос, прогноза ветровой нагрузки и времени распространения воздушного потока. Полученные результаты обосновывают экономическую целесообразность создания придорожных лесополос и могут быть использованы при проектировании защитных насаждений, прогнозировании лесных пожаров и обеспечении безопасности дорожного движения в степных и лесостепных регионах.

Список использованных источников:

1. Обязанности должностных и иных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения – 2025. – URL: https://pdd.by/pdd/ru/p27/ (дата доступа: 28.02.2026).

2. Государственные стандарты Республики Беларусь (СТБ) – 2025. – URL: https://oei.by/section?id=49 (дата доступа: 28.02.2026).

3. Защитные лесные полосы вдоль автомобильных дорог / Кулакова Е.Н., Штепа А.А., Чернодубов А.И. – 2018. – URL: https://naukaru.ru/ru/nauka/article/24801/view (дата доступа: 28.02.2026).

4. Лес и ветер: влияние леса на ветер – 2024.. – URL: http://www.woodtechnology.ru/drevesinovedenie/lesovedenie/les-i-veter-vliyanie-lesa-na-veter.html#google_vignette (дата доступа: 28.02.2026).

5. Составление дифференциальных уравнений / Пономарев К.К. – 1973. – URL: https://www.klex.ru/1zhx (дата доступа: 28.02.2026).

6. Изучение темы «Дифференциальные уравнения» со студентами географических специальностей / Кепчик Н.В., Матейко О.М. – 2015.– URL: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/123758/1/%D0%9A%2050.pdf (дата доступа: 28.02.2026).

UDC [630*232.4+625.7]-042.4

MATHEMATICAL MODELING OF THE EFFICIENCY OF FOREST BELT PROTECTION FOR TRANSPORT ROADS

Korol A.V., Pavlova M.D., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Lobanok L.V. – senior lecturer

Annotation. This research paper examines a mathematical model of wind deceleration in a forest belt based on first-order differential equations. An analytical solution is obtained that describes the exponential nature of wind speed decay. The model is modified to account for seasonal dynamics of foliage density and planting type. A C++ program for calculating optimal wind protection parameters is developed based on this model.

Keywords. Forest belts, road protection, snow drifts, sand drifts, wind speed, differential equations, mathematical modeling, exponential decay, protection efficiency, wind resistance, afforestation, road safety.

УДК 519.816:159.9.019.43

ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И ФУНКЦИИ ПОЛЕЗНОСТИ

Красикова О. В, Михед А. В. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л. В. – старший преподаватель

Аннотация. В данной работе рассматриваются основы теории принятия решений и функции полезности. Исследуется связь с математическим анализом через понятия производной, дифференциала, выпуклости и вогнутости функций, условий экстремума. Анализируются психологические факторы, влияющие на принятие решений: теория перспектив Канемана-Тверски, эффект фрейминга, неприятие потерь. Проводится эмпирическое исследование в форме опроса студентов БГУИР для выявления их отношения к риску и временным предпочтениям. Результаты опроса сопоставляются с теоретическими моделями, демонстрируя возможность описания психологических феноменов математическим языком.

Ключевые слова. Теория принятия решений, функция полезности, математический анализ, теория перспектив, неприятие потерь, коэффициент λ, гиперболическое дисконтирование, эффект фрейминга, взвешивающая функция вероятности, эмпирическое исследование, студенческая выборка.

Введение. Каждый день мы принимаем множество решений. Как мы делаем этот выбор, почему в похожих ситуациях разные люди поступают по-разному объясняет психологическая наука. Однако можно ли математически описать процесс принятия решений, предсказать его таким образом? Существует теория принятия решений, связывающая поведенческую психологию и математический анализ.

Центральным понятием этой теории является функция полезности − математическая функция, которая отражает предпочтения человека. Понятия производной (скорость изменения полезности), второй производной (ускорение изменения, выпуклость и вогнутость), нахождение максимума функции − все это позволяет описывать такие важные характеристики, как отношение человека к риску. Можно сказать, что математический анализ дает язык, на котором мы описываем измерение удовлетворения человека.

Также поведенческая экономика описывает нарушения классической рациональности математическими средствами. Теория перспектив Канемана и Тверски (1979 г.) предлагает нелинейную функцию полезности с изломом в нуле и взвешивающую функцию вероятности.

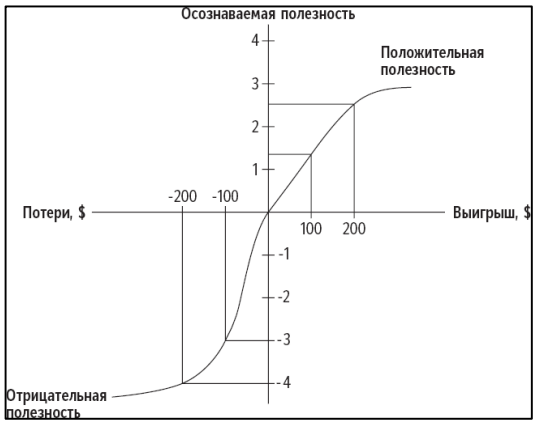


Рисунок 1 - Пример стандартной функции полезности Канемана-Тверски

Данная работа посвящена эмпирической проверке этих математических моделей на выборке студентов технического вуза.

Цель исследования − количественно оценить параметры математических моделей принятия решений: знак второй производной функции полезности в областях потерь и выигрышей, коэффициент неприятия потерь λ, соответствие экспоненциальной и гиперболической моделей дисконтирования, наличие эффекта фрейминга, степень искажения вероятностей.

Задачи:

– Изучить основные математические подходы к описанию принятия решений, опираясь на аппарат математического анализа;

– Рассмотреть психологические факторы, влияющие на выбор;

– Провести опрос среди студентов и проанализировать, насколько их решения соответствуют теоретическим моделям.

Основной текст. Классическая теория ожидаемой полезности предполагает линейность функции полезности или постоянный знак второй производной. Теория перспектив вводит кусочно-заданную функцию. Обычно мы рассматриваем ситуации, где x − количество денег или благ. Тогда U(x) − функция, которая показывает, как полезность зависит от количества.

$$U(x) = \begin{cases} x^{\alpha}, & x \geq 0 \\ -\lambda(-\mathrm{x})^{\beta}, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Математический анализ этой функции выявляет три главных свойства:

1. *Различная кривизна.* Для x > 0 вторая производная v''(x) = α (α-1) $x^{(\alpha-2)}$ < 0 (вогнутость). Для x < 0 v''(x) = - λβ (β-1) (-x) $^{(\beta-2)}$ > 0 (выпуклость).

2. Излом в нуле. Левосторонняя и правосторонняя производные не равны: v′(x) = $\alpha x^{\alpha-1} \to +\infty$ (справа), v′(x) = $\lambda\beta(-x)^{\beta-1} * (-1) \to -\infty$ (слева). Крутизна излома определяется коэффициентом λ.

3. Убывающая чувствительность к изменению поведения. При α, β < 1 предельная полезность убывает при удалении от нуля.

Теперь более подробно рассмотрим некоторые положения *теории перспектив*. Теория перспектив говорит, что люди в краткосрочном периоде менее терпеливы, чем в долгосрочном. Это отражено в гиперболической модели. Но существует также и экспоненциальная модель, которую опровергает теория перспектив.

Экспоненциальная модель: U(A) = $Ae^{(-rt)}$ (постоянная ставка дисконтирования). Человек обесценивает будущее с одной и той же скоростью всегда. Ему всё равно, ждать месяц или год − «скидка» на ожидание одинаковая.

Гиперболическая модель: U(A) = A / (1 + kT) (убывающая ставка). Человек очень нетерпелив в ближайшем будущем, но становится терпеливым в далеком будущем. Скорость обесценивания падает со временем.

Также из теории перспектив рассмотрим *эффект фрейминга*. Люди по-разному реагируют на одну и ту же ситуацию, если описать её в позитивных или негативных «тонах». Один из самых известных экспериментов Канемана и Тверски демонстрирует эффект фрейминга − это психологический феномен, который показывает, что форма подачи информации влияет на решение человека сильнее, чем сама информация. Математический анализ здесь показывает, как словесная формулировка меняет «систему координат» в голове, угол наклона нашей чувствительности и направление изгиба нашего отношения к риску. На свойствах функции полезности разница формулировок отразиться следующим образом:

1) Сдвинется точка отсчета. Формулировка задачи смещает «ноль» (точку отсчета), поэтому одни и те же объективные числа воспринимаются то как выигрыш, то как потеря;

2) Излом функции (первая производная): график для потерь круче, чем для выигрышей (коэффициент непринятия потерь λ>1. Разница формулировки “перебрасывает” нас через этот излом, меняя остроту реакции;

3) Сменится кривизна (вторая производная). Для выигрышей функция вогнута (избегание риска), для потерь − выпукла (стремление к риску). Фрейминг переносит задачу из одной области в другую, переключая тип поведения.

Существует формула МакНемара для зависимых (в нашем случае от формулировки) выборок. Она нередко применяется для оценивания эффекта фрейминга:

$$\mathrm{x}^2 = \frac{(\mathrm{b} - \mathrm{c})^2}{(\mathrm{b} + \mathrm{c})} \quad (2)$$

Коэффициент непринятия потерь − это параметр, отражающий степень асимметрии в восприятии индивидом потенциальных потерь и выигрышей, характерную для теории перспектив. Он показывает, во сколько раз психологическое воздействие (чувствительность) убытков превосходит воздействие эквивалентных по величине приобретений. Формульное выражение для расчета коэффициента λ в стандартной парадигме (при условии α=β для упрощения) выводится из соотношения полезностей и имеет вид:

$$\lambda = -\frac{U(-x)}{U(x)} \quad (3)$$

Существует ещё понятие *отношения людей к риску.* Отношение людей к риску определяется знаком второй производной функции ценности v(x) и формой функции весов вероятностей. Для выигрышей (x>0) функция вогнута ((x)<0). Полезность растет замедляющимся темпом.Для потерь (x<0) функция выпукла ((x)>0). Убытки ощущаются с ускоряющейся тяжестью.

Оценка вероятности. В теории перспектив люди используют не объективные вероятности p, а весовую функцию w(p). Одна из распространенных форм (для случая выигрышей):

$$W(p) = \frac{p^{\gamma}}{(p^{\gamma} + (1-p)^{\gamma})^{\frac{1}{\gamma}}} \quad (4),$$

где γ − параметр искажения (обычно 0 < γ < 1).

Свойства данной функции:

– Переоцениваются малые вероятности (w(p)>p для малых p);

– Недооцениваются средние и высокие вероятности (w(p)<pдля умеренных и высоких p);

– Чувствительность к изменениям падает по мере удаления от границ 0 и 1.

Дело в том, что люди плохо понимают вероятность как математическую величину. Шанс 1% выиграть «джекпот» кажется гораздо более весомым, чем он есть на самом деле. Отсюда и появляется желание играть в азартные игры. Шанс (условно) 99% на успех оставляет неприятный осадок страха перед (условно) 1% неудачи, заставляя человека перестраховываться.

Методика проведения исследования. Опрос студентов БГУИР решает следующие математические задачи: сначала определить знак v''(x) в областях потерь и выигрышей, далее вычислить коэффициент λ из уравнения безразличия, потом сравнить экспоненциальную и гиперболическую модели дисконтирования, проверить гипотезу об инвариантности (эффект фрейминга) формулой МакНемара и оценить нелинейность π(p) для малых вероятностей.

В ходе проведения эксперимента проведен анонимный опрос среди 60 студентов первого курса БГУИР. Респонденты ответили на 8 вопросов, моделирующих стандартные поведенческие задачи.

Проведение опроса и результаты. Выявляем отношение к риску и кривизну функции полезности. *Вопрос 1 (выигрыши). Что вы выберите? Получить гарантированно 1000 руб. или сыграть в лотерею: получить 2000 руб. или ничего с шансами 50\50?* Результат: гарантию выбрали 72%, лотерею − 28%. Математическое ожидание одинаково (1000 руб.). Присутствует преобладание гарантии доказывает вогнутость функции в области выигрышей: v''(x) < 0 для x > 0.

Вопрос 2 (потери). Что вы выберите? Потерять 500 руб. Или сыграть в лотерею: потеря 1000 руб. или не потерять ничего с шансами 50/50? Результат: гарантию выбрали 23%, лотерею − 77%. Преобладает риск, что доказывает выпуклость функции в области потерь: v''(x) > 0 для x < 0.

Узнаем коэффициент неприятия потерь. *Вопрос 3. При какой минимальной сумме X вы согласны играть в игру с 50% выигрыша X и 50% проигрыша 500 руб.?* Среднее арифметическое всех полученных ответов: X = 1250 руб. Составляем уравнение безразличия: 0.5 * v(1250) + 0.5 * v(-500) = 0. Подставляя степенную форму и полагая α = β ≈ 0,88 (коэффициент 0,88 − это константное значение параметра чувствительности (α и β) в степенной функции ценности Канемана и Тверски), получаем: λ = (1250/500)0,88 = 2,50,88 ≈ 2,25. Коэффициент неприятия потерь λ ≈ 2.25. Потеря 500 руб. ощущается в 2.25 раза сильнее выигрыша 500 руб.

Теперь определим временные предпочтения. *Вопрос 4. Что бы вы выбрали? Получить 500 руб. сегодня или 550 руб. через месяц?* Результат: сегодня − 44%, через месяц − 56%.

Вопрос 5. Что бы вы выбрали? Получить 500 руб. через год или 550 руб. через год и месяц? Результат: через год − 22%, через год и месяц − 78%. Интервал ожидания одинаков (месяц), добавка одинакова (50 руб.). При экспоненциальном дисконтировании доли должны совпадать. Наблюдаемое различие (44% против 22%) доказывает гиперболический характер дисконтирования: ставка убывает со временем.

Далее проверим эффект фрейминга. *Вопрос 6. Представьте, что вы потеряли 500 руб. по дороге в кино. Купите ли билет за 500 руб.?* Результат: да − 23%, нет − 77%.

Вопрос 7. Представьте, что вы потеряли купленный билет за 500 руб. Купите ли новый? Результат: да − 30%, нет − 70%. Итоговая ситуация идентична: минус 500 руб. и отсутствие билета. Применяем критерий МакНемара для зависимых выборок:

$\chi^2 = (b - c)^2 / (b + c)$;

$x^2 = (23\text{-}30)^2/(23+30) = 49/53 \approx 0,04$.

Разница между 23% и 30% пренебрежимо мала (p < 0,05). Эффект фрейминга не подтвержден. Классическая инвариантность выполняется.

Следующим шагом идёт оценка вероятностей. *Вопрос 8. Приз 10000 руб., вероятность 1%. Сколько готовы заплатить за билет?* Средний ответ: 250 руб. Математическое ожидание: 100 руб. Отношение субъективной цены к объективной: 250/100 = 2,5. Это прямое свидетельство переоценки малых вероятностей: π(0,01) > 0,01. Нелинейность весовой функции подтверждается.

Результаты исследования говорят о следующем:

1) Кривизна функции полезности. Подтверждена вогнутость в области выигрышей (v''<0) и выпуклость в области потерь (v''>0). Функция имеет разный знак второй производной по разные стороны от нуля;

2) Коэффициент неприятия потерь λ = 2.25. Потери субъективно значимее выигрышей в 2.25 раза. Полученное значение совпадает с классическими данными Канемана и Тверски;

3) С точки зрения временного дисконтирования, гиперболическая модель описывает выбор лучше экспоненциальной. Доля терпеливых растет с удалением временной точки от настоящего момента;

4) Подтверждения эффекта фрейминга в проведённом исследовании не обнаружено. Студенты технического вуза безразличны к формулировке. Классическая математическая модель инвариантности здесь работает.

По оценке вероятностей, малые (1%) переоцениваются в 2,5 раза относительно математического ожидания. Поэтому весовая функция π(p) оказалась нелинейна.

Проанализируем математически полученные данные:

1. Функция полезности студентов БГУИР имеет разрыв первой производной в нуле с отношением крутизны λ = 2.25.

2. Ставка дисконтирования убывает во времени, что отвергает экспоненциальную модель в пользу гиперболической.

3. Преобразование объективных вероятностей в субъективные нелинейно: π(0,01) ≈ 0,06 (в 6 раз выше объективной).

4. Принцип инвариантности в нашем случае выполняется: выбор не зависит от способа описания задачи.

Заключение. Математические модели теории перспектив получили количественное подтверждение на студенческой выборке. Исключение составил эффект фрейминга, что может объясняться спецификой выборки (студенты технического вуза). Полученные параметры (α ≈ 0,88, λ ≈ 2,25, гиперболическое дисконтирование) могут использоваться для прогнозирования решений в аналогичных группах.

Математика в теории перспектив выступает не просто инструментом описания, но языком, на котором формулируются базовые закономерности поведения. Поведенческие эффекты сводятся к свойствам функций − их кривизне, точкам разрыва производной, нелинейности преобразования аргументов.

Список использованных источников:

1. Канеман, Д., Тверски, А. Теория перспектив: анализ принятия решений в условиях риска // Econometrica. – 1979. – Т. 47. – № 2. – С. 263–292.

2. Канеман, Д. Думай медленно… решай быстро. – М.: АСТ, 2014. – 653 с.

3. Тверски, А., Канеман, Д. Выбор, ценности и фреймы // Психологический журнал. – 2003. – Т. 24. – № 4. – С. 31–45.

4. Чернов, С. С. Теория принятия решений: учебное пособие. – М.: КНОРУС, 2019. – 256 с. (PDF).

5. Орлов, А. И. Теория принятия решений. – М.: Экзамен, 2006. – 573 с. (PDF).

6. Кузнецов, Ю. Н. Математические методы в экономике: учебное пособие. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 304 с. (PDF).

7. Ширяев, А. Н. Вероятность: учебник для вузов. – М.: МЦНМО, 2007. – 960 с. (PDF).

8. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей. – М.: УРСС, 2012. – 448 с. (PDF).

9. Ильин, Е. П. Психология риска. – СПб.: Питер, 2012. – 288 с. (PDF).

10. Зубарев, Н. В. Поведенческая экономика и принятие решений // Вестник МГУ. Серия 6: Экономика. – 2020. – № 3. – С. 45–62. (PDF).

11. Сидоренко, Е. В. Методы математической обработки в психологии. – СПб.: Речь, 2007. – 350 с. (PDF).

12. Thaler R. Toward a Positive Theory of Consumer Choice // Journal of Economic Behavior & Organization. – 1980. – Т. 1. – № 1. – С. 39–60.

13. Laibson D. Golden Eggs and Hyperbolic Discounting // Quarterly Journal of Economics. – 1997. – Т. 112. – № 2. – С. 443–478.

14. Поведенческие аспекты теории принятия решений // https://cyberleninka.ru/article/n/povedencheskie-aspekty-prinyatiya-resheniy. Электронный ресурс. (дата обращения: 17.03.2026).

UDC 519.816:159.9.019.43

DECISION THEORY, UTILITY FUNCTION, MATHEMATICAL ANALYSIS, PSYCHOLOGICAL ASPECTS AND EMPIRE RESEARCH

Krasikova O. V.; Mikhed A. V. students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Lobanok L. V. – PhD in Mathematics

Annotation. This paper examines the fundamentals of decision theory and utility functions. The connection with mathematical analysis is explored through the concepts of derivatives, differentials, convexity and concavity of functions, and extremum conditions. Psychological factors influencing decision making are analyzed, including Kahneman-Tversky prospect theory, the framing effect, and loss aversion. An empirical study is conducted, surveying BSUIR students to determine their attitudes toward risk and time preferences. The survey results are compared with theoretical models, demonstrating the possibility of describing psychological phenomena mathematically.

УДК 374.463:658.780

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА И СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАДАЧ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ЛОГИСТИКИ

Кудан Т.А., Манько А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Малышева О.Н. – канд. физ.-мат. наук

Аннотация. В работе предложен интегративный подход к автоматизации распределения грузов в мультимодальной логистике. Проблема неэффективной обработки заявок на естественном языке решается путем объединения методов семантического анализа и теории оптимального транспорта. Описана методология построения многофакторной матрицы стоимости, учитывающей географические, семантические и физические ограничения. Жизнеспособность подхода продемонстрирована на программном прототипе, протестированном на смоделированном наборе данных из 30 заявок и 15 транспортных средств. Результаты показывают, что предложенный метод позволяет на 92.6% снизить общую стоимость распределения грузов по сравнению с базовой моделью, учитывающей только расстояние.

Ключевые слова. Оптимальный транспорт, семантический анализ, мультимодальная логистика, обработка естественного языка, TF-IDF, алгоритм Синкхорна, задача распределения, функция стоимости.

Основная часть. На фоне стремительного роста электронной коммерции логистические системы всё чаще не справляются с эффективной обработкой заявок. Проблема в том, что клиенты часто оставляют требования в виде обычного текста, который выходит за рамки стандартных параметров (веса, объема, расстояния). Обычные алгоритмы не способны распознать специфичные условия: например, «хрупкий антиквариат» или «токсичные вещества, везти отдельно от продуктов». Из-за этого заявки приходится обрабатывать вручную, что замедляет работу и ведет к ошибкам [1].

В основе этой проблемы лежит «семантический разрыв» – неспособность компьютера понимать человеческую речь. В данном исследовании предлагается подход, объединяющий семантический анализ текста и теорию оптимального транспорта (ОТ). Цель работы: создать автоматизированную систему, которая сможет извлекать требования из неструктурированного текста и на их основе строить оптимальный план распределения грузов.

Для векторизации текстовых заявок в прототипе применен вычислительно эффективный подход: алгоритм TF-IDF (выделение ключевых терминов) с последующим понижением размерности методом сингулярного разложения (SVD) [2]. SVD преобразует разреженные данные в плотные семантические эмбеддинги, где смысловая близость текстов отражается расстоянием между векторами. Для промышленных задач данный базовый модуль легко масштабируется путем замены на архитектуру Transformer (например, BERT), обеспечивающую глубокий учет контекста [3].

Теория оптимального транспорта (ОТ) предоставляет математический аппарат для нахождения наиболее экономного способа преобразования одного распределения масс в другое [4]. В нашей задаче множество заявок на перевозку рассматривается как исходное распределение масс μ, а доступный парк ТС – как целевое распределение ν. Задача Канторовича формулируется следующим образом:

$$\min_{\pi \in \Pi(\mu,\nu)} \sum_{i,j} C_{ij}\pi_{ij}\,, \tag{1}$$

где $\Pi(\mu,\nu)$ – множество всех допустимых планов транспортировки, C_{ij} – стоимость перемещения единицы груза из заявки i транспортом j, а π_{ij} – искомый объем перевозки.

Прямое решение задачи (1) вычислительно затратно. Поэтому мы применяем энтропийную регуляризацию, которая позволяет использовать быстрый итерационный алгоритм Синкхорна [5]. Регуляризованная задача имеет вид:

$$W_\epsilon(\mu,\nu) = \min_{\pi \in \Pi(\mu,\nu)} \left(\sum_{i,j} C_{ij}\,\pi_{ij} + \epsilon \sum_{i,j} \pi_{ij}\big(\ln \pi_{ij} - 1\big) \right), \tag{2}$$

где $\epsilon > 0$ – параметр регуляризации. Малые значения ϵ приводят к более детерминированным («жестким») назначениям, близким к решению исходной задачи.

Ключевым элементом нашего подхода является построение комплексной многофакторной матрицы стоимости C, где каждый элемент C_{ij} отражает пригодность транспортного средства j для выполнения заявки i. Общая стоимость вычисляется как взвешенная сумма трех компонентов:

$$C_{ij} = \alpha \cdot C_{\text{geo}}(i,j) + \beta \cdot C_{\text{sem}}(i,j) + \gamma \cdot P_{\text{hard}}(i,j), \tag{3}$$

Эти три компонента включают в себя:

– Географический компонент C_{geo} – нормализованное расстояние или время в пути.

– Семантический компонент C_{sem} – косинусное расстояние между эмбеддингами текстов заявки и ТС. Рассчитывается как:

$$C_{\text{sem}}(i,j) = 1 - \frac{e_i \cdot v_j}{|e_i||v_j|}, \tag{4}$$

где e_i и v_j – векторные представления текстов.

– Компонент жестких ограничений P_{hard} – штраф за нарушение физических ограничений (превышение грузоподъемности или объема).

$$P_{\text{hard}}(i,j) = \begin{cases} 0, \text{ "если ограничения соблюдены"} \\ \infty, \text{ "иначе"} \end{cases} \tag{5}$$

Для апробации метода был разработан программный прототип на языке Python.

Для тестирования прототипа был сгенерирован синтетический набор данных, состоящий из 30 заявок и 15 транспортных средств с разнообразными текстовыми описаниями.

Процесс работы прототипа, отраженный в консольном выводе, состоял из нескольких этапов:

– Этап 1: генерация данных. Были созданы заявки различного типа: от перевозки «антиквариата» и «сжатых газов в баллонах» до «пестицидов и агрохимикатов». Парк ТС включал «цистерны химические», «рефрижераторные полуприцепы» и «тентованные грузовики с гидробортом».

– Этап 2: семантическая векторизация. Корпус из 45 текстовых описаний (30 заявок + 15 ТС) был преобразован в матрицу TF-IDF размерностью (45, 2160). С помощью SVD размерность была снижена до 32, при этом удалось сохранить 98.8% дисперсии исходных данных.

– Этап 3: построение матрицы стоимости. На основе формулы (3) с весовыми коэффициентами $\alpha = 0.3, \beta = 0.5, \gamma = 0.2$ была построена матрица стоимости C размером 30×15. Процесс занял 11.8 мс. Было выявлено 19 физически недопустимых пар (заявка, ТС).

– Этап 4: решение задачи ОТ. С помощью алгоритма Синкхорна с параметром регуляризации $\epsilon = 0.05$ был найден оптимальный транспортный план. Алгоритм достиг сходимости за 21 итерацию, что заняло всего 4.4 мс, продемонстрировав высокую вычислительную эффективность.

Анализ оптимального плана подтвердил эффективность модели на качественном и количественном уровнях. Качественно система успешно преодолевает «семантический разрыв», формируя логичные пары: например, «сжатые газы» направляются на газовоз (S005 → V007), скоропортящиеся товары (цветы и продукты) – в рефрижераторы (S006 → V011, S023 → V009), а металлопрокат – на платформу (S029 → V004). Количественная оценка показала, что комплексная стоимость распределения составила 0.3408 у.е., тогда как базовый расчет (только по географии) достигал 4.6210 у.е. Таким образом, учет семантических факторов позволил оптимизировать план на 92,6%.

Для наглядной демонстрации преодоления «семантического разрыва» на рисунке 1 представлены векторные представления заявок и ТС в 2D-пространстве (первые две главные компоненты SVD) до и после оптимизации.

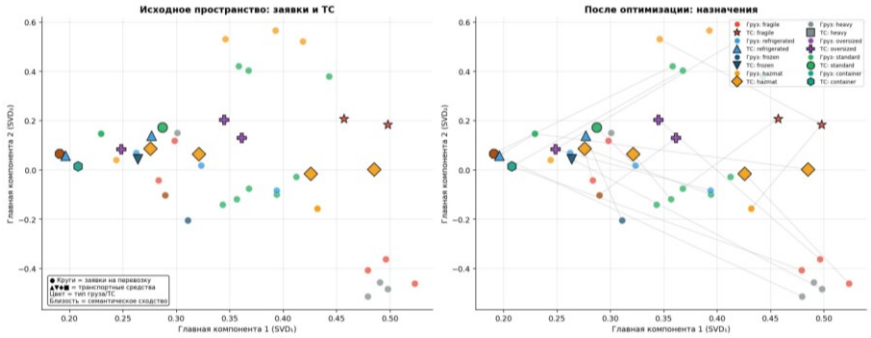


Рисунок 1 – Векторные представления заявок и ТС в 2D-пространстве: исходное состояние и результаты назначений

На рисунке 2 представлен визуальный анализ семантической составляющей.

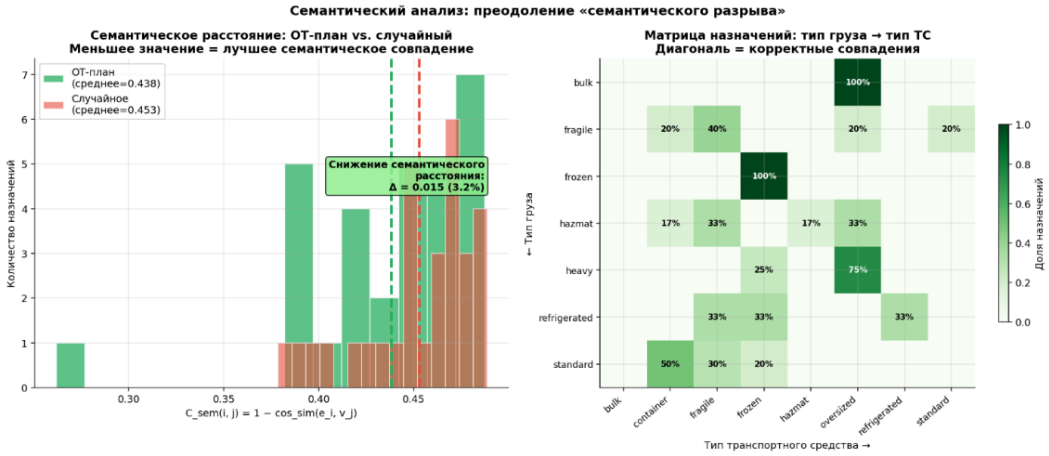


Рисунок 2 – Анализ семантической составляющей: а) гистограмма семантических расстояний для ОТ-плана и случайных назначений; б) матрица соответствия типов грузов и ТС

Гистограмма (рис. 1а) показывает, что среднее семантическое расстояние для пар, найденных алгоритмом, на 3.2% ниже (лучше), чем для случайных назначений. Матрица соответствия (рис. 1б) демонстрирует, что система формирует логичные пары: 100% грузов типа «frozen» были назначены на транспорт «refrigerated», а грузы «heavy» с высокой вероятностью (75%) назначались на транспорт «oversized».

На рисунке 3 показана декомпозиция итоговой матрицы стоимости.

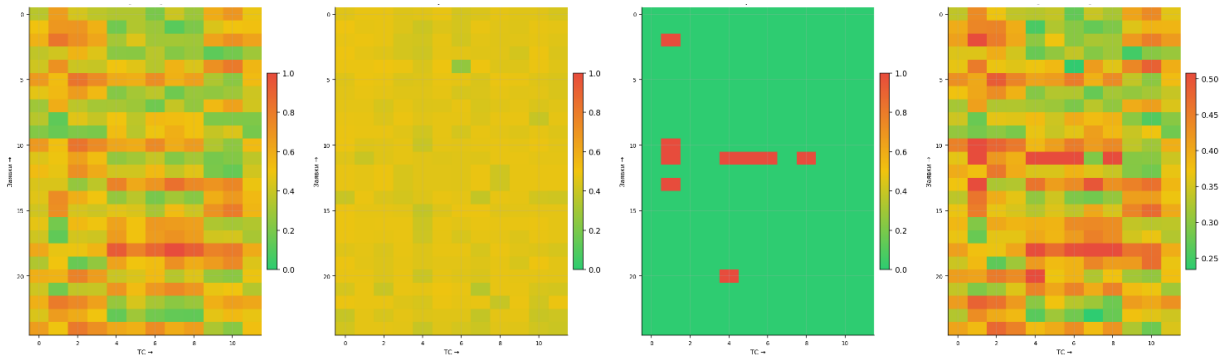


Рисунок 3 – Визуализация компонентов матрицы стоимости: а) географический; б) семантический; в) штрафы; г) итоговая стоимость

Визуализация (рис. 3) наглядно демонстрирует, как итоговая стоимость (г) формируется из географического (а), семантического (б) и штрафного (в) компонентов. Зеленый цвет соответствует низкой стоимости (хорошее совпадение), красный – высокой.

Заключение. Интеграция семантического анализа и теории оптимального транспорта успешно валидирована на модельных данных. Прототип способен автоматически извлекать требования из текста, формировать семантически корректные пары «груз-транспорт» и вычислять глобально оптимальный план распределения в режиме реального времени. Внедрение метода позволит снизить операционные издержки логистических систем. Дальнейшие исследования будут направлены на апробацию алгоритмов на реальных промышленных выборках и переход на современные нейросетевые NLP-модели.

Список использованных источников:

1. Deri, L. Logistics management challenges in the era of e-commerce / L. Deri, A. Török // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 55. – P. 1533–1540.

2. Manning, C.D. Introduction to Information Retrieval / C.D. Manning, P. Raghavan, H. Schütze. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 496 p.

3. Devlin, J. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin, M.W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. – Minneapolis, 2019. – P. 4171–4186.

4. Villani, C. Optimal Transport: Old and New / C. Villani. – Berlin: Springer, 2009. – 973 p.

5. Cuturi, M. Sinkhorn Distances: Lightspeed Computation of Optimal Transport / M. Cuturi // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2013. – Vol. 26. – P. 2292–2300.

UDC 374.463:658.780

APPLICATION OF OPTIMAL TRANSPORT THEORY AND SEMANTIC TEXT ANALYSIS FOR OPTIMIZING MULTIMODAL LOGISTICS TASKS

Kudan T.A., Manko A.A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Malysheva O.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. The paper proposes an integrative approach to automating cargo distribution in multimodal logistics. The problem of inefficient processing of natural language requests is solved by combining semantic analysis methods and optimal transport theory. A methodology for constructing a multifactor cost matrix considering geographical, semantic, and physical constraints is described. The viability of the approach is demonstrated on a software prototype tested on a simulated dataset of 30 requests and 15 vehicles. The results show that the proposed method reduces the total cost of cargo distribution by 92.6% compared to the baseline model that considers only distance.

Keywords. Optimal transport, semantic analysis, multimodal logistics, natural language processing, TF-IDF, Sinkhorn algorithm, distribution problem, cost function.

УДК 519.6:616-073.756.8

ЭВОЛЮЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И ПОСТОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Медюха А.Е., Левоненко Ю.И., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Воронкова Е.В. – старший преподаватель

Аннотация. Рассматривается эволюция численных методов обработки данных в компьютерной томографии (КТ) – от первичной реконструкции изображений до этапов постобработки. Описывается математический аппарат преобразования Радона и принципы работы фильтрованной обратной проекции (ФОП). Особое внимание уделяется современным итеративным алгоритмам (*ART*, *SART*, МИР), позволяющим снизить лучевую нагрузку на пациента. Анализируется роль сплайнов в построении точных 3*D*-моделей анатомических структур. Показано, что развитие КТ неразрывно связано с совершенствованием вычислительной математики.

Ключевые слова. Компьютерная томография, численные методы, итеративные методы, преобразование Радона, реконструкция изображений, фильтрованная обратная проекция, итеративные алгоритмы, ART, SART, сплайны.

Современная лучевая диагностика достигла невероятных высот, и компьютерная томография (далее КТ) по праву занимает в ней одно из центральных мест. Однако за каждым диагностическим снимком, на котором врач видит малейшие анатомические детали, стоит не столько работа комплексного аппаратного комплекса, сколько сложнейшая математическая обработка сырых измерений.

В отличие от обычной фотографии, КТ-изображение не получается напрямую. Аппарат измеряет не картинку, а данные об ослаблении рентгеновского излучения при прохождении через тело под разными углами – проекции. Преобразовать этот набор одномерных проекций в детализированное двумерное сечение или трехмерную модель – это классическая обратная математическая задача.

В статье будет прослежена эволюция численных методов, применяемых в КТ. Работа сфокусирована на двух фундаментальных этапах обработки данных:

1. Методы первичной реконструкции: как создать изображение из проекционных данных (от фильтрованной обратной проекции до алгоритмов глубокого обучения).
2. Методы постобработки и анализа: как улучшить, измерить и смоделировать данные на основе полученного изображения, с особым вниманием к роли сплайнов в построении точных 3*D*-моделей.

Компьютерная томография – это высокотехнологичный метод диагностики. Если обычный рентгеновский аппарат дает одно статичное изображение, то КТ позволяет «заглянуть внутрь» тела. КТ-сканер (его вращающаяся часть – гентри) непрерывно вращается вокруг неподвижного пациента. За один оборот система делает не один, а сотни отдельных замеров. Каждый такой замер – это проекция, одномерный слепок того, как ткани ослабили рентгеновские лучи в конкретный момент под конкретным углом. Именно этот массив проекций с разных углов и составляет сырье для детализированного объемного изображения.

Процесс КТ-исследования можно представить как конвейер преобразования данных. Первичным продуктом сканирования являются входные данные – сырая синограмма, то есть первичный необработанный цифровой результат измерений компьютерного томографа, представляющий собой огромный массив чисел. Каждое число соответствует показанию одного детектора в определенный момент времени, под определенным углом. Преобразования массива чисел в набор поперечных срезов тела заданной толщины (томограмм) или объемную модель называется реконструкцией изображения, и возможно оно только благодаря применению сложных численных методов.

В основе получения каждой проекции в КТ лежит фундаментальный физический закон – закон ослабления рентгеновского излучения (закон Ламберта-Бера):

$$I = I_0 \cdot e^{(-\mu \cdot L)}, \tag{1}$$

где I_0 – исходная интенсивность луча, испускаемого трубок, I – интенсивность луча, зарегистрированная детектором, μ – линейный коэффициент ослабления вещества, L – толщина пройденного слоя вещества.

На практике тело неоднородно. Поэтому луч проходит через множество тканей с разными линейными коэффициентами ослабления вещества μ. В этом случае ослабление описывается линейным интегралом коэффициентов ослабления вдоль пути луча s, то есть их суммой:

$$p = ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int \mu(x,y)ds. \quad (2)$$

Здесь p – это и есть значение одной проекции для конкретного луча. Детектор измеряет I, компьютер вычисляет p. Совокупность таких значений p для всех лучей в одном положении гентри образует одну проекцию.

Синограмма – это фундаментальная форма представления всех проекционных данных, полученных за полный оборот сканера. Ее можно представить как двумерную матрицу, где по горизонтальной оси (r) отложена координата луча на линейке детекторов. Каждый столбец соответствует одному детекторному элементу. А по вертикальной оси (θ) – отложен угол поворота системы «трубка-детектор». Каждая строка соответствует одной проекции, снятой под определенным углом θ в диапазоне от 0° до 360° [1].

Визуализация реальной синограммы часто дает удивительно упорядоченную картину, напоминающую набор переплетающихся волн или синусоид. При вращении сканера проекция этой точки будет перемещаться по линейке детекторов r. Ее траектория описывается уравнением:

$$r = x \cdot cos\theta + y \cdot sin\theta, \quad (3)$$

где (x, y) – фиксированные координаты точки в объекте.

Формально процесс получения проекции описывается преобразованием Радона. Это математический оператор, который для функции $f(x,y)$, а в нашем случае для распределения коэффициента ослабления $\mu(x,y)$, вычисляет ее линейные интегралы вдоль всех возможных прямых линий. Формула преобразования Радона имеет следующий вид:

$$p(r,\theta) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\ \delta(xcos\theta + ysin\theta - r)\ dxdy, \quad (4)$$

где $p(r,\theta)$ – проекция (синограмма), результат измерений, $f(x,y)$ – искомая функция (изображение, которые мы хотим восстановить), $\delta(...)$ – дельта-функция Дирака. Ее ключевое свойство таково, что она «выбирает» для интегрирования только те точки (x, y), которые лежат ровно на прямой линии, заданной уравнением (3). Это математическая запись идеи «интеграла вдоль луча» [2].

Таким образом, работа КТ-сканера – это прямое преобразование Радона изображения в синограмму. Задача реконструкции КТ – это решение обратной задачи. Имея измеренную синограмму $p(r,\theta)$, найти исходную функцию $f(x,y)$.

Первым и до сих пор важнейшим методом, который дал точное аналитическое решение этой задачи, стала фильтрованная обратная проекция (далее ФОП). Его эффективность основана на связи между преобразованиями Радона и Фурье – теорема о центральном сечении. Она гласит, что одномерное преобразование Фурье проекции, полученной под углом θ, в точности равно сечению через центр двумерного преобразования Фурье исходного изображения, взятому под тем же углом θ. Математически имеет вид:

$$F_1\{p(r,\theta)\}(\omega) = F_2\{f(x,y)\}(\omega cos\theta, \omega sin\theta). \quad (5)$$

Метод ФОП состоит из двух этапов. В первом этапе выполняется фильтрация проекций. Для всех проекций вычисляются 1*D* Фурье-образы:

$$P(\omega,\theta) = F_1\{p(r,\theta)\}. \quad (6)$$

Полученные образы размещаются как радиальные линии в частотной плоскости, заполняя 2*D* Фурье-спектр искомого изображения $F(u,v)$. Затем остается вычислить обратное 2*D* преобразование Фурье для получения самого изображения [3].

Простая обратная проекция заключается в проецировании назад каждой измеренной проекции равномерно вдоль линии луча через все пиксели изображения. Повторив это для всех углов и сложив результаты, мы получим реконструкцию, однако изображение будет размытым.

Если представить 2D-пространство Фурье (частотная область), то данные от проекции под разными углами заполняют его в виде набора срезов, проходящих через центр. Плотность заполнения обратно пропорциональна расстоянию от центра $|\omega|$. В окрестности центра (низкие частоты) данные «упакованы» плотно, а на периферии (высокие частоты) – редко. Чтобы скомпенсировать это размытие,

перед обратным проецированием каждая проекция должна быть умножена на $|\omega|$. Этот множитель называется рам-фильтром (*ramp filter*). Он линейно усиливает высокие частоты, компенсируя их недостаток. При умножении проекций на рам-фильтр происходит фильтрация проекций:

$$Q(\omega, \theta) = P(\omega, \theta) \cdot |\omega|. \tag{7}$$

Далее выполняется обратное 2*D* Фурье-преобразование:

$$q(r, \theta) = F_1^{-1}\{Q(\omega, \theta)\} \tag{8}$$

На втором этапе происходит обратное проецирование всех отфильтрованных проекций. Для этого каждую отфильтрованную проекцию $q(r, \theta)$ нужно спроецировать обратно вдоль ее исходных лучей, после этого проинтегрировать результаты по всем углам θ от 0 до π:

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} q(xcos\theta + ysin\theta, \theta)d\theta. \tag{9}$$

Главным достоинством ФОП была и остается исключительная вычислительная скорость, что обеспечило ей статус клинического стандарта на десятилетие. Однако этот метод обладает существенными недостатками: рам-фильтр усиливает высокочастотный шум, алгоритм требует полного набора проекций, то есть необходима высокая доза облучения, часто порождаются характерные артефакты.

Данные недостатки привели к возвращению и развитию итеративных методов реконструкции, которые с 2000-ых годов стали новым клиническим стандартом.

Первым поколением итеративных методов реконструкции являются методы алгебраической реконструкции *ART*, в частости метод реконструкции с одновременными итерациями *SART*.

Эти методы напрямую исходят из постановки задачи как системы линейных уравнений:

$$Ax = b, \tag{10}$$

где $A = (a_{ij})$ – проекционная матрица, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор изображения, $b = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ – вектор проекций.

Метод алгебраической реконструкции демонстрирует базовую идею пошаговой коррекции:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda^{(k)} \frac{b_i - \langle a_i, x^{(k)} \rangle}{\|a_i\|^2} a_i. \tag{11}$$

На каждой итерации для *i*-того луча вычисляется разность между измеренной проекцией (b_i) и проекцией, которую бы дало текущее изображение ($\langle a_i, x^{(k)} \rangle$). Вычисленная разность – проекционная ошибка, которая взвешенно распределяется обратно по пикселям, через которые проходит луч, обновляя изображение. Процесс реконструкции представляет собой последовательное уточнение решения.

Однако классический *ART* очень чувствителен к шуму и имеет медленную сходимость, так как корректирует изображение по одному лучу за итерацию. Его модификация – *SART* (метод одновременной алгебраической реконструкции) отличается тем, что одновременно корректируются все лучи, которые попадают на текущую проекцию. Математически он выражается формулой:

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + \lambda \frac{\sum_{p_i \in P_\phi} (p_i - \sum_{l=1}^{N} a_{il} x_l^{(k-1)})}{\sum_{p_i \in P_\phi} a_{il}}. \tag{12}$$

Для всех лучей, соответствующих проекции под углом ф, рассчитывается разность между реальными данными p_i и их текущей оценкой, полученной прямым проецированием текущего приближения ($\sum_{l=1}^{N} a_{il} x_l^{(k-1)}$). Эта величина представляет собой проекционную ошибку.

Вычисленная ошибка суммируется по всем пикселям p_i, принадлежащим данной проекции P_ϕ, и нормируется суммарный вес этих лучей при помощи весового коэффициента a_{il}. Данный коэффициент указывает, насколько сильно воксель с индексом j вносит свое значение в пиксель i, и полученная поправка вносится одновременно во все воксели x_j.

В данном уравнении λ является заранее заданным параметром релаксации. Этот параметр позволяет добавить поправку частично, чтобы избежать резких скачков. Для достижения плавного и стабильного процесса его значение обычно $0 < \lambda < 2$.

Главное преимущество *SART* по отношению к классическому методу алгебраической реконструкции заключается в том, что он практически полностью устраняет полосовые артефакты [4].

Однако современные клинические алгоритмы, такие как модельная итеративная реконструкция (МИР), кардинально улучшили подход. Это не один алгоритм, а целый класс статистических итерационных методов, которые включают модель физики процесса и априорные знания об изображении. Данный метод не просто решает систему (10), он ищет такое изображение x, которое максимально правдоподобно с точки зрения модели данных. Учитывается не только геометрия, но и статистика шума (например, Пуассоновский шум в рентгеновских лучах), рассеяние, ослабление. В данном методе также создается априорная модель изображения (регуляризация): заранее задается ожидание, что настоящее изображение должно обладать однородностью в пределах тканей, иметь четкие границы и не иметь ложных осцилляций [1].

Данный метод обладает высоким качеством итогового изображения при низкой дозе. Это позволяет значительно (до 50-60%) снизить дозу облучения пациента без потери диагностического качества, так как алгоритм эффективно подавляет шум. Также изображение не подвергается артефактам практически полностью.

И последний рубеж развития – интеграция физических моделей с искусственным интеллектом. Глубокие нейронные сети обучаются на парах «зашумленные/неполные данные – качественное изображение». Они могут либо выполнять постобработку изображений, полученных традиционными методами, либо выполнять прямую реконструкцию данных за один подход, что потенциально невероятно быстро.

Итак, полученного в результате реконструкции КТ-изображения не всегда достаточно. Для принятия клинических решений врачу часто требуется не просто визуальная оценка среза, а точные количественные данные, трехмерные модели и сравнение во времени.

Постобработка – это набор численных методов, которые превращают сырое диагностическое изображение в структурированные, измеримые и пригодные для сложного анализа данных.

Даже современные алгоритмы могут оставлять шум или артефакты. Для их подавления используют фильтры. Они делятся на простые и новейшие [1].

К простым фильтрам относятся:

1. Фильтр Гаусса, который создает легкое размытие, эффективно убирая мелкий шум, но также размывает важные границы.
2. Медианный фильтр, который заменяет значение пикселя средним значением его соседей, отлично справляется с импульсным шумом.

К новейшим фильтрам относятся:

1. Двусторонний фильтр, который совершает «умное» размытие путем усреднения только тех пикселей, которые близки не только в пространстве, но и по значению яркости.
2. Вейвлет-преобразование, которое раскладывает изображение на компоненты разных частот и локаций. Позволяет точечно ослабить шумы и заново собрать изображение с минимальной потерей деталей.

Фильтрация решает лишь часть задач постобработки, но для работы с формой и геометрией требуются иные математические инструменты. Именно для этого используются сплайны.

Сплайны – это гладкие параметрические кривые и поверхности, определяемые контрольным набором точек. Их ключевым свойством является гладкость, то есть заданная степень непрерывности, и локальность управления, то есть перемещение одной контрольной точки сплайна влияет только на близлежащий участок кривой. Принцип построения сплайна таков, что кривая не обязана проходить через все контрольные точки, вместо этого она притягивается к ним, формируя плавную траекторию, а положение и вес точек определяют итоговую форму.

Фундаментальным типом сплайнов является *B*-сплайн, представленные на рисунке 1. Кривая определяется степенью p, которая управляет гладкостью, например, степень 1 – ломаная, степень 3 – гладкая кривая без изломов, и набором контрольных точек P_i.

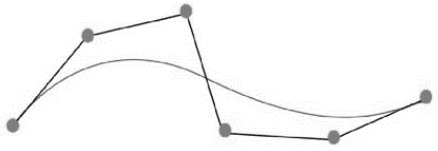


Рисунок 1 – Пример *B*-сплайна

Математически кривая – это взвешенная сумма базисных функций $N_i, p(u)$:

$$C(u) = \sum (N_i, p(u) \cdot P_i, \quad (13)$$

где параметр u пробегает по длине кривой.

Именно благодаря описанным математическим свойствам сплайны занимают центральное место в ключевых задачах медицинского анализа.

Например, реконструкция гладких 3*D*-поверхностей для планирования вмешательств. Этот процесс представляет собой последовательный конвейер перехода от сырых срезов к готовой для инженерных расчетов математической модели. После сегментации стопки поперечных КТ-срезов получается не изображение, а набор контурных кривых, лежащих в параллельных плоскостях. Сплайны идеально подходят для построения гладкой оболочки, проходящей через эти контуры. Алгоритм интерполирует или аппроксимирует данные, создавая единую математическую модель органа. Эта модель может быть визуализирована для оценки, экспортирована в форматы *SRL* для 3*D*-печати персонализированного хирургического шаблона или импланта и использована для компьютерного моделирования.

Таким образом, сплайны выступают в роли универсального языка для описания геометрии, связывающего этап анализа изображения с этапами количественной оценки, моделирования и динамического сравнения.

Компьютерная томография как технология является прямым воплощением современной вычислительной математики. От первичных измерений до конечных клинических решений – каждый шаг определяется численными методами.

Эволюция численных методов в КТ – это история о том, как абстрактная математика, например преобразования Радона и Фурье, итерационные методы и аппроксимация сплайнами – становится материальной в медицине. Понимание этой эволюции и лежащих в ее основе принципов необходимо не только разработчикам алгоритмов, но и врачам-диагностам, позволяя критически оценивать возможность технологии корректно интерпретировать ее результаты и в полной мере использовать ее потенциал для спасения жизней.

Список использованных источников:

1. Наттерер, Ф. Математические аспекты компьютерной томографии / Ф. Наттерер; пер.с англ. И. В. Паламодова; под ред. В. П. Паламодова. — Москв : Мир, 1990. — 279 с.

2.«Современные виды томографии». Booksifmo, 2006. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://books.ifmo.ru/file/pdf/118.pdf

3.«Методы фильтрации изображений в рентгеновской компьютерной томографии». Киберленинка, 2014. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-filtratsii-izobrazheniy-v-rentgenovskoy-kompyuternoy-tomografii

4.«Трехмерная реконструкция изображений методом SART с минимизацией тотальной вариации». Rep.bntu, 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/20162/31-35.pdf?sequence=1&isAllowed=y

UDC 519.6:616-073.756.8

EVOLUTION OF NUMERICAL METHODS FOR IMAGE RECONSTRUCTION AND POST-PROCESSING IN COMPUTED TOMOGRAPHY

Mediukha A.E., Liavonenko Y.I., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Voronkova E.V. – Senior Lecturer

Annotation. The article examines the evolution of numerical methods for data processing in computed tomography (CT) – from primary image reconstruction to post-processing stages. The mathematical apparatus of the Radon transform and the operating principles of filtered back projection (FBP) are described. The much attention is given to modern iterative algorithms (ART, SART, IRM), which allow reducing the radiation dose to the patient. The role of splines in constructing accurate 3D models of anatomical structures is analyzed. It is shown that the development of CT is inextricably linked with the improvement of computational mathematics.

Keywords. Computed tomography, numerical methods, iterative methods, Radon transform, image reconstruction, filtered back projection, iterative algorithms, ART, SART, splines.

УДК 519.17

ГРАФЫ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Литвинович М.О., Вольский Г.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л.В. – старший преподаватель

Аннотация. В статье рассматривается прикладное значение теории графов и её основные понятия. Представлено, как графовые модели позволяют описывать отношения между объектами, исследовать структуры сложных систем, решать прикладные задачи в информатике, экономике, логистике, биологии, социальных сетях, а также задачи телекоммуникации, маршрутизации, оптимизации и анализа связей в различных областях науки. Также в статье приведены основные типы графов, их базовые характеристики и примеры их использования на практике.

Ключевые слова. Граф, подграф, вершина, ребро, ориентированный граф, взвешенный граф, путь, цикл, связность, компонент связности, кратчайший путь, применение графов, оптимизация.

Введение. Теория графов является важным универсальным инструментом математического моделирования. Она позволяет описывать связи между множеством объектов в компактной и наглядной форме. Граф удобно использовать для формального описания систем, в которых объекты связаны отношениями. Примерами могут послужить дороги, каналы связи, зависимости или взаимодействия. В зависимости от характеристик выделяют взвешенные и невзвешенные, ориентированные и неориентированные, связные и несвязные графы, каждые из которых находят применение в разнообразных задачах [1].

Графовые модели актуальны потому, что множество реальных систем имеют сетевую природу, такие как транспортные маршруты, компьютерные и телекоммуникационные сети, цепочки поставок, социальные взаимодействия, биологические и экономические системы. Применение графовых моделей имеет весомое преимущество в том, что они позволяют не только наглядно представить структуру системы, но и вычислять оптимальные маршруты, анализировать устойчивость, находить наиболее эффективные решения и применять строгие алгоритмы для анализа и оптимизации.

Графы нашли применение во многих сферах.

Основные понятия. Графом называется математический объект $G = (V, E)$, который состоит из множества вершин V и множества рёбер E, каждое из которых соединяет по две вершины. Граф называется взвешенным, если каждому ребру сопоставлен вес, то есть число, например длина или стоимость. В противном случае граф называется невзвешенным. Граф называется ориентированным, если каждое из рёбер имеет направление. Если рёбра не имеют направления и задают симметричную (двустороннюю) связь между вершинами, то граф называется неориентированным.

Важную роль в теории графов играют такие понятия, как степень вершины, путь, цикл, связность, компонент связности и расстояние между вершинами. Важным понятием также является подграф, то есть граф, полученный из исходного путем удаления части вершин и рёбер с сохранением смежности. Степень вершины определяется количеством рёбер, смежных с данной вершиной. Путём в графе называется последовательность вершин, в которой каждая пара соседних вершин соединена ребром. Циклом называется замкнутый путь. Граф называется связным, если он является неориентированным и между любой парой его вершин существует минимум один путь. В противном случае граф называется несвязным. Пример связного графа представлен на рисунке 1.

Компонентом связности называют максимальный по включению подграф, в котором любая вершина достижима из любой другой. То есть весь подграф является одной связной частью графа. Для математики и информатики особенно важно понятие деревьев – связных неориентированных графов без циклов, а также взвешенных графов, в которых вес ребра может интерпретироваться как длина, расстояние, стоимость, время, задержка или другая величина.

Для решения типичных задач, связанных с транспортной логистикой, навигацией и телекоммуникацией, используются классические алгоритмы Дейкстры, Беллмана – Форда и A*, которые активно применяются в навигационных системах, протоколах маршрутизации и системах поддержки принятия решений. Для анализа структуры графа используются матрица смежности и матрица инцидентности, позволяющие переходить от наглядной графовой модели к алгебраическому представлению и применять методы линейной алгебры и теории алгоритмов.

Графовые модели широко применяются в информатике, логистике, социальных сетях, биологии и экономике.

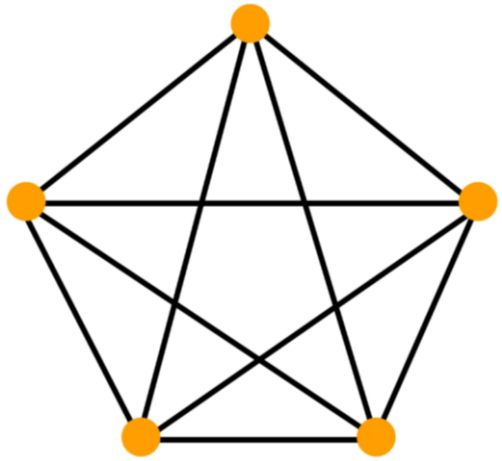


Рисунок 1 – Связный граф

Информатика и вычислительная техника. В информатике графы широко используются, например, для моделирования компьютерных сетей, разработки программ, анализа алгоритмов.

Сетевые протоколы описывают, как соединены устройства, потому с помощью графов удобно искать самый быстрый или самый короткий маршрут для передачи данных. В программной инженерии часто используются графы зависимостей, то есть ориентированные графы, где стрелки указывают, какой блок программы от какого зависит. Они помогают наглядно показать связи между модулями, оптимизировать порядок компиляции, упрощать тестирование. Также графы облегчают процесс обнаружения возможных точек отказа, то есть мест, от которых зависит крупная часть системы, и в случае поломки которых во всей системе произойдет сбой [2].

В контексте теории алгоритмов графы служат основой для задач, связанных с поиском, разрезами и потоками. Например, задачи максимального потока, то есть наибольшего количества данных, которые можно одновременно передать и минимального разреза, что означает наименьшее количество связей, которые нужно перекрыть, чтобы разорвать связь между определенными пунктами. Это делает оптимальным использование графов для анализа пропускной способности сетей и оптимизации распределения ресурсов. В базах данных и системах рекомендаций имеют широкое применение графовые СУБД, где данные и их отношения хранятся прямо в форме графа. Это позволяет эффективно выполнять запросы, которые связаны с поиском в системе путей, а также соседних к ним.

***Т*ранспорт и логистика.** Задачи транспорта и логистики являются одной из областей, где применение теории графов является наиболее наглядным. В задачах оптимальным является моделирование транспортной сети взвешенным графом, у которого вершины представляют собой города, склады или пункты доставки. Рёбра же подразумевают дороги, железнодорожные линии или авиамаршруты с соответствующими весами, которые характеризуют расстояние, время или стоимость перевозки.

Данные модели являются основой для решения задач поиска кратчайшего пути, построения оптимальных маршрутов и маршрутов обхода, а также задач, связанных с прокладыванием маршрутов подвижных объектов.

Принято формулирование задачи поиска кратчайшего пути или минимальной стоимости маршрута между двумя пунктами как задачи минимизации суммы весов рёбер на пути. Введём ориентированный взвешенный граф, где вершины – это города или склады:

$$L(P) = \sum_{e_{ij} \in P} w_{ij} \to \min, \quad (1)$$

где каждое ребро $e_{ij} \in P$ с весом w_{ij} обозначает маршрут из пункта i в пункт j, входящие в путь P, с заданной длиной, временем или стоимостью. В практическом контексте это означает выбор такого пути, для которого суммарные транспортные затраты будут минимальными.

Алгоритмы на основе графов позволяют учитывать ограничения по вместимости, временным окнам и приоритетности доставки. В области современных навигационных сервисов зачастую используются модифицированные алгоритмы Дейкстры и A*, которые оптимизированы для работы с крупными графами, представляющими собой дорожные сети, имеющими динамически изменяющиеся веса рёбер.

Социальные и информационные сети. Социальные и информационные сети, а также сети цитирования целесообразно представлять в виде графов. В таком случае вершины подразумевают пользователей, документы или веб-страницы, а рёбра соответствуют отношениям «друг», «подписчик», «ссылка» или «цитирование». Через анализ графов такого типа выявляются сообщества, определяются

наиболее важные вершины, которые являются наиболее влиятельными, а также изучается процесс распространения информации.

Пример структуры фрагмента социальной сети представлен на рисунке (рис. 2). Размер вершины отражает её значимость, в данном случае количество подписчиков.

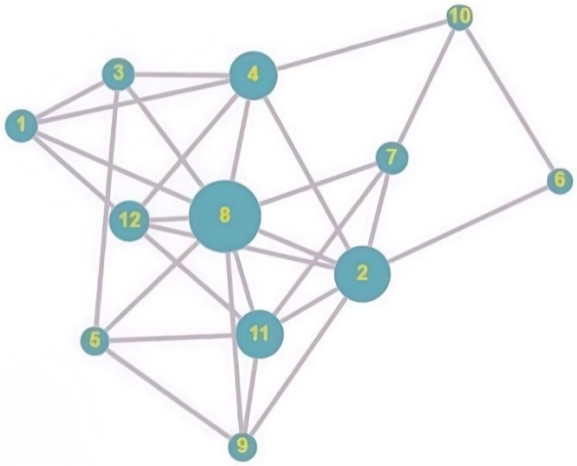


Рисунок 2 – Фрагмент графа социальной сети

В сфере социальных и информационных сетей важную роль играют также взвешенные графы, в которых удобно принимать вес ребра за частоту взаимодействий или силу влияния между пользователями. В таком контексте задача поиска крупнейших вершин формулируется как оптимизационная, где необходимо максимизировать суммарное влияние на пользователей при ограниченном числе вершин.

Методы центральности (по степени, по посредничеству, по близости) используют структуру графа, чтобы выявить «центральные», то есть наиболее важные, вершины, а также количественно оценить вклад каждой вершины в функционирование сети в целом. Данные методы являются основой для работы систем рекомендаций, ранжирования результатов поиска, а также систем обнаружения спама. Графовые алгоритмы применимы также при анализе устойчивости сети и исследовании устройства механизмов массового распространения информации [3].

Биология и медицина. В биологии и медицине графы используются для представления метаболических путей, взаимодействий белков, генетических регуляторных сетей. В данном случае узлы графа представляют собой молекулы, гены или белки, а рёбра описывают взаимодействия между ними или регуляторные связи. Анализ схем соединений между объектами в данных сетях помогает выделять ключевые элементы, которые отвечают за устойчивость системы. Важнейшим является способность выявлять потенциальные мишени для лекарственных воздействий [4]. Для данных областей наиболее распространённым является граф, показывающий возможность переливания разных групп крови. Данный граф представлен на рисунке 3.

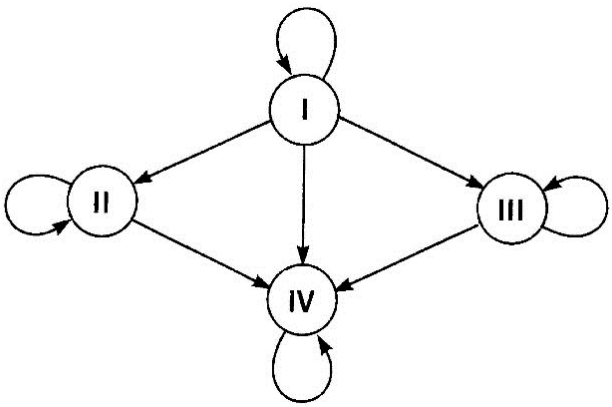


Рисунок 3 – Граф возможных вариантов переливания крови

Экономика и управление. Графы в экономике и управлении используются для описания производственных цепочек и зависимостей между ними, моделирования потоков ресурсов, денег и информации всех участников системы.

Экономическая сеть описывается графом, в котором вершины могут представлять собой предприятия, банки, рынки или проекты, а рёбра описывают финансовые потоки, контракты поставок,

долевые участия или управленческие связи. Пусть f_{ik} – объём потока ребру (i,j). Тогда можно записать правило баланса потоков:

$$\sum_{i(i,k)\in E} f_{ik} - \sum_{j(k,j)\in E} f_{kj} = b_k, \quad (2)$$

где b_k – внешний приток, если $b_k > 0$ или отток, если $b_k < 0$ ресурса. Такая модель помогает в решении задач оптимизации логистических цепочек, а именно минимизации затрат на транспортировку и хранение, анализа устойчивости цепочек поставок и поиска «узких мест», моделирования межотраслевых балансов и влияния шоков на разные секторы, выбора оптимального портфеля проектов с учётом ограниченных ресурсов. На рисунке 2 представлен типичный граф экономической сети, где демонстрируется движения товаров между экономическими субъектами [5].

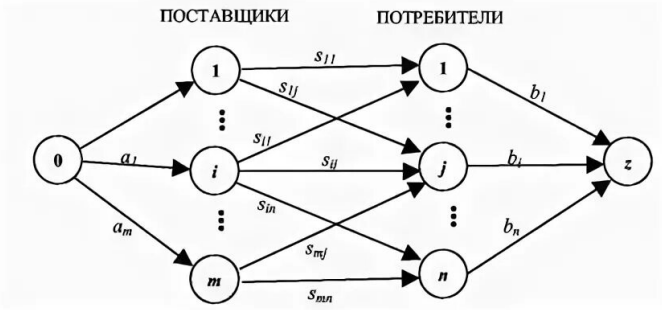


Рисунок 4 – Граф экономической сети

В управлении проектами широко используются сетевые графики (PERT/CPM). Работы изображаются рёбрами или вершинами, а зависимости и очередность выполнения – структурой графа. Это позволяет находить критический путь (минимальное возможное время реализации проекта), определять резерв времени у отдельных задач, перераспределять ресурсы, чтобы уменьшить риск срыва сроков.

Графовые модели также широко применяются в химии (графы молекул), в организации производственных процессов (графы технологических маршрутов), в управлении проектами (сетевые диаграммы PERT/CPM), а также в задачах планирования и оптимизации в экономиках и энергетике. Единство графового аппарата позволяет переносить методы и алгоритмы из одной области в другую, что делает теорию графов важным междисциплинарным инструментом.

Заключение. Теория графов представляет собой универсальный язык описания сложных систем, в котором значимы как объекты, так и связи между ними. Использование графовых моделей позволяет формализовать широкий спектр прикладных задач, применять строгие математические методы и разрабатывать эффективные алгоритмы анализа и оптимизации.

Графы являются не только фундаментальным математическим понятием, но и мощным практическим инструментом анализа процессов в информатике, логистике, социальных сетях, биологии и экономике, а их значение в науке и технике продолжает возрастать.

Список использованных источников:

1. *Омельченко, А. В. Теория графов : учебник / А. В. Омельченко. – СПб. : Питер, 2018. – 384 с.*
2. *Элементы теории графов и некоторые её приложения : учеб. пособие. – Наб. Челны : НЧТИ КФУ, 2014. – 92 с.*
3. *Теория графов : учебное пособие / под ред. Балашова. – Балашов, 2009. – 120 с.*
4. *Bondy, J. A. Graph Theory with Applications / J. A. Bondy, U. S. R. Murty. – New York : Elsevier, 1976. – 264 p.*
5. *Foulds, L. R. Graph Theory Applications / L. R. Foulds. – New York : Springer, 1992. – 385 p.*

UDC 519.17

GRAPHS AND THEIR FIELDS OF APPLICATION

Litvinovich M.O., Volski H.V., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Lobanok L.V. – Senior Lecturer

Annotation. This article examines the applied significance of graph theory and its fundamental concepts. It presents how graph models allow us to describe relationships between objects, explore the structures of complex systems, and solve applied problems in computer science, economics, logistics, biology, and social networks, as well as telecommunications, routing, optimization, and link analysis in various fields of science. The article also presents the main types of graphs, their basic characteristics, and examples of their practical use.

Keywords. Graph, subgraph, vertex, edge, directed graph, weighted graph, path, cycle, connectivity, connected component, shortest path, graph applications, optimization.

УДК 004.032.26:519.6

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ В НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ

Ляшко М.С., Гурина Т.Д., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Воронкова Е.В. – старший преподаватель

Аннотация. В работе рассматривается применение численных методов оптимизации для обучения искусственных нейронных сетей. Приводится математическая формализация модели нейрона и процесса прямого распространения сигнала. Подробно анализируются методы градиентного спуска, в том числе стохастические версии и адаптивные оптимизаторы (Momentum, Adam). Особое внимание уделяется функциям активации, их классификации и влиянию на сходимость численных алгоритмов. Установлена взаимосвязь между свойствами функций активации и эффективностью оптимизации.

Ключевые слова: нейронная сеть, численные методы, градиентный спуск, оптимизация, функция активации, функция потерь, метод импульса, Adam.

Введение. Современное развитие искусственного интеллекта и нейронных сетей напрямую зависит от того, как развивается вычислительная математика. Искусственные нейронные сети – это математические модели, которые созданы по образцу биологических нейронов, и по своей сути они являются вычислительными конструкциями. Их невозможно реализовать без численных методов. В отличие от классических моделей, где можно получить аналитическое решение, здесь всё строится на приближенных вычислениях – от задания начальных параметров до окончательной оптимизации.

Особая значимость этой темы вызвана усложнением архитектур нейросетей. Сейчас модели могут содержать миллиарды параметров, и обучить их эффективно можно только с помощью специализированных численных алгоритмов. Именно эти алгоритмы обеспечивают сходимость, устойчивость и вычислительную эффективность – те вещи, с которыми мы, так или иначе, сталкиваемся при изучении математики и программирования.

Численные методы на основе нейронных сетей относятся к классу методов с «непрямым» представлением исследуемого объекта. В отличие от классических подходов, объект здесь описывается не аналитически, а косвенно — через систему связанных узлов. Важной особенностью является то, что сами узлы, их входные параметры и выходные значения, как правило, не имеют физической интерпретации.

Предполагается, что модель функционирует по аналогии с человеческим мозгом. Теоретическим фундаментом методов искусственных нейронных сетей (ИНС) выступают стохастические модели, базирующиеся на численно-экспериментальном подходе.

Область знаний, занимающаяся разработкой и применением нейросетей, носит название Deep Learning (глубокое обучение). Данная сфера носит ярко выраженный междисциплинарный характер, интегрируя методы статистики, теории вероятностей, линейной алгебры, а также требуя компетенций в областях машинного обучения и науки о данных (Data Science).

Искусственная нейронная сеть представляет собой математическую модель (а также её программную или аппаратно-программную реализацию), построенную по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей. Само понятие возникло в ходе исследований процессов, протекающих в мозге, и попыток их моделирования. Исторически первой такой моделью принято считать нейронную сеть, предложенную У. Маккалоком и У. Питтсом [1].

Математическая модель нейрона и сети. Базовым элементом любой нейронной сети является искусственный нейрон — упрощенная математическая модель биологического прототипа. Он получает несколько входных сигналов, каждый из которых умножается на свой весовой коэффициент (вес). Веса — это и есть память сети; чем вес больше, тем значимее соответствующий вход. Далее все взвешенные сигналы суммируются, и к этой сумме прибавляется специальное число, называемое смещением (bias). Смещение позволяет сдвигать результат суммирования, делая нейрон более гибким. Наконец, полученная сумма проходит через нелинейное преобразование — функцию активации. Сигнал на выходе нейрона описывается следующим выражением:

$$y = \varphi\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b\right), \quad (1)$$

где x_i – входные сигналы; w_i – весовые коэффициенты; b – смещение; φ – функция активации; y – выходной сигнал.

Нейроны объединяются в слои, а слои — в сеть. Самой распространенной архитектурой является многослойный перцептрон, где сигнал распространяется строго в одном направлении — от входа к

выходу. Согласно универсальной аппроксимационной теореме, такая сеть с одним скрытым слоем способна аппроксимировать любую непрерывную функцию при достаточно большом количестве нейронов и подходящей функции активации. Это теоретическое обоснование объясняет широкую применимость многослойных сетей.

Процесс вычисления выходного сигнала такой сети (прямое распространение) можно представить как последовательное применение формул (2) – (4). Сначала входной вектор x подается на первый слой. Для каждого последующего слоя l мы умножаем матрицу весов $W^{(l)}$на выход предыдущего слоя $a^{(l-1)}$, прибавляем смещение $b^{(l)}$ и получаем вектор взвешенных сумм $z^{(l)}$. Затем применяем функцию активации $\varphi^{(l)}$ к каждому элементу этого вектора, получая выход текущего слоя $a^{(l)}$:

$$z^{(l)} = W^{(l)}a^{(l-1)} + b^{(l)}, \tag{2}$$

$$a^{(l)} = \varphi^{(l)}z^{(l)}2, \tag{3}$$

Повторяя эту процедуру для всех слоев, на последнем слое L мы получаем итоговый прогноз сети $\hat{y}$:

$$\hat{y} = a^{(L)}. \tag{4}$$

Обучение как оптимизация. Чтобы сеть давала правильные ответы, ее нужно обучить. Для этого нам нужен критерий, который покажет, насколько хорошо или плохо сеть работает в данный момент. Таким критерием является функция потерь $J(\theta)$. Она вычисляет среднюю ошибку между ответами сети $\hat{y}$ и правильными ответами y на обучающих примерах. Для задач регрессии часто используется среднеквадратичная ошибка:

$$J(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(y - \hat{y}_i)^2, \tag{5}$$

где θ – совокупность всех параметров сети (веса и смещения); N – размер обучающей выборки. Для задач классификации более предпочтительна функция кросс-энтропии, которая лучше отражает вероятностную природу выходов.

Таким образом, задача обучения превращается в классическую задачу оптимизации: найти такой набор параметров θ^*, при котором функция потерь $J(\theta)$ принимает минимальное значение. Представить себе эту функцию в пространстве с тысячами или миллионами измерений невозможно, но мы можем изучать ее свойства локально — в той точке, где находимся в данный момент. Важно отметить, что функция потерь нейронной сети, как правило, невыпуклая и содержит множество локальных минимумов и седловых точек. Однако на практике многие из этих минимумов дают схожее качество, и задача сводится к нахождению достаточно хорошего решения.

Численные методы оптимизации. Для нахождения минимума функции $J(\theta)$ мы используем итеративные численные методы. Самый фундаментальный из них — градиентный спуск. Его идея проста и основана на математическом анализе: если мы вычислим градиент функции в текущей точке (вектор частных производных), то он укажет направление наискорейшего роста функции. Следовательно, чтобы уменьшить значение функции, нужно сделать шаг в противоположном направлении. Правило обновления параметров имеет вид:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta\nabla J(\theta_t), \tag{6}$$

где η – скорость обучения (гиперпараметр, определяющий величину шага); $\nabla J(\theta_t)$ – градиент функции потерь.

Выбор скорости обучения — это искусство. Если шаг слишком маленький, мы будем идти к минимуму очень долго. Если слишком большой — можем "перепрыгнуть" минимум и начать расходиться, уходя в бесконечность.

Разновидности градиентного спуска. На практике градиент $J(\theta)$ вычисляется не по всей выборке сразу (это слишком дорого), а по её небольшим случайным порциям — мини-пакетам. Это мини-пакетный градиентный спуск. Он вносит некоторый шум в процесс, но этот шум даже полезен: он помогает алгоритму "выскакивать" из неглубоких локальных минимумов и седловых точек, где обычный градиентный спуск мог бы застрять [2]. Размер мини-пакета является гиперпараметром: маленькие пакеты дают более шумную оценку градиента, что может улучшить обобщающую способность, но замедляет сходимость; большие пакеты дают более точную оценку, но требуют больше памяти и вычислений.

Кроме мини-пакетного, существует стохастический градиентный спуск (SGD), где градиент вычисляется по одному случайному примеру, и пакетный градиентный спуск, где используется вся

выборка. В современных библиотеках глубокого обучения по умолчанию применяется мини-пакетный вариант [3].

Метод импульса. Однако даже мини-пакетный метод не идеален. Представьте себе овраг: функция быстро убывает в одном направлении (крутой склон) и медленно в другом (дно оврага). Градиентный спуск будет "болтаться" от стенки к стенке, очень медленно продвигаясь вдоль дна. Для решения этой проблемы были разработаны более продвинутые численные методы.

Одним из таких методов является метод импульса (Momentum). Его можно представить как тяжелый шар, который катится по поверхности функции потерь. Шар накапливает инерцию: если он долго движется в одном направлении, его скорость возрастает, а резкие колебания (например, удары о стенки оврага) сглаживаются. Математически это выражается введением дополнительной переменной v — вектора скорости:

$$v_{t+1} = \gamma v_t + \eta \nabla J(\theta_t), \tag{7}$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - v_{t+1}, \tag{8}$$

где γ – коэффициент затухания импульса (обычно принимается равным 0.9). Он определяет, как быстро "забываются" старые градиенты.

Методы адаптивной скорости обучения. Дальнейшим развитием идеи адаптивности стали методы, которые подбирают индивидуальную скорость обучения для каждого параметра. Один из первых таких методов — Adagrad, который накапливает сумму квадратов градиентов и уменьшает шаг для параметров с большими градиентами. Однако Adagrad имеет проблему: со временем шаг становится слишком маленьким из-за монотонного роста знаменателя. На смену ему пришел RMSProp, использующий экспоненциально затухающее среднее квадратов градиентов, что позволяет адаптироваться к нестационарным ландшафтам.

Метод Adam (Adaptive Moment Estimation) [3] объединяет идеи импульса и RMSProp. Он адаптирует скорость обучения для каждого параметра индивидуально, используя две скользящие средние: среднее значение градиентов (первый момент m), которое показывает общее направление, и среднее значение квадратов градиентов (второй момент v), которое показывает разброс или "активность" градиента. Обновление параметров в методе Adam производится по следующему алгоритму:

$$m_{t+1} = \beta_1 m_t + (1 - \beta_1)\nabla J(\theta_t), \tag{9}$$

$$v_{t+1} = \beta_2 v_t + (1 - \beta_2)(\nabla J(\theta_t))^2, \tag{10}$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \frac{m_{t+1}}{\sqrt{v_{t+1}} + \varepsilon}, \tag{11}$$

где β_1, β_2 – коэффициенты затухания моментов (обычно 0.9 и 0.999); ε – малая константа для предотвращения деления на ноль. Adam стал одним из стандартов индустрии, так как он устойчив к выбору гиперпараметров и хорошо работает на огромном разнообразии задач [4].

Методы второго порядка. Наряду с методами первого порядка (использующими только градиент), существуют методы второго порядка, которые учитывают кривизну функции потерь через матрицу Гессе. Классический метод Ньютона обновляет параметры по формуле: $\theta_{t+1} = \theta_t - \eta[\nabla^2 J(\theta_t)]^{-1}\nabla J(\theta_t)$. Однако вычисление и обращение гессиана для миллионов параметров практически невозможно из-за колоссальной вычислительной сложности $(O(n^3))$. Поэтому в глубоком обучении методы второго порядка используются редко, хотя существуют их аппроксимации, например, метод L-BFGS, который иногда применяется для задач небольшого размера. [3]

Роль функций активации. Классические функции активации. Почему же все эти методы работают? Они опираются на градиент, а градиент вычисляется с помощью цепного правила и проходит через каждый слой сети, включая функции активации. Производная функции активации — это "коэффициент пропускания" для градиента на данном нейроне. Именно здесь кроется ключ к пониманию многих проблем обучения.

Функция активации вносит в модель нелинейность. Без неё многослойная сеть оставалась бы просто комбинацией линейных преобразований и не могла бы обучаться сложным зависимостям [5]. Исторически сложилось несколько классов функций активации, каждый из которых имеет свои особенности.

Ступенчатая функция (пороговая) (рисунок 1). Это исторически первая функция активации, использовавшаяся в модели Маккалока–Питтса [1]. Она определяется как:

$$\varphi(z) = \begin{cases} 1, z \geq 0 \\ 0, z < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Её главное преимущество — простота и бинарность выхода, что удобно для логических схем. Однако она недифференцируема (производная равна нулю всюду, кроме точки разрыва), что делает её непригодной для обучения градиентными методами. Кроме того, она даёт только жёсткое решение «всё или ничего», что ограничивает выразительные способности сети.

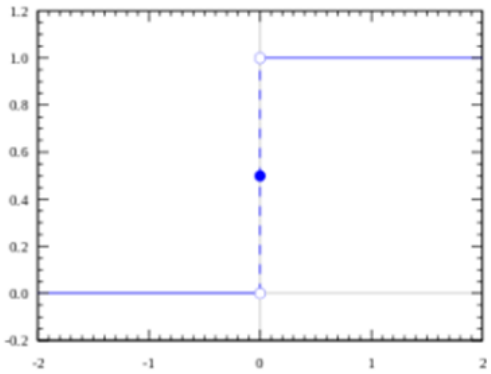


Рисунок 1 – Ступенчатая функция

Ступенчатая функция совершенно не подходит для сложных задач и при использовании нейросетей с большим количеством нейронов в одном слое, т.к. может активировать несколько нейронов сразу. Как следствие этому, сеть будет работать некорректно из-за конфликта данных.

Линейная функция (рисунок 2). В простейшем случае нейрон может иметь линейную активацию:

$$\varphi(z) = z. \quad (13)$$

Производная такой функции постоянна и равна единице, что обеспечивает стабильное распространение градиента. Однако ключевой недостаток — композиция линейных преобразований остаётся линейной. В отличие от ступенчатой функции линейная функция позволяет получать спектр значений, а не только один ответ из двух.

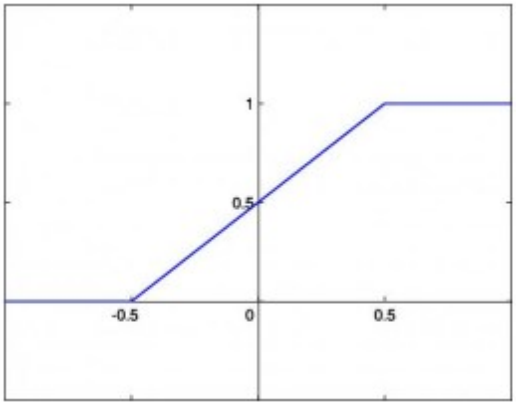


Рисунок 2 – Линейная функция

Многослойная сеть с линейными активациями эквивалентна однослойной и не может аппроксимировать нелинейные зависимости. Поэтому линейные функции иногда используют только в выходном слое для задач регрессии, где требуется предсказание действительных чисел.

Сигмоидальная функция (логистическая) (рисунок 3). Это классическая гладкая функция, которая сжимает любой вход в интервал от 0 до 1:

$$\varphi(\mathrm{z}) = \frac{1}{1+e^{-z}}. \quad (14)$$

Она хороша тем, что её выход можно интерпретировать как вероятность. Но у неё есть фатальный недостаток: при больших положительных или отрицательных значениях z функция становится очень

пологой, и её производная стремится к нулю ($\varphi'(\mathrm{z}) = \varphi(\mathrm{z})(1 - \varphi(\mathrm{z}))$). Это означает, что градиент, проходя через такой "насыщенный" нейрон, становится исчезающе малым. В глубоких сетях, где таких слоёв много, градиент, дойдя до первых слоёв, практически полностью затухает. Возникает проблема "затухающего" градиента и сеть перестаёт обучаться.

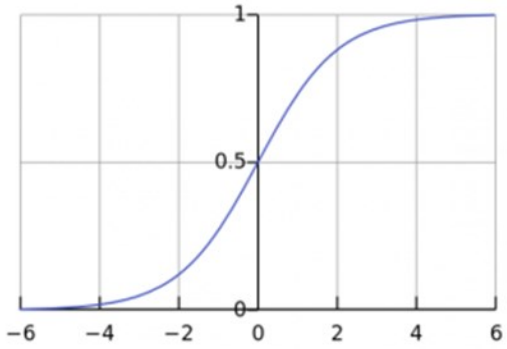


Рисунок 3 – Сигмоидальная функция

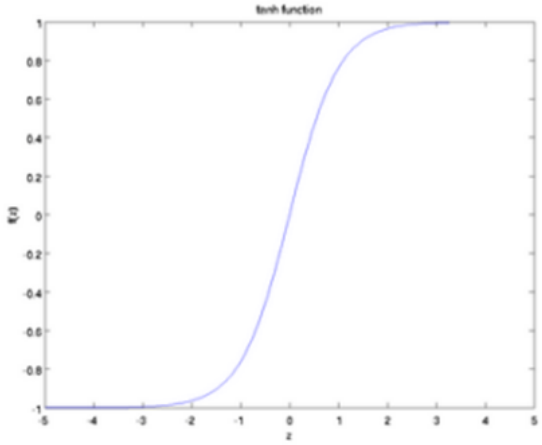


Рисунок 4 – Гиперболический тангенс

Функция гиперболического тангенса (tgh) (рисунок 4). Является сдвинутой и масштабированной версией сигмоиды, её выход лежит в диапазоне от -1 до 1:

$$\varphi(z) = tgh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}. \quad (15)$$

Она часто работает лучше сигмоиды, потому что её выход центрирован относительно нуля. Это облегчает оптимизацию, так как градиенты следующих слоев получают сигналы разных знаков. Однако проблема насыщения и затухания градиента для $tanh$ также актуальна, хоть и в чуть меньшей степени [6].

ReLU и его модификации. Прорывом стало появление функции ReLU (Rectified Linear Unit). Это удивительно простая функция:

$$\varphi(z) = max(0, z). \quad (16)$$

Она оставляет положительные числа без изменения, а отрицательные превращает в ноль. Её производная равна 1 для положительных аргументов и 0 для отрицательных. Благодаря тому, что для положительных входов производная всегда равна 1, градиент проходит через активный нейрон без затухания. Это позволило обучать очень глубокие сети, которые раньше было невозможно обучить. Кроме того, ReLU вычислительно эффективна, так как требует лишь операции сравнения.

Однако у ReLU есть своя проблема — "умирающий ReLU". Если в процессе обучения веса нейрона сложатся так, что на его вход постоянно приходят отрицательные числа, то его выход всегда будет равен нулю, а градиент — нулю. Нейрон "умирает" и больше никогда не обучается. Для борьбы с этим были придуманы модификации, например, Leaky ReLU, который для отрицательных аргументов даёт маленький отрицательный наклон (например, 0,01 z), позволяя градиенту хоть как-то проходить и, возможно, "оживить" нейрон:

$$\varphi(z) = max(az, z) \text{ с малым } \alpha > 0. \quad (17)$$

Другие варианты: PReLU, где α обучается в процессе оптимизации; ELU (Exponential Linear Unit), которая имеет плавный изгиб для отрицательных значений, что улучшает свойства градиента и ускоряет сходимость; SELU (Scaled ELU), которая обеспечивает самопормализацию сети — активация автоматически приводит выходы слоя к нулевому среднему и единичной дисперсии. Выбор конкретной функции активации зависит от задачи и архитектуры, но ReLU и его варианты остаются наиболее популярными для скрытых слоев.

Проблема взрывающегося градиента. Помимо затухания, существует и обратная проблема — взрывающийся градиент, когда градиенты становятся слишком большими и дестабилизируют обучение. Это может происходить при неудачной инициализации весов или слишком большой глубине сети. Для борьбы с взрывающимся градиентом применяют клипинг градиентов (ограничение его нормы) или

специальные методы инициализации, такие как инициализация Ксавье (для сигмоиды и tgh) или инициализация Хе (для ReLU).

Заключение. В ходе работы мы рассмотрели, что обучение нейронных сетей — это, по сути, прикладная задача численной оптимизации. Мы проследили эволюцию методов: от простого градиентного спуска до адаптивных алгоритмов типа Adam, которые учитывают историю градиентов и адаптируют шаг для каждого параметра. Мы также увидели, что эффективность этих методов неразрывно связана с выбором функций активации. Функции активации определяют "ландшафт" функции потерь и то, насколько свободно градиенты могут распространяться по сети. Понимание этой взаимосвязи необходимо любому специалисту, который хочет осознанно проектировать архитектуры и выбирать алгоритмы обучения, добиваясь наилучших результатов. Дальнейшее развитие численных методов, вероятно, будет связано с созданием ещё более адаптивных алгоритмов, учитывающих структуру задачи, а также с гибридными подходами, использующими информацию второго порядка.

Список использованных источников:

1. *McCulloch, W.S. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity / W.S. McCulloch, W. Pitts // The bulletin of mathematical biophysics.– 1943.– Vol. 5, № 4.– P. 115–133.*

2. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

3. Горбань, А.Н. Обучение нейронных сетей / А.Н. Горбань. – М.: ПараГраф, 1990. – 160 с.

4. Численные методы оптимизации в задачах машинного обучения [Электронный ресурс] / Habr.com. – Режим доступа: https://habr.com/ru/articles/813221/. – Дата доступа: 15.03.2026.

5. Алексейчук, А.С. Введение в нейронные сети: модели, методы и программные средства / А.С. Алексейчук. – М.: МАИ, 2023. – 105 с.

6. Романов, П.С. Системы искусственного интеллекта. Моделирование нейронных сетей в системе MATLAB / П.С. Романов, И.П. Романова. – 4-е изд. – СПб. : Лань, 2024. – 140 с.

UDC 004.032.26:519.6

APPLICATION OF NUMERICAL METHODS IN NEURAL NETWORKS

Lyashko M.S., Gurina T.D., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Voronkova E.V. – Senior Lecturer

Annotation. The paper considers the application of numerical optimization methods for training artificial neural networks. The mathematical formalization of the neuron model and the process of direct signal propagation is given. Methods of gradient descent, including stochastic versions and adaptive optimizers (Momentum, Adam), are analyzed in detail. Special attention is paid to activation functions, their classification, and the effect on the convergence of numerical algorithms. The relationship between the properties of activation functions and optimization efficiency has been established.

Keywords: neural network, numerical methods, gradient descent, optimization, activation function, loss function, momentum method, Adam.

УДК 519.876

МАТЕМАТИКА ВЫБОРОВ

Малащенко В.Д. студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Хомичков И.И. – д-р физ.-мат. наук, профессор

Аннотация. В работе рассматриваются математические методы распределения депутатских мандатов в пропорциональных избирательных системах. На примерах моделей Республики Беларусь и Российской Федерации анализируются два подхода: метод наибольших остатков (квота Хэра) и метод Д'Ондта. Показано, что оба обеспечивают высокую степень пропорциональности между долей голосов и долей мест. Также описывается механизм распределения мандатов внутри партийных списков при жёсткой системе. Работа адресована интересующимся прикладной математикой в политических процессах..

Ключевые слова. пропорциональная избирательная система, распределение мандатов, метод наибольших остатков, квота Хэра, метод Д'Ондта, жесткие партийные списки, математическая статистика, теория вероятностей.

В любой демократической системе возникает фундаментальная математическая проблема: как конечное множество голосов избирателей преобразовать в строго определённое количество депутатских мандатов? Подсчёт голосов, распределение конкурсных мест и определение победителей — все это относится к сфере прикладной математики, а именно к теории вероятностей и математической статистике.

В парламентской демократии множество граждан выбирают ограниченное количество представителей. Этот процесс не может быть произвольным: непременным атрибутом любой избирательной системы является справедливость в распределении мест, понимаемая как максимально возможное соответствие между долей поданных голосов и долей полученных мандатов.

Наибольшим доверием в мире пользуется система пропорционального распределения. При проведении выборов по пропорциональной системе депутатские мандаты распределяются между списками кандидатов пропорционально голосам, поданным за эти списки. При этом используются закономерности случайных событий, открытые еще в XVII веке Блезом Паскалем и Пьером Ферма.

Может ли распределение быть строго пропорциональным? Понятно, что, за исключением абсолютно чудесных случайностей (имеющих исчезающе малую вероятность), количество голосов и количество мест не совпадают в точности. Чтобы найти выход из этой ситуации, необходимо выбрать математический метод, который позволит распределить спорные места между кандидатами.

В данной работе мы рассмотрим математические модели распределения мандатов, адаптированные под реалии избирательных систем Российской Федерации и Республики Беларусь.

Один из базовых методов распределения мандатов — метод избирательной квоты, предложенный английским математиком Томасом Хэром. Рассмотрим его на примере, приближенном к условиям выборов в Палату представителей Национального собрания Республики Беларусь, где заградительный барьер для политических партий составляет 5%.

Предположим, в выборах участвуют восемь списков кандидатов — A, B, C, D, E, F, G, H. Общее количество распределяемых мест составляет 110 мандатов (число депутатов Палаты представителей). Все списки преодолевают 5%-ный барьер.

Таблица №1. Списки кандидатов и распределение голосов (модель РБ)

Списки кандидатов	Количество голосов (тыс. чел.), N	Доля голосов, p
A	850	0,11
B	720	0,09
C	1150	0,15
D	980	0,13
E	650	0,09
F	1250	0,16
G	1070	0,14
H	930	0,12
Общее количество	7600	1,00

Примечание: минимальный 5% барьер составляет 380 тыс. голосов, все списки его преодолели.

Относительный показатель p рассчитывается по формуле:

$$pi = \frac{Ni}{\sum_{j=1}^{8} * Nj} \quad (1)$$

Таблица №2. Коэффициенты победы (идеальное пропорциональное распределение)

Списки кандидатов	Коэффициент победы , P
A	12.1
B	9.9
C	16.5
D	14.3
E	9.4
F	17.6
G	15.4
H	13.2

Полученные значения представляют собой математическое ожидание количества мест для каждого списка при идеальной пропорциональности. Однако места — дискретная величина. В Республике Беларусь при пропорциональной системе используется метод избирательной квоты, также известный как метод наибольших остатков (квота Хэра). Квота определяется по формуле:

$$Q = \frac{\text{Общее число голосов}}{\text{Число мандатов}} = \frac{7600}{110} = 69{,}09 \text{ тыс. голосов} \quad (2)$$

Каждый список получает столько мандатов, сколько раз квота укладывается в полученных голосах. Остатки голосов распределяются между списками с наибольшей дробной частью.

Таблица №3. Распределение мест по методу наибольших остатков (квота Хэра)

Списки	Голоса (N)	Целая часть (N/Q)	Остаток	Доп. мандаты	Всего мест	Доля мест, %
A	850	12	0,30	0	12	10,9
B	720	10	0,42	0	10	9,1
C	1150	16	0,65	+1	17	15,5
D	980	14	0,19	0	14	12,7
E	650	9	0,41	0	9	8,2
F	1250	18	0,09	0	18	16,4
G	1070	15	0,49	+1	15	13,6
H	930	13	0,46	+1	14	12,7
Итого	7600	107	—	+3	110	100

В данном распределении дополнительные мандаты получили списки с наибольшими остатками: H (0,46), C (0,65) и B (0,42 — при равенстве с E, но у B остаток 0,42 против 0,41 у E). Все 110 мест распределены справедливо: доля мест каждого списка близка к доле поданных за него голосов.

В Российской Федерации выборы депутатов Государственной Думы регулируются Федеральным законом № 20-ФЗ. С 2016 года действует смешанная система: 225 депутатов избираются по

одномандатным округам, 225 — по пропорциональной системе с процентным барьером 5%. При распределении мандатов по пропорциональной системе используется метод Д'Ондта (императивный мандат).

Рассмотрим распределение 225 мандатов между восемью списками, преодолевшими 5%-ный барьер. Используем те же исходные данные, но адаптируем общее количество голосов под российские реалии (явка и масштаб — порядка 55 млн избирателей, поэтому голоса указаны в тысячах для удобства).

Таблица №4. Исходные данные (модель РФ)

Списки кандидатов	Количество голосов (тыс. чел.), N
A	6 050
B	5 120
C	8 250
D	7 040
E	4 580
F	8 980
G	7 680
H	6 620
Общее количество	54 300

Примечание: 5% барьер составляет 2715 тыс. голосов, все списки его преодолели.

В соответствии с методом Д'Ондта, число голосов, полученных каждым списком, делят последовательно на 1, 2, 3, 4, 5 и так далее до числа, соответствующего числу распределяемых мандатов. Затем полученные частные распределяют в порядке убывания. Процесс описывается формулой:

$$\mathrm{Ki(s)} = \frac{\mathrm{Vi}}{\mathrm{si+1}} \tag{3}$$

где si — количество мест, уже полученных i-м списком на данном этапе.

Для распределения 225 мест необходимо провести 225 итераций. В таблице ниже приведены первые несколько значений для наглядности процесса.

Таблица №5. Начальные конструктивные коэффициенты K(i,s)

Списки кандидатов	V/1	V/2	V/3	V/4	V/5	V/6
A	6050	3025	2017	1513	1210	1008
B	5120	2560	1707	1280	1024	853
C	8250	4125	2750	2063	1650	1375
D	7040	3520	2347	1760	1408	1173
E	4580	2290	1527	1145	916	763
F	8980	4480	2987	2240	1792	1493
G	7680	3840	2560	1920	1536	1280
H	6620	3310	2207	1655	1324	1103

Первое место получит список с максимальным значением — F (8960). Второе место — C (8250). Третье место — A (6050), так как после получения первого места у F теперь используется делитель 2. Процесс продолжается до полного распределения всех 225 мандатов.

Для быстрого расчета итогового распределения можно использовать метод последовательного приближения либо специальное программное обеспечение. Результат применения метода Д'Ондта к 225 местам представлен ниже.

Таблица №6. Итоговое распределение мест (по методу Д'Ондта)

Списки	Голоса (тыс.)	Доля голосов, %	Количество мест	Доля мест, %
A	6 050	11,2	25	11,1
B	5 120	9,4	21	9,3
C	8 250	15,2	34	15,1
D	7 040	13,0	29	12,9

E	4 580	8,4	19	8,4
F	8 980	16,5	37	16,4
G	7 680	14,1	32	14,2
H	6 620	12,2	28	12,4
Итого	54 300	100	225	100

Как видно из таблицы, метод Д'Ондта обеспечивает высокую точность пропорциональности: максимальное отклонение доли мест от доли голосов не превышает 0,2%. Это делает его одним из самых справедливых методов распределения мандатов.

После того как определено, сколько мест получает каждый список, возникает следующий вопрос: какие именно кандидаты из списка становятся депутатами? В Российской Федерации используется система жёстких (закрытых) списков с императивным мандатом — порядок кандидатов определяется партией и не может быть изменён избирателем. В Республике Беларусь также применяются жесткие списки.

Согласно этой системе, кандидаты получают мандаты в той последовательности, в которой они расположены в списке. Если список получает k мест — проходят кандидаты с 1-го по k-й номер.

Рассмотрим это на примере списка F, который в РФ получил 37 мест (Таблица №6). Допустим, внутрипартийное голосование распределило кандидатов по популярности. Первые 7 кандидатов для наглядности:

Таблица №7. Кандидаты списка F (первые 7 позиций)

Кандидат	Количество голосов внутри партии (тыс.)
F1	1450
F2	1320
F3	1180
F4	1090
F5	980
F6	870
F7	760

С точки зрения теории вероятностей, попадание кандидата в парламент является событием, условная вероятность которого равна:

$$P(\text{кандидат } j \in \text{Парламент} \mid \text{список получил k мест}) = \begin{cases} 1, & j \le k \\ 0, & j > k \end{cases}$$

где j — порядковый номер кандидата в списке.

Таким образом, при k=37 в парламент проходят кандидаты F1, F2, ..., F37. Кандидаты, начиная с 38-го номера, несмотря на голоса избирателей внутри партии, мандатов не получают. В нашем примере F7 (седьмой номер) проходит в парламент, так как 7 < 37.

Список использованных источников:

1. Метод Д'Ондта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki – Дата доступа: 06.02.2026 г.

2. Связанные и свободные списки. Преференциальное голосование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.ru/2_71953_svyazannie-i-svobodnie-spiski-preferentsialnoe-golosovanie.html – Дата доступа: 17.10.2025 г.

UDC 519.876

MATHEMATICS OF ELECTIONS

Malashenko V.D., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1]
Minsk, Republic of Belarus

Khomichkov I.I. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Annotation. The paper examines mathematical methods for distributing parliamentary mandates in proportional electoral systems. Using models of the Republic of Belarus and the Russian Federation, two approaches are analyzed: the largest remainder method (Hare quota) and the D'Hondt method. It is shown that both ensure a high degree of proportionality between the share of votes and the share of seats. The mechanism for distributing mandates within party lists under a closed-list system is also described. The work is addressed to those interested in applied mathematics in political processes.

Keywords. proportional electoral system, mandate distribution, largest remainder method, Hare quota, D'Hondt method, closed party lists, mathematical statistics, probability theory.

УДК 515.125, 512.562

ПОРОЖДАЕМОСТЬ ТОПОЛОГИИ ЕВКЛИДОВА ПРОСТРАНСТВА ОТНОШЕНИЯМИ ЧАСТИЧНЫХ ПОРЯДКОВ

Пархонюк М. П., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Люксембург И. Л. – ассистент

Аннотация: В работе показано, что стандартная топология на $\mathbb{R}^n$ порождается отношением покоординатного частичного порядка. Исследовано усиление этого порядка и его влияние на порождаемую топологию. Установлено, что лексикографический порядок сильнее покоординатного и задаёт более сильную топологию. Также рассмотрен расширенный порядок, порождающий ту же топологию, что и покоординатный.

Ключевые слова: евклидово пространство, частичный порядок, порядковая топология, лексикографический порядок, сравнение топологий, усиление порядка.

Введение. Известно [1, стр. 22], что Евклидова топология τ на $\mathbb{R}^n$ является единственной хаусдорфовой топологией, относительно которой непрерывны операции сложения и умножения на скаляр. Она может быть введена несколькими эквивалентными способами. Во-первых, с помощью евклидовой метрики: открытые шары $B(x, r) = \{ y \in \mathbb{R}^n \mid \|x - y\| < r \}$ образуют базу топологии. Во-вторых, как тихоновская топология произведения: $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \cdots \times \mathbb{R}$ (n сомножителей), базу которой образуют открытые параллелепипеды $(a_1, b_1) \times \cdots \times (a_n, b_n)$. В настоящей работе мы показываем, что эта же топология τ порождается отношением частичного порядка на $\mathbb{R}^n$, а также исследуем, как усиление порядка влияет на порождаемую им топологию.

Пусть имеется произвольное множество X. Говорят, что < задает частичный порядок [2] на множестве X, если выполнено:

1) $x < y \Rightarrow x \neq y$ – антирефлексивность.

2) $\forall\, x, y, z \in X$ таких, что $x < y$ и $y < z \Rightarrow x < z$ – транзитивность.

Если дополнительно любые два различные элементы сравнимы, т.е. для $\forall\, x, y \in X$, $x \neq y$, определено $x < y$ или $y < x$, порядок называется линейным.

Пусть на X задан частичный порядок. Определим три типа подмножеств множества X:

Интервалы:

$$(c, d) = \{x \in X \mid c < x < d\}$$

Левые лучи:

$$(-\infty, a) = \{x \in X \mid x < a\}$$

Правые лучи:

$$(b, +\infty) = \{x \in X \mid x > b\}$$

Обозначим семейство всех таких множеств, а также пустое множество и само множество X, через $\mathcal{B}$. Покажем, что $\mathcal{B}$ является базой некоторой топологии на X. Семейство множеств $\mathcal{B} \subseteq \tau$ называется базой топологии τ, если любое открытое множество $U \in \tau$ представляется в виде объединения элементов базы и для любых $B_1, B_2 \in \mathcal{B}$ их пересечение $B_1 \cap B_2$ снова лежит в базе (замкнутость относительно пересечения).

Утверждение 1. *Введенное семейство множеств $\mathcal{B}$ образует базу некоторой топологии на X.*

Доказательство. Рассмотрим всевозможные пары элементов базы $\mathcal{B}$ и их пересечения. Среди них выделяется 8 случаев:

1) $(c_1, d_1) \cap (c_2, d_2) = (\max\{c_1, c_2\}, \min\{d_1, d_2\})$.

2) $(a, b) \cap (-\infty, c) = (a, \min\{b, c\})$

3) $(a, b) \cap (d, +\infty) = (\max\{a, d\}, b)$

4) $(-\infty, a) \cap (-\infty, b) = (-\infty, \min\{a, b\})$

5) $(a, +\infty) \cap (b, +\infty) = (\max\{a, b\}, +\infty)$

6) $(-\infty, a) \cap (b, +\infty) = (b, a)$

7) $\emptyset \cap B = \emptyset$, $\forall\, B \in \mathcal{B}$.

8) $X \cap B = B$, $\forall\, B \in \mathcal{B}$.

Таким образом, пересечение элементов базы есть снова элемент базы: или порядковый интервал, или луч, или пустое множество. Значит, $\mathcal{B}$ является базой некоторой топологии, которую будем называть топологией, порожденной *частичным* порядком.

Топология на $\mathbb{R}^n$.

Рассмотрим пространство $\mathbb{R}^n$, $x, y \in \mathbb{R}^n$, $x = (x_1, \ldots, x_n)$, $y = (y_1, \ldots, y_n)$. Введём на $\mathbb{R}^n$ отношение $<_{coord}$, определим: $x <_{coord} y$, если $x_i < y_i$ для всех $i = 1, \ldots, n$.

Проверим, что это отношение является частичным порядком.

Антирефлексивность: для каждого i не выполнено $x_i < x_i$, поскольку < на $\mathbb{R}$ антирефлексивно. Значит, $<_{coord}$ антирефлексивно.

Транзитивность: если $x <_{coord} y$ и $y <_{coord} z$, то для каждого i выполнено $x_i < y_i$ и $y_i < z_i$. Поскольку < на $\mathbb{R}$ транзитивно, отсюда $x_i < z_i$ для каждого i, а значит $x <_{coord} z$.

Введенный частичный порядок будем называть *покоординатным*.

Теорема 1. *Покоординатный порядок задаёт стандартную топологию на $\mathbb{R}^n$.*

Доказательство. Пусть $a = (a_1,\ldots,a_n)$ и $b = (b_1,\ldots,b_n)$ – точки в $\mathbb{R}^n$, причём для всех координат $a_i < b_i$. Рассмотрим интервал в покоординатном порядке между этими точками:

$(a, b)_{coord} = \{ x = (x_1,\ldots,x_n) \in \mathbb{R}^n \mid a <_{coord} x <_{coord} b \}$. Для случая $\mathbb{R}^2$ этот интервал изображён на рисунке 1.

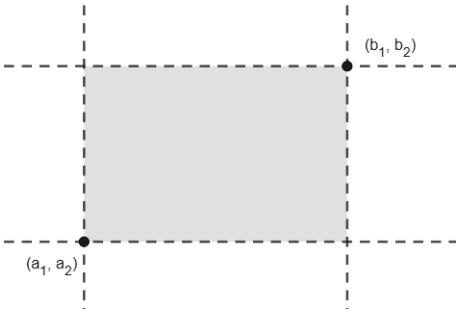


Рисунок 1 – Интервал $(a, b)_{coord}$ в $\mathbb{R}^2$, являющийся прямоугольником $(a_1, a_2) \times (b_1, b_2)$.

Из определения покоординатного порядка следует: $(a, b)_{coord} = (a_1, b_1) \times (a_2, b_2) \times\ldots\times (a_n, b_n)$, где $(a_i, b_i) = \{ x_i \in \mathbb{R} \mid a_i < x_i < b_i \}$ – интервал на $\mathbb{R}$. Значит, порядковый интервал $(a, b)_{coord}$ является открытым подмножество в $\mathbb{R}^n$ (произведением открытых интервалов). Аналогично проверяется, что лучи $(a, +\infty)_{coord}$, $(-\infty, b)_{coord}$ также открыты. С другой стороны, всякий открытый параллелепипед P (элемент базы тихоновской топологии на $\mathbb{R}^n$) является интервалом в покоординатном порядке:

$$P = (x_1, y_1) \times \ldots \times (x_n, y_n) = (x, y)_{coord}, \text{ где } x = (x_1,\ldots,x_n),\ y = (y_1,\ldots,y_n)$$

Возникает естественный вопрос: существуют ли другие порядки, порождающие ту же самую топологию? Как они связаны с рассмотренным покоординатным порядком?

Говорят, что частичный порядок $<_1$ на множестве X *не слабее*, чем частичный порядок $<_2$, если из $x <_2 y$ следует $x <_1 y$. Если, кроме того, существует $z, h \in X$ такие, что $z <_1 h$, но неверно, что $z <_2 h$, то говорят, что порядок $<_1$ *сильнее*, чем $<_2$. Примером более сильного порядка на $\mathbb{R}^n$, чем покоординатный, служит *лексикографический порядок* $<_{lex}$, который задается следующим образом: $(x_1, \ldots, x_n) <_{lex} (y_1, \ldots, y_n)$, если существует номер k ($1 \le k \le n$) такой, что $x_i = y_i$ для всех $i < k$ и $x_k < y_k$. Этот порядок является линейным (любые две точки сравнимы) и сильнее покоординатного порядка: если $x <_{coord} y$, то $x <_{lex} y$. Обратное неверно: например, $(0, 1) <_{lex} (1, 0)$, поскольку $0 < 1$ по первой координате, но покоординатно эти точки несравнимы, так как $0 < 1$ по первой и $1 > 0$ по второй координате одновременно.

Говорят, что τ_1 *не слабее*, чем τ_2, если $\tau_2 \subseteq \tau_1$. Если, кроме того, $\tau_1 \neq \tau_2$, то говорят, что τ_1 *сильнее*, чем τ_2. Справедлива следующая теорема.

Теорема 2. *Топология τ_{lex}, порождённая лексикографическим порядком на $\mathbb{R}^n$, сильнее стандартной евклидовой топологии τ.*

Доказательство.

1. $\tau \subseteq \tau_{lex}$.

Пусть $U \in \tau$ – произвольное открытое множество в стандартной топологии и пусть $p = (p_1, p_2, \ldots, p_n) \in U$. По определению стандартной топологии существует $\varepsilon > 0$ такое, что

$$B(p, \varepsilon) = \{(x_1, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^n \mid \sqrt{(x_1 - p_1)^2 + \cdots + (x_n - p_n)^2} < \varepsilon \} \subseteq U.$$

Рассмотрим лексикографический интервал:

$$I = ((p_1, p_2, \ldots, p_n - \varepsilon), (p_1, p_2, \ldots, p_n + \varepsilon)) = \{ y = (p_1, p_2, \ldots, p_{n-1}, y_n) : |y_n - p_n| < \varepsilon\}.$$

Для любой точки $y \in I$ выполнено: $||y - p|| = |y_n - p_n| < \varepsilon$. Следовательно, $I \subseteq B(p, \varepsilon) \subseteq U$. При этом I является открытой окрестностью точки $p = (p_1, p_2, \ldots, p_n)$ в топологии τ_{lex}, значит, $U \in \tau_{lex}$. Поскольку U было произвольным, $\tau \subseteq \tau_{lex}$. Случай на $\mathbb{R}^2$ изображён на рисунке 2.

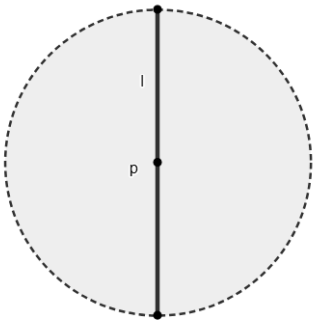


Рисунок 2 – $l \subseteq B(p, \varepsilon)$

2. $\tau_{lex} \not\subset \tau$ *(существует множество, открытое в* τ_{lex}*, но не открытое в* τ*).*

Покажем, что множество l, построенное в части 1 для произвольной точки $p = (p_1, p_2, \ldots, p_n)$, не является открытым в τ. Рассмотрим произвольный шар $B(p, \delta)$ радиуса $\delta > 0$ с центром в p. Точка $C = (p_1 + \delta/2, p_2, \ldots, p_n)$ лежит в этом шаре, так как расстояние от C до p равно $\delta/2 < \delta$. Однако первая координата точки C равна $p_1 + \delta/2 \neq 0$, поэтому $C \notin l$. Следовательно, $B(p, \delta) \not\subseteq l$ для любого $\delta > 0$, значит $l \notin \tau$. Соответствующая геометрическая иллюстрация на $\mathbb{R}^2$ приведена на рисунке 3.

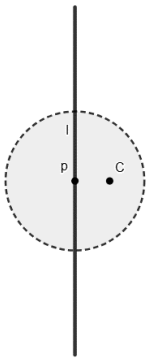


Рисунок 3 – Множество l и точка $C = (p_1 + \delta/2, p_2)$ на $\mathbb{R}^2$

Рассмотрим покоординатный порядок на $\mathbb{R}^n$. Как видно из примера выше, пара точек (0,1) и (1,0) несравнима в нём: $x_1 < y_1$, но $x_2 > y_2$. Введём новый порядок $<_{ext}$ (от англ. extended – расширенный). Будем считать $x <_{ext} y$, если $x <_{coord} y$ или если $x_1 > y_1$, $x_2 < y_2$, …, $x_n < y_n$. Введенный порядок сильнее покоординатного. Покажем, что этот порядок несравним с лексикографическим. Рассмотрим точки $x = (1, 0, \ldots, 0, 0)$ и $y = (0, 1, 1, \ldots, 1)$, в расширенном порядке $x <_{ext} y$, тогда как в лексикографическом порядке $y <_{lex} x$. Следовательно, расширенный порядок и лексикографический несравнимы.

Теорема 3. *Топология* τ_{ext}*, порожденная расширенным порядком, совпадает со стандартной топологией.*

Доказательство. Достаточно показать взаимное включение баз этих топологий.

1. $\tau \subseteq \tau_{ext}$*.*

Базисный элемент стандартной топологии – открытый параллелепипед $P = (a_1, b_1) \times \ldots \times (a_n, b_n)$, где $a_i < b_i$. Покажем, что P является интервалом расширенного порядка. Выберем точки: $a = (a_1, a_2, \ldots, a_n)$, $b = (b_1, b_2, \ldots, b_n)$. Для них выполнено: $a_i < b_i$ для любого i. По определению $<_{ext}$ это означает $a <_{ext} b$.

Интервал $(a, b)_{ext} = (a, b)_{coord}$ состоит из точек x, таких что $a <_{ext} x <_{ext} b$. Тогда интервал равен:

$$(a, b)_{ext} = (a_1, b_1) \times \ldots \times (a_n, b_n) = P.$$

Следовательно, любой базисный элемент открыт в τ_{ext}.

2. $\tau_{ext} \subseteq \tau$*.*

Если $a <_{ext} b$, то возможны следующие случаи:

Сравнение выполнено покоординатно $a <_{coord} b$, получаем параллелепипед:

$$(a, b)_{ext} = (a_1, b_1) \times ... \times (a_n, b_n).$$

$a <_{ext} b$, но неверно $a <_{coord} b$, тогда $(a_1 > b_1)$, $a_i < b_i$ для любого $i > 1$. Получаем параллелепипед

$$(a, b)_{ext} = (b_1, a_1) \times (a_2, b_2) \times ... \times (a_n, b_n).$$

Аналогично проверяется, что лучи расширенного порядка также являются открытыми множествами в τ. В случае $\mathbb{R}^2$ $(B, D)_{ext} = (A, C)_{coord} = (A, C)_{ext}$, что изображено на рисунке 4.

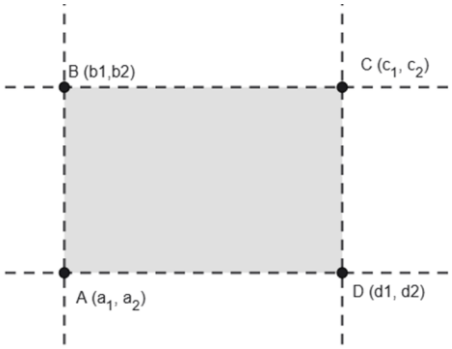


Рисунок 4

Заключение. В работе показано, что стандартная топология на $\mathbb{R}^n$ порождается покоординатным частичным порядком: его интервалы и лучи образуют базу стандартной топологии $\mathbb{R}^n$. Исследовано усиление порядка и его влияние на порождаемую топологию. Установлено, что лексикографический порядок является более сильным по сравнению с покоординатным и задаёт топологию, которая сильнее стандартной. Также рассмотрен расширенный порядок, порождающий ту же топологию, что и покоординатный. Это показывает, что усиление исходного порядка может приводить к усилению топологии, а может и не приводить.

Список использованных источников:

1. Рудин, У. Функциональный анализ/ У. Рудин; пер. с англ. В. Я. Лина. – Москва : Мир, 1975. – 450 с.

2. Александров, П. С. Введение в общую теорию множеств и функций / П. С. Александров. – М. : ОГИЗ – Гостехиздат, 1948. – 419 с.

UDC 515.125, 512.562

GENERABILITY OF EUCLIDEAN SPACE TOPOLOGY BY PARTIAL ORDER RELATIONS

Parkhaniuk M. P., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Luxemburg I. L. – Assistant Professor

Annotation. This paper investigates the possibility of generating the standard Euclidean topology by partial order relations. It is proved that the topology whose basis is formed by intervals and rays of the coordinate-wise partial order coincides with the standard topology of Euclidean space. A comparative analysis of the effect of strengthening an order relation on the structure of the induced topology is carried out. It is established that the lexicographic order, being stronger than the coordinate-wise order, induces a topology strictly containing the standard one. An extended order is also considered, which turns out to be incomparable with the lexicographic order.

Keywords. Euclidean space topology, partial order, order topology, coordinate-wise order, lexicographic order, topological basis, comparison of topologies, extended order.

УДК 621.833

ОПТИМАЛЬНОСТЬ ПРОФИЛЯ ЗУБА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЬВЕНТЫ И ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ КРИВЫХ

Савицкая А. Б., Романчук Е. В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л. В. – старший преподаватель

Аннотация. В работе проведен сравнительный анализ двух основных типов профилей зубчатых передач – эвольвентного и циклоидального. Для каждой кривой получены параметрические уравнения, вычислена кривизна, исследованы её свойства. Показано, что эвольвента обладает монотонно убывающей кривизной, отсутствием особых точек и устойчивостью к изменению межосевого расстояния, тогда как циклоидальные кривые имеют периодическую кривизну и точки возврата. Сделан вывод об оптимальности эвольвентного профиля для большинства машиностроительных приложений.

Ключевые слова. Эвольвента, циклоида, эпициклоида, гипоциклоида, кривизна, зубчатое зацепление, профиль зуба.

Введение. Зубчатые передачи являются одним из наиболее распространённых механизмов в современной технике. Они применяются в устройствах различного назначения — от компактных часовых механизмов и измерительных приборов до мощных промышленных установок и транспортных систем. Форма зуба напрямую влияет на плавность работы механизма, уровень износа и точность передачи движения.

Исторически сложились два основных типа профилей: эвольвентный и циклоидальный. В современном машиностроении практически повсеместно применяется эвольвента. Цель работы – выяснить, почему именно эта кривая является наиболее распространённой, и доказать гипотезу об оптимальности эвольвентного профиля для большинства зубчатых передач благодаря монотонному изменению кривизны, устойчивости к изменению межосевого расстояния и технологичности изготовления. Рассмотрим первый тип профиля: эвольвентный.

Эвольвента – это траектория любой точки прямой линии, перекатываемой по окружности с радиусом R без скольжения. Параметрические уравнения эвольвенты имеют вид:

$$\begin{cases} x(t) = R(cost + tsint), \\ y(t) = R(sint - tcost), \end{cases} \quad t > 0 \tag{1}$$

Для вычисления кривизны найдём первую и вторую производные:

$$x'(t) = Rtcost, y'(t) = Rtsint \tag{2}$$

Кривизна плоской кривой, заданной параметрически, определяется по формуле:

$$\kappa(t) = \frac{|\, x'(t)y''(t) - y'(t)x''(t)\,|}{\left[\left(x'(t)\right)^2 + \left(y'(t)\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \tag{3}$$

Вычислим числитель:

$$x'(t)y''(t) - y'(t)x''(t) = R^2t^2 \tag{4}$$

Вычислим знаменатель:

$$\left(x'(t)\right)^2 + \left(y'(t)\right)^2 = R^2t^2, \left[\left(x'(t)\right)^2 + \left(y'(t)\right)^2\right]^{\frac{3}{2}} = R^3t^3 \tag{5}$$

Таким образом, кривизна эвольвенты:

$$\kappa(t) = \frac{1}{Rt} \tag{6}$$

Из выражения видно, что кривизна обратно пропорциональна параметру t. Найдём производную:

$$\kappa'(t) = -\frac{1}{Rt^2} < 0 \text{ (при всех } t > 0) \quad (7)$$

Следовательно, $\kappa(t)$ строго убывает. При $t \to \infty$ кривизна стремится к нулю, следовательно, профиль становится всё более пологим.

Вывод: Эвольвента имеет гладкое, монотонно убывающее изменение кривизны. Отсутствие экстремумов исключает локальные концентрации напряжений, характерные для некоторых других типов профилей.

Рассмотрим циклоидальные кривые.

Для того чтобы оценить преимущества эвольвенты, необходимо рассмотреть свойства альтернативных профилей, прежде всего эпициклоиды и гипоциклоиды.

Эпициклоида – траектория точки окружности радиуса r, катящейся без скольжения по внешней стороне неподвижной окружности радиуса R. Введём обозначение $k = \frac{R+r}{r}$, где k – коэффициент отношения радиусов. Тогда параметрические уравнения эпициклоиды:

$$\begin{cases} x(t) = (R+r)cost - rcos(kt), \\ y(t) = (R+r)sint - rsin(kt). \end{cases} \quad (8)$$

Первая и вторая производные:

$$\begin{cases} x'(t) = -(R+r)sint + rksin(kt), \\ y'(t) = (R+r)cost - rkcos(kt), \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x''(t) = -(R+r)cost + rk^2\cos(kt) \\ y''(t) = -(R+r)sint + rk^2\sin(kt). \end{cases} \quad (10)$$

После подстановки в формулу кривизны и упрощений получаем:

$$\kappa(t) = \frac{1}{2r\sqrt{r(R+r)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\cos\left(\frac{R}{r}t\right)}}, \cos\left(\frac{R}{r}t\right) \neq 1$$

$$\cos\left(\frac{R}{r}t\right) \neq 1 \quad (11)$$

Кривизна эпициклоиды периодична с периодом $T = \frac{2\pi r}{R}$.

В точках, где $\cos\left(\frac{R}{r}t\right) = 1$, знаменатель обращается в ноль, кривизна стремится к бесконечности – это точки возврата.

Минимальная кривизна достигается при $\cos\left(\frac{R}{r}t\right) = -1$:

$$\kappa_{min} = \frac{1}{2\sqrt{2r(R+r)}} \quad (12)$$

Гипоциклоида – траектория точки окружности, катящейся по внутренней стороне неподвижной окружности. Параметрические уравнения гипоциклоиды:

$$\begin{cases} x(t) = (R-r)cost + r\cos\left(\frac{R}{r}t\right), \\ y(t) = (R-r)sint - r\sin\left(\frac{R}{r}t\right). \end{cases} \quad (13)$$

Анализ кривизны даёт аналогичную картину: периодичность, точки возврата, немонотонность.

Для численного исследования свойств эвольвенты и циклоидальных кривых была разработана программа на языке C++. Программа вычисляет координаты точек кривых и их геометрические характеристики, которые используются для построения графиков и анализа поведения кривизны. Графики представлены на рисунке 2.

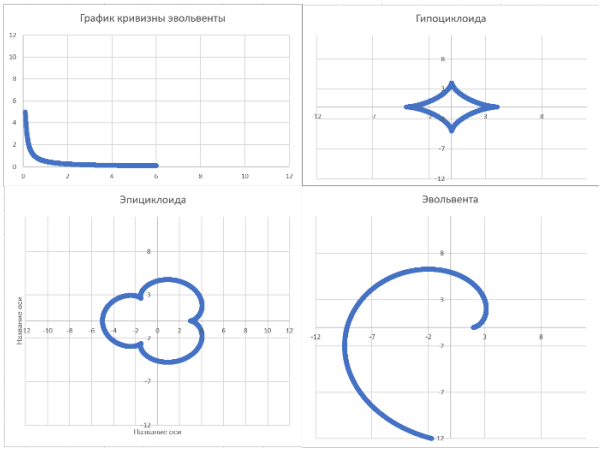


Рисунок 2 – Графики кривых

Вывод: Циклоидальные кривые имеют сложное, периодическое распределение кривизны с бесконечными всплесками в точках возврата. Это может приводить к возникновению зон повышенных напряжений, если такие участки попадают в рабочую зону зацепления.

На основе полученных результатов проведём сравнительный анализ эвольвентного и циклоидального профилей зубьев по основным характеристикам. Результаты сравнения свойств кривизны представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение свойств кривизны эвольвенты и циклоидальных кривых

Характеристика	Эвольвента	Циклоидальные кривые
Вид функции	Спиралевидная кривая	Периодическая
Монотонность	Строго убывающая	Немонотонная
Особые точки	Нет	Точки возврата
Поведение на бесконечности	Изменяется плавно	Колебания, резко изменяется

Вывод: Анализ таблицы показывает, что кривизна эвольвенты изменяется плавно и монотонно, тогда как для циклоидальных кривых характерно периодическое изменение кривизны и наличие точек возврата. Это свидетельствует о большей геометрической устойчивости эвольвентного профиля и снижении вероятности возникновения зон повышенных напряжений в процессе работы передачи.

Исследуем устойчивость к изменению параметров:

1) Для эвольвенты нормаль в точке контакта всегда проходит через одну и ту же точку – полюс зацепления. Это свойство делает передачу нечувствительной к небольшим изменениям межосевого расстояния.

2) Для циклоидальных профилей линия зацепления представляет собой дугу окружности. Любое изменение межосевого расстояния нарушает закон зацепления, вызывая пульсации угловой скорости и повышенный износ.

3) Эвольвентные зубья нарезаются методом обкатки с использованием простого инструмента (червячная фреза, гребёнка). Это обеспечивает высокую производительность и низкую стоимость массового производства.

4) Циклоидальные профили требуют более сложного инструмента и точной настройки станков, что делает их производство дороже.

Под оптимальностью профиля зуба в данной работе понимается совокупность следующих характеристик: устойчивость кинематических параметров передачи, технологичность изготовления, плавность изменения кривизны и надёжность работы механизма.

На основе рассмотренных свойств эвольвенты и циклоидальных кривых проведём их сравнение по основным эксплуатационным характеристикам. Результаты сравнения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение эксплуатационных характеристик эвольвентного и циклоидального профилей зубьев

Критерий	Эвольвента	Циклоидальные кривые
Технологичность	Высокая	Низкая
Чувствительность к монтажу	Низкая	Высокая
Износостойкость	Средняя	Высокая
Область применения	Массовые механизмы(машиностроение)	Часы, приборы, компрессоры, насосы

Вывод: Сравнение эксплуатационных характеристик показывает, что эвольвентный профиль обладает высокой технологичностью и устойчивостью к изменениям параметров установки, что делает его предпочтительным для массового производства зубчатых передач. Циклоидальные профили сохраняют преимущества в специальных механизмах, где требуется высокая точность и минимальное трение.

Полученные результаты позволяют сформулировать основные выводы о преимуществах и ограничениях исследуемых профилей.

Заключение. Эвольвента имеет простую аналитическую форму, кривизна монотонно убывает, нет особых точек. Передача устойчива к погрешностям монтажа, технологична в массовом производстве. Циклоидальные кривые (эпициклоида, гипоциклоида) обладают периодической кривизной, имеют точки возврата с бесконечной кривизной. Профили чувствительны к изменению межосевого расстояния, сложнее в изготовлении. Эвольвента является технологическим оптимумом: она не идеальна по контактным напряжениям, но её математические свойства (инвариантность к межосевому расстоянию и простота нарезания) делают её доминирующей в общем машиностроении. Циклоидальный профиль сохраняет значение в точных приборах (часы, счётчики) и в специальных механизмах (героторные насосы, компрессоры), где важны минимальное трение и компактность. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании зубчатых передач и выборе оптимального профиля зуба.

Список использованных источников:

1. Леонтьев, Н.В. Механические передачи на основе эпициклоиды и гипоциклоиды / Н.В. Леонтьев, О.Г. Мугин, О.О. Мугин // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – С. 1-3.

2. Анципорович, П.П. Нарезание цилиндрических эвольвентных зубчатых колес и построение схемы зубчатого зацепления : учеб.-метод. пособие к лаб. работам по дисциплине «Теория механизмов, машин и манипуляторов» / П.П. Анципорович, В.К. Акулич, Е.М. Дубовская. – 2-е изд., испр. – Минск : БНТУ, 2009. – 46 с.

3. Лыкова, А.Б. Классификация видов зубчатых передач и их сравнительный анализ с ременными передачами / А.Б. Лыкова, М.В. Астафьева // Наука и Образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК». – Мичуринск, 2024. – Т. 7, № 4. – 8 с.

4. Берман, Г.Н. Циклоида / Г.Н. Берман. – 2-е изд. – М. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1954. – 116 с.

UDC 621.833

OPTIMALITY OF THE TOOTH PROFILE: A COMPARATIVE ANALYSIS OF INVOLUTE AND CYCLOIDAL CURVES

Savitskaya A.B., Romanchuk E.V. students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

L. V. Lobanok — Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics

Annotation. The paper presents a comparative analysis of two main types of gear tooth profiles – involute and cycloidal. Parametric equations are derived for each curve, curvature is calculated, and its properties are studied. It is shown that the involute possesses monotonically decreasing curvature, no singular points, and stability to changes in center distance, while cycloidal curves exhibit periodic curvature and cusps. The conclusion is made about the optimality of the involute profile for most mechanical engineering applications.

Keywords. Involute, cycloid, epicycloid, hypocycloid, curvature, gear engagement, tooth profile.

УДК 517.38:519.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПРЕДЕЛЁННОГО ИНТЕГРАЛА И ДИСКРЕТНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

Солодовников Е.А., Рыжков М.А. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ. -мат. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматривается применение дискретных численных методов для вычисления определённого интеграла при моделировании кинематики движущегося объекта. Приведён сравнительный анализ точности методов левых и правых прямоугольников, метода трапеций и метода Симпсона при аппроксимации площади под кривой зависимости скорости от времени. Оценивается эффективность применения данных алгоритмов на примере функции, описывающей неравномерное движение транспортного средства.

Ключевые слова. Определённый интеграл, численное интегрирование, моделирование движения, метод прямоугольников, метод трапеций, метод Симпсона, кинематика, вычислительная математика, шаг интегрирования, погрешность аппроксимации.

Моделирование физических процессов с использованием математического аппарата является фундаментальной задачей в современной науке и инженерии. На практике исследователи редко имеют дело с идеальными постоянными величинами; чаще всего необходимо анализировать функции, имеющие нерегулярный или колебательный характер. Для восстановления полной картины движения, в частности, для нахождения пройденного пути по показаниям скорости, необходимо применение методов численного интегрирования. Понимание точности и границ применимости каждого из этих методов критически важно для корректного анализа данных в транспортной телематике, робототехнике и физике.

В основе кинематики лежит фундаментальная связь: мгновенная скорость материальной точки является производной от функции пройденного пути по времени:

$$\vartheta = \frac{ds}{dt}. \tag{1}$$

Следовательно, полный путь, пройденный телом за интервал времени $[t_1; t_2]$ вычисляется через определенный интеграл:

$$s = \int_{t_1}^{t_2} \vartheta(t)\, dt\,. \tag{2}$$

Геометрически это означает, что пройденная дистанция численно равна площади под кривой графика скорости $\vartheta(t)$. На практике, при математическом моделировании реального движения, аналитическая первообразная функции скорости часто не выражается в элементарных функциях либо данные поступают в виде дискретного массива точек с датчиков телеметрии. Именно поэтому применение численных методов интегрирования является математически обоснованным инструментом для высокоточной аппроксимации пути.

В рамках данного исследования мы рассматриваем функцию, аппроксимирующую модель движения реального транспортного средства, для которого скорость описывается функцией:

$$\vartheta(t) = \frac{5 \cdot \sin(x)}{x} + 23{,}6\,, \tag{3}$$

где $\vartheta(t)$ — скорость объекта в метрах в секунду (м/с); а t — время в секундах (с). График данной зависимости представлен на рисунке 1.

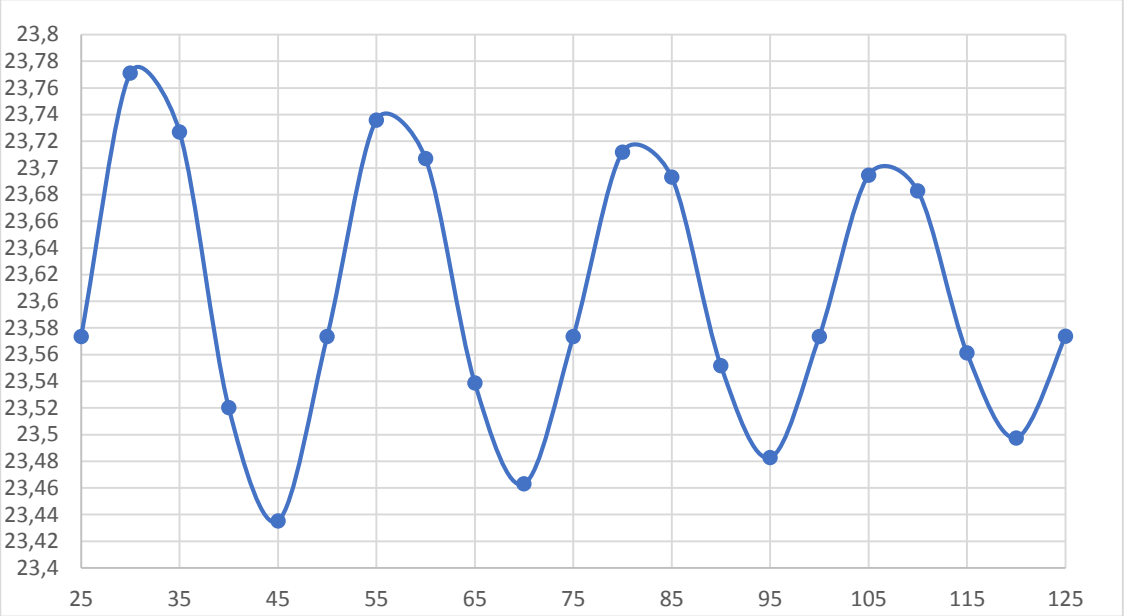


Рисунок 1 - график зависимости скорости $\vartheta(t)$ от времени t

Выбор аналитической модели вида $\vartheta(t) = \frac{5 \cdot \sin(x)}{x} + 23{,}6$ обусловлен желанием сделать её максимально близкой к тому, как тела перемещаются в действительности. Данная функция эффективно имитирует переходные процессы и затухающие осцилляции, характерные для движения транспортных средств в условиях переменного ускорения.

Для вычисления пройденного пути на заданном временном промежутке $[t_1; t_2]$ применим методы численного интегрирования:

$$s = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{5 \cdot \mathrm{SIN}(x)}{x} + 23{,}6 \right) dt,$$

где s — пройденный путь (м) t_1, t_2 — начальный и конечный моменты времени интервала наблюдения.

Поскольку интегрирование осуществляется дискретными шагами, в работе сравниваются следующие подходы: метод левых прямоугольников, метод правых прямоугольников, метод трапеции и метод Симпсона.

Выпишем сначала значения функции $\vartheta(t)$ для различных моментов времени в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения функции $\vartheta(t)$ в момент времени t

t	ϑ	t	ϑ
25	23.573530	80	23.711983
30	23.771220	85	23.693139
35	23.727135	90	23.551762
40	23.520360	95	23.482813
45	23.435328	100	23.573690
50	23.573573	105	23.694545
55	23.735980	110	23.682901
60	23.707048	115	23.561336
65	23.538831	120	23.497593
70	23.463089	125	23.573763
75	23.573627	130	23.564227

Разберем подробно вычисление пути на временном промежутке $[25; 125]$. Проанализируем каждый метод и оценим его погрешность. Для всех методов мы разбиваем отрезок $[t_1; t_2]$ на n равных частей с шагом h.

Применяя метод прямоугольников, на каждом шаге кривая графика заменяется горизонтальной линией, образуя прямоугольник.

Если использовать метод левых прямоугольников, то высота каждого прямоугольника берется по значению функции в левой границе интервала [1, с. 169]:

$$S = \int_a^b f(x)\,d(x) \approx h \cdot \sum_{i=0}^{n-1} f(x_i). \quad (4)$$

При подстановке $n = 10$ получаем:

$$S \approx 10 \cdot (23.573530 + 23.727135 + 23.435328 + 23.735980 + 23.538831 + 23.573627 + 23.693139 + 23.482813 + 23.694545 + 23.561336) = 2360.162640.$$

При увеличении числа разбиений до n = 20 получим:

$$S \approx 5 \cdot (23.573530 + 23.771220 + 23.727135 + 23.520360 + 23.435328 + 23.573573 + 23.735980 + 23.707048 + 23.538831 + 23.463089 + 23.573627 + 23.711983 + 23.693139 + 23.551762 + 23.482813 + 23.573690 + 23.694545 + 23.682901 + 23.561336 + 23.497593) = 2360.347415.$$

Метод правых прямоугольников: Высота берется по значению функции в правой границе интервала.

$$S = \int_a^b f(x)\,d(x) \approx h \cdot \sum_{i=1}^{n} f(x_i). \quad (5)$$

Подставим $n = 10$ получим:

$$S \approx 10 \cdot (23.727135 + 23.435328 + 23.735980 + 23.538831 + 23.573627 + 23.693139 + 23.482813 + 23.694545 + 23.561336 + 23.573763) = 2360.164970.$$

Для $n = 20$ будет следующий результат:

$$S \approx 5 \cdot (23.771220 + 23.727135 + 23.520360 + 23.435328 + 23.573573 + 23.735980 + 23.707048 + 23.538831 + 23.463089 + 23.573627 + 23.711983 + 23.693139 + 23.551762 + 23.482813 + 23.573690 + 23.694545 + 23.682901 + 23.561336 + 23.497593 + 23.573763) = 2360.348580.$$

Применяя метод трапеций, вместо горизонтальных отрезков точки на графике соединяются наклонными прямыми, образуя под графиком трапеции. Этот метод точнее метода прямоугольников, так как наклонная линия лучше аппроксимирует поведение функции на малом участке [1, с. 170].

$$s = \int_a^b f(x)\,d(x) \approx h \cdot \left(\frac{f(x_0) + f(x_n)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)\right). \quad (6)$$

Если взять $n = 10$, то получим:

$$S \approx 10 \cdot \left(\frac{23.573530 + 23.573763}{2} + (23.520360 + 23.573573 + 23.707048 + 23.463089 + 23.711983 + 23.551762 + 23.573690 + 23.682901)\right) = 2360.163805.$$

В случае $n = 20$ результат равен:

$$S \approx (\frac{23.573530 + 23.573763}{2} + (23.771220 + 23.727135 + 23.520360 + 23.435328 + 23.573573 + 23.735980 + 23.707048 + 23.538831 + 23.463089 + 23.573627 + 23.711983 + 23.693139 + 23.551762 + 23.482813 + 23.573690 + 23.694545 + 23.682901 + 23.561336 + 23.497593)) = 2360.3479975.$$

Метод Симпсона является самым точным из трех предыдущих методов. Здесь соединяются точки графика не прямыми линиями, а кусками парабол (квадратичных функций). Одна парабола строится

сразу по трем точкам, поэтому для этого метода количество отрезков разбиения обязательно должно быть четным.

Метод Симпсона дает минимальную погрешность для большинства гладких функций, так как кривая параболы очень близко ложится на реальный график [1, с. 175].

$$S \approx \frac{h}{3} \cdot \left(f(x_0) + f(x_n) + 4 \cdot \sum_{i=1}^{n} f(x_{2i-1}) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} f(x_{2i}) \right). \quad (7)$$

Используя разбиение $n = 10$ результат составит:

$$S \approx \frac{10}{3}(23.573530 + 23.573763 + 4 \cdot (23.727135 + 23.735980 + 23.573627 + 23.482813 + 23.561336) + 2 \cdot (23.435328 + 23.538831 + 23.693139 + 23.694545)) = 2360.648477.$$

При $n = 20$ имеем:

$$S \approx \frac{5}{3}(23.573530 + 23.573763 + 4 \cdot (23.771220 + 23.520360 + 23.573573 + 23.707048 + 23.463089 + 23.711983 + 23.551762 + 23.573690 + 23.682901 + 23.497593) + 2 \cdot (23.727135 + 23.435328 + 23.735980 + 23.538831 + 23.573627 + 23.693139 + 23.482813 + 23.694545 + 23.561336)) = 2360.409395.$$

Для объективной оценки точности рассмотренных алгоритмов результаты были сведены в единую таблицу. В качестве эталонного значения (с погрешностью, стремящейся к нулю) приведено число, вычисленное с высокой машинной точностью при $n \to \infty$ с использованием системы компьютерной алгебры (СКА). Анализ данных, представленных в таблице 2, позволяет сделать ряд важных заключений о применимости методов численного интегрирования для колебательных функций.

Таблица 2 — Сравнение результатов численного интегрирования на отрезке [25, 125]

Метод	Разбиения (n)	Результат	Погрешность (%)
Левых прямоугольников	10	2360.162640	0.0102609
	20	2360.347415	0.0024328
Правых прямоугольников	10	2360.164970	0.0101622
	20	2360.348580	0.0023835
Трапеций	10	2360.163805	0.0102116
	20	2360.3479975	0.0024081
Симпсона	10	2360.648477	0.0103218
	20	2360.409395	0.0001929
ЭВМ	$n \to \infty$	2360.4048398	~0

Для всех без исключения методов наблюдается закономерное снижение погрешности при увеличении числа разбиений от $n = 10$ до $n = 20$. Это подтверждает базовое правило численного анализа: чем мельче шаг интегрирования, тем точнее аппроксимация.

Сравнение простейших методов: методы левых и правых прямоугольников, а также метод трапеций демонстрируют схожий порядок погрешности на данных сетках разбиения (около $0{,}01$ для $n = 10$ и $0{,}002$ для $n = 20$). Это объясняется тем, что для функции, содержащей высокочастотные колебания (наш элемент синусоиды), линейная и ступенчатая аппроксимация на крупных шагах “срезает” экстремумы одинаково грубо.

Явным фаворитом выступает метод парабол. Если при $n = 10$ его погрешность сопоставима с остальными методами в силу того, что шаг слишком велик для захвата изгибов синусоиды, то точность

метода Симпсона возрастает колоссально при $n = 20$, погрешность падает до $0{,}00019$, что на порядок превосходит метод трапеций. Это доказывает, что квадратичная интерполяция оптимально подходит для гладких волнообразных функций.

В задачах транспортной телеметрии, где данные поступают пакетами и вычислительные ресурсы могут быть ограничены, выбор метода имеет решающее значение. Проведенное исследование показывает, что использование метода Симпсона позволяет достичь высокой точности даже при относительно небольшом количестве измерений $n = 20$, что экономит машинную память и время обработки данных по сравнению с методом прямоугольников, требующим для аналогичной точности сотен итераций.

Актуальность работы обусловлена необходимостью высокоточной обработки данных в системах транспортной телеметрии и робототехники, где скорость имеет колебательный характер. Научная новизна и ценность исследования заключаются в сравнительном анализе численных алгоритмов на примере функции, имитирующей динамику реального объекта. Практическая значимость состоит в обосновании выбора метода Симпсона для оптимизации бортовых вычислений, что обеспечивает экономию ресурсов при сохранении точности. В качестве вывода подтверждено, что для волнообразных функций квадратичная интерполяция является наиболее эффективным инструментом аппроксимации.

Список использованных источников:

1. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: учеб. пособие / Г.М. Фихтенгольц. – М. : Физмат лит, 2003. – 864 с.

2. Бермант, А.Ф. Краткий курс математического анализа : учеб. пособие / А.Ф. Бермант, И.Г. Араманович. – СПб. : Лань, 2008. – 736 с.

3. Stewart, J. Calculus : textbook / J. Stewart. – 8th ed. – Boston : Cengage Learning, 2015. – 1392 p.

4. Иродов, И.Е. Основные законы механики : учеб. пособие / И.Е. Иродов. – М. : Высшая школа, 1985. – 248 с.

5. Бахвалов, Н.С. Численные методы : учеб. пособие / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М. : Лаборатория знаний, 2011. – 636 с.

6. Burden, R.L. Numerical Analysis / R.L. Burden, J.D. Faires. – 9th ed. – Boston : Brooks/Cole, 2010. – 888 p.

UDC 517.38:519.61

MOTION MODELING USING DEFINITE INTEGRALS AND DISCRETE NUMERICAL METHODS

Solodovnicov E.A., Ryzhkov M.A. students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Primicheva Z. N. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Annotation. The paper explores the application of discrete numerical methods for calculating definite integrals in the context of kinematics modeling. A comparative analysis of accuracy is conducted for the left and right Riemann sums, the trapezoidal rule, and Simpson's rule by approximating the area under a velocity-time curve. The effectiveness of these algorithms is evaluated using a function that describes the non-uniform motion of a vehicle.

Keywords. Definite integral, numerical integration, motion modeling, rectangle method, trapezoidal rule, Simpson's rule, kinematics, computational mathematics, integration step, approximation error.

УДК 517.97 + 004.852

ГРАДИЕНТНЫЙ СПУСК И МЕТОДЫ ЕГО ОПТИМИЗАЦИИ

Сороколетов А.А., Блышко Н.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Малышева О.Н. - канд. физ. -мат. наук, доцент

Аннотация. В работе выполнен сравнительный анализ классического градиентного спуска и алгоритма Adam с позиций математического анализа и механической интерпретации. Показано, что градиентный спуск является схемой Эйлера для релаксации системы в поле потенциальных сил, а Adam реализует адаптивное диагональное предобуславливание на основе оценок первого и второго моментов стохастического градиента. Для квадратичной функции и функции Розенброка сопоставлены скорость сходимости, устойчивость к выбору шага.

Ключевые слова. градиентный спуск, Adam, оптимизация градиентного спуска, функция Розенброка, сходимость градиентного спуска, стохастический градиент, поле потенциальных сил.

Введение. Целью работы является сравнительный анализ классического градиентного спуска и алгоритма Adam с позиций математического анализа, методов машинного обучения и физической интерпретации динамики оптимизации.

В математике градиент функции ∇f(x) представляет собой вектор частных производных, направленный в сторону наибольшего роста функции. В задачах машинного обучения градиентный спуск используется для минимизации функции потерь L(w) → min по параметрам модели w. Стохастический градиент является оценкой точного градиента, вычисляемой по мини-выборке данных. Алгоритм Adam развивает этот подход, используя адаптивные оценки первого и второго моментов стохастического градиента для покоординатного выбора эффективного шага обучения.

Минимизация функции потерь $L(w)$ занимает центральное место в задачах машинного обучения и математической физики. Пространство параметров можно интерпретировать как конфигурационное пространство механической системы, а саму функцию потерь - как потенциальную энергию. Такая аналогия позволяет строго описывать методы оптимизации через уравнения движения и свойства диссипативных систем.

Основная часть.

1 Классический градиентный спуск. Для дифференцируемой функции $L(w)$ итерационный процесс имеет вид

Введем функцию потерь L(w) → min, которая интерпретируется как потенциальная энергия системы. Тогда антиградиент -∇L(w) задает поле потенциальной силы, а сам градиентный спуск описывает релаксацию системы в вязкой среде к состоянию минимальной энергии.

$$w_{t+1} = w_t - \eta \nabla L(w_t) \tag{1}$$

где $\eta > 0$ - шаг обучения. При переходе к непрерывному пределу $\tau = \eta t$ получаем уравнение релаксации

$$\frac{dw}{d\tau} = -\nabla L(w). \tag{2}$$

Оно совпадает с движением частицы в вязкой среде без инерционного члена. Для L-липшицева градиента изменение функции Ляпунова оценивается неравенством

$$L(w_{t+1}) - L(w_t) \leq -\eta \left(1 - \frac{\eta L}{2}\right) \| \nabla L(w_t) \|^2 \tag{3}$$

откуда при $0 < \eta < 2/L$ следует монотонное убывание функционала и сходимость метода. На квадратичной функции $L(w) = 1/2\, w^T A w$ скорость сходимости определяется спектральным радиусом матрицы перехода

$$\rho(I - \eta A) = \max_i |1 - \eta \lambda_i|. \tag{4}$$

При большом числе обусловленности минимум расположен в узкой долине, поэтому обычный градиентный спуск требует малого шага и сходится медленно.

2 Алгоритм Adam. В стохастической постановке вместо точного градиента используется оценка $g_t = \nabla \ell(w_t, \xi_t)$. Алгоритм Adam строит экспоненциальные скользящие средние первого и второго моментов:

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1) g_t, \tag{5}$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1-\beta_2) g_t^2. \tag{6}$$

Поскольку на первых шагах эти оценки смещены к нулю, вводятся поправки

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1-\beta_1^t}, \qquad \hat{v}_t = \frac{v_t}{1-\beta_2^t}, \tag{7}$$

после чего обновление параметров записывается в форме

$$w_{t+1} = w_t - \eta \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t} + \varepsilon}. \tag{8}$$

Таким образом, Adam автоматически уменьшает эффективный шаг в направлениях с высокой дисперсией градиента и ускоряет движение в более стабильных координатах. С физической точки зрения это эквивалентно адаптивному изменению «трения» вдоль различных направлений движения системы.

3 Численный эксперимент. Сравнение классического градиентного спуска и метода Adam проводилось авторами для квадратичной функции $f(x,y) = x^2 + 10y^2$ и для функции Розенброка

$$f(x,y) = (1-x)^2 + 100(y-x^2)^2, \tag{9}$$

которая моделирует узкий нелинейный овраг и является показательной для методов первого порядка. Численные расчеты показывают, что на хорошо обусловленной квадратичной функции SGD сходится немного быстрее, тогда как на функции Розенброка Adam выигрывает за счет адаптивного масштабирования шага и лучшей устойчивости к выбору параметра η.

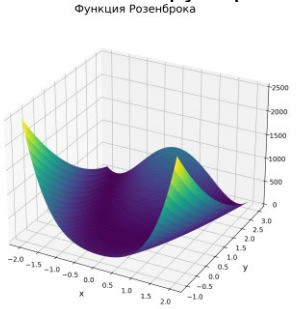


Рисунок 1 - График функции Розенброка

Для квадратичной функции выигрыш от адаптивности невелик, поскольку кривизна поверхности постоянна и одинакова по всем итерациям. Напротив, в узкой долине функции Розенброка эффективный шаг обычного градиентного спуска приходится выбирать слишком малым, что замедляет движение вдоль долины. Adam автоматически уменьшает шаг по жестким координатам и сохраняет более быстрое продвижение к минимуму по мягким направлениям.

Количественные результаты приведены в таблице 1. Они подтверждают, что Adam обеспечивает более высокую устойчивость к выбору шага обучения, хотя на простой квадратичной функции адаптивность не дает преимущества по числу итераций.

На рисунках 2 и 3 приведены кривые сходимости SGD и Adam для квадратичной функции и функции Розенброка. Графики наглядно демонстрируют, что на хорошо обусловленной поверхности различия между методами невелики, тогда как в узкой нелинейной долине адаптивное масштабирование Adam обеспечивает более устойчивое уменьшение функционала.

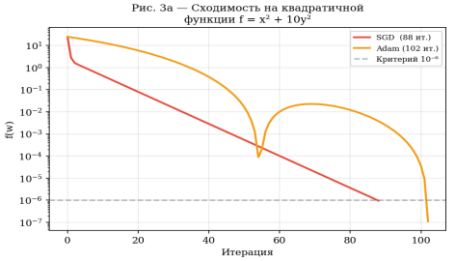


Рисунок 2 - Кривые сходимости SGD и Adam для квадратичной функции

На рисунке 2 обе кривые убывают устойчиво, причем SGD немного быстрее уменьшает ошибку на начальных итерациях. Для квадратичной функции кривизна поверхности постоянна, поэтому адаптивное изменение шага в Adam не дает заметного преимущества.

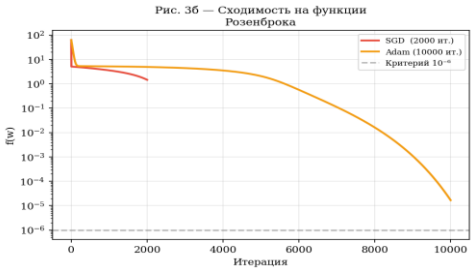


Рисунок 3 - Кривые сходимости SGD и Adam для функции Розенброка

На рисунке 3 SGD испытывает трудности при движении вдоль узкой искривленной долины и требует малого шага. Adam уменьшает шаг по жестким координатам и сохраняет более плавное продвижение к минимуму, поэтому спад функционала остается более устойчивым.

Таблица 1 - Сравнение числа итераций до достижения точности $f(w_t) < 10^{-6}$

Метод	**Квадратичная функция**	**Функция Розенброка**	**Устойчивость к выбору шага**
SGD	88	> 2000	Низкая
Adam	102	10 472	Высокая

Заключение. Градиентный спуск допускает строгую физико-математическую интерпретацию как диссипативное движение к минимуму потенциальной энергии. Алгоритм Adam развивает эту схему за счет адаптивного оценивания моментов и координатного предобусловливания. Проведенный анализ показывает, что классический SGD эффективен на простых и хорошо обусловленных задачах, тогда как Adam особенно полезен на сложных рельефах с резко различающейся кривизной по координатам.

Список использованных источников:

1. Kingma, D. P. Adam: A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. Ba // ICLR. - 2015.

2. Nesterov, Y. Lectures on Convex Optimization / Y. Nesterov. - 2nd ed. - Springer, 2018. - 589 p.

3. Bottou, L. Optimization Methods for Large-Scale Machine Learning / L. Bottou, F. Curtis, J. Nocedal // SIAM Review. - 2018. - Vol. 60, No. 2. - P. 223-311.

4. Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. - MIT Press, 2016.

UDC 517.97 + 004.852

GRADIENT DESCENT AND THE ADAM ALGORITHM: PHYSICAL-MATHEMATICAL ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS

Sorokoletov A.A., Blyshko N.V., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1]
Minsk, Republic of Belarus

Malysheva O.N. - PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Abstract. The paper compares classical gradient descent and the Adam algorithm from the viewpoints of mathematical analysis and physical interpretation. Gradient descent is treated as the Euler discretisation of a dissipative motion in a potential field, while Adam is interpreted as an adaptive preconditioned method based on first- and second-moment estimates of the stochastic gradient. Numerical experiments on a quadratic function and the Rosenbrock function demonstrate the influence of conditioning on convergence rate and show the practical advantage of Adam on ill-conditioned landscapes.

Keywords. gradient descent, Adam, optimisation, Rosenbrock function, convergence, stochastic gradient, potential energy.

УДК 519.61:004.93

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАТРИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ML

Булавин К.С, Степченков Р.О., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Степанова Т.С. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена исследованию эффективности применения сингулярного разложения (SVD) и анализа числа обусловленности матриц как метода интеллектуальной предобработки визуальных данных для нейросетевых моделей. Разработан гибридный алгоритм динамической аппроксимации, адаптирующий ранг разложения под информационную плотность кадра. Экспериментально доказано, что метод позволяет сократить объем передаваемых данных на 21,45% при сохранении точности детекции объектов (mAP@0.5) на уровне 96,2% от базовой модели YOLOv8n. Исследование ориентировано на применение в Edge-системах, БПЛА и автономном транспорте.

Ключевые слова. Матрица, сингулярное разложение, сингулярное число, SVD, машинное обучение, YOLOv8, сжатие данных, оптимизация, парето-эффективность, обработка изображений.

Современный мир пронизан визуальными потоками данных: от камер интеллектуальных транспортных систем до сенсоров беспилотных летательных аппаратов, анализирующих поверхность земли в реальном времени. Мы привыкли к тому, что разрешение камер растет, однако для алгоритмов машинного зрения это означает кратное увеличение размерности данных. Огромные массивы пикселей требуют колоссальных мощностей для передачи и обработки. В условиях ограниченной пропускной способности каналов связи и жестких лимитов энергопотребления периферийных устройств задача математически обоснованного сокращения избыточности данных без потери их значимости становится критически важной [1].

Традиционные методы сжатия (например, JPEG) ориентированы на человеческое восприятие, маскируя артефакты за счет особенностей зрения. Однако для нейронных сетей, чьи сверточные фильтры чувствительны к перепадам яркости и цвета, такие артефакты могут стать источником ложных срабатываний. Альтернативой выступают численные методы линейной алгебры, позволяющие «отсечь» информационный шум на коренном уровне.

Основой исследования является сингулярное разложение (SVD) [2]. Любое цифровое изображение может быть представлено в виде матрицы (1):

$$A \in \mathbb{R}^{m \times n} \tag{1}$$

Согласно теории, такая матрица разлагается на произведение трех матриц (2):

$$A = U\Sigma V^T \tag{2}$$

Где *U* и *V* – ортогональные матрицы, содержащие сингулярные векторы, которые характеризуют основные паттерны изображения, а $\sum$ – диагональная матрица с сингулярными числами, расположенными в порядке убывания для того, чтобы определить важность каждого паттерна в изображении. Суть оптимизации заключается во взятии матрицы до такого ранга разложения *k*, при котором она по-прежнему будет хранить наиболее важные параметры изображения.

Математическое обоснование снижения информационной емкости изображения при переходе к усеченному SVD заключается в сокращении числа хранимых элементов. Для исходной матрицы размерности $m \times n$ требуется хранить $m \cdot n$ значений. После упрощения матрицы до ранга k объем данных V_k определяется выражением (3):

$$V_k = k \cdot (m + n + 1) \tag{3}$$

Где V_k– суммарное количество элементов в усеченных матрицах U, Σ и V^T после упрощения, а m и n – размерности кадра. По данной формуле определяется теоретическое сжатие документа CR (4):

$$CR = \frac{m \cdot n}{k \cdot (m+n+1)} \tag{4}$$

Где CR – коэффициент сжатия данных на устройстве, $m \cdot n$ – количество элементов в исходной матрице, а $k(m + n + 1)$ – количество элементов в усеченной матрице.

В процессе исследования изначально предполагалось, что упрощение входных матриц через SVD позволит ускорить время работы самой нейросети на GPU. Однако экспериментальное тестирование на модели YOLOv8n показало, что время выполнения сверточных операций остается константным, так как архитектура сети требует фиксированной размерности входного изображения. Далее SVD-предобработка была переосмыслена как интеллектуальный фильтр низких частот, оптимизирующий пропускную способность канала передачи данных.

Для реализации метода был разработан гибридный алгоритм, динамически подбирающий ранг k так, чтобы сохранять стабильность системы ($\kappa < 10^6$), отсекая лишь те значения, которые являются незначительными по весу.

В качестве технического стека использовались язык Python 3.13, библиотека PyTorch для батчевых CUDA-вычислений [3] SVD на GPU и среда Wolfram Mathematica для финального анализа данных. В листинге 1 представлен ключевой фрагмент разработанного метода сжатия.

Листинг 1 – Программная реализация SVD-упрощения на GPU

```
def compress_dataset(rank, src_dir, dst_dir):
    dst_dir.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
    img_files =[f for f in os.listdir(src_dir) if f.endswith('.jpg')]

    for img_name in img_files:
        img = cv2.imread(str(src_dir / img_name))
        if img is None: continue

        # Перенос изображения в видеопамять и изменение размерности
        img_t = torch.from_numpy(img).float().to(DEVICE).permute(2, 0, 1)

        # Аппаратно-ускоренное вычисление SVD для RGB каналов
        U, S, Vh = torch.linalg.svd(img_t, full_matrices=False)

        k = min(rank, S.shape[1])
        # Формирование диагональной матрицы тензорным методом
        S_diag = torch.diag_embed(S[:, :k])

        # Реконструкция матрицы целевого ранга k
        reconstructed = U[:, :, :k] @ S_diag @ Vh[:, :k, :]

        # Нормализация и сохранение результата
        img_res = reconstructed.permute(1, 2, 0).clamp(0, 255).byte().cpu().numpy()
        cv2.imwrite(str(dst_dir / img_name), img_res)
```

В данном коде функция *torch.linalg.svd* выполняет математическое разложение исходного изображения на ортогональные матрицы U, V и диагональную матрицу сингулярных чисел S [4]. Переменная ранга k выступает в качестве программного параметра, регулирующего степень отсечения данных. Выражение $U \mathbin{@} S_{diag} \mathbin{@} V$ реализует обратную сборку изображения, где оператор @ выполняет высокоскоростное матричное умножение на тензорных ядрах видеокарты.

Для количественной оценки эффективности предложенного метода была проведена серия вычислительных экспериментов. В качестве тестового набора использовалась выборка из 5000 изображений валидационного сета COCO, обработанная с использованием различных рангов разложения k. Полученные статистические данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты влияния SVD-упрощения на показатели модели YOLOv8n

Ранг (k)	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95	Объем данных (МБ)	Сжатие (%)	Время SVD (мс)
Оригинал	0,5212	0,3710	776,96	0,00	0,00
50	0,3202	0,2166	526,59	32,22	91,82
75	0,4282	0,2973	566,06	27,14	94,59
100	0,4694	0,3293	588,59	24,24	94,06
150	**0,5013**	**0,3547**	**610,27**	**21,45**	**92,45**
200	0,5130	0,3646	617,77	20,49	90,46
300	0,5192	0,3701	619,53	20,26	93,09

Анализ данных таблицы 1 позволяет увидеть несколько закономерностей. Во-первых, наблюдается нелинейная зависимость точности от ранга: при увеличении k от 50 до 150 метрика mAP@0.5 возрастает на 56%, а дальнейшее увеличение ранга до 300 дает прирост на 3,5%. Это

свидетельствует о том, что главные характеристики объектов в изображении кодируются в первых 150 сингулярных числах.

Во-вторых, физический объем данных показывает взаимосвязь с рангом разложения. Ранг $k = 150$ обеспечивает сужение занимаемого пространства на 21,45%, что при пакетной передаче видеопотока позволяет существенно снизить нагрузку на сетевой интерфейс Edge-устройства. Было выявлено, что метрика mAP@0.5:0.95, отражающая точность локализации объектов при $k = 150$, составляет 0,3547, что на 4,4% ниже эталонного значения. Это подтверждает гипотезу о сохранении геометрической точности в изображении при использовании SVD-фильтрации.

Среднее время выполнения матричных преобразований на один кадр составляет порядка 90–96 мс при использовании CPU-предсказания. С учетом того, что предсказание YOLOv8n на мобильных GPU занимает порядка 10–15 мс [5], суммарная задержка возрастает. Данная задержка компенсируется сокращением времени передачи данных по сети. При экономии 21,45% переданных данных в сетях с низкой пропускной способностью (например, радиоканалы БПЛА со скоростью < 5 Мбит/с) выигрыш во времени компенсирует вычислительные затраты на SVD.

На рисунке 1 представлена зависимость метрики mAP@0.5 от выбранного ранга аппроксимации k (рисунок 1).

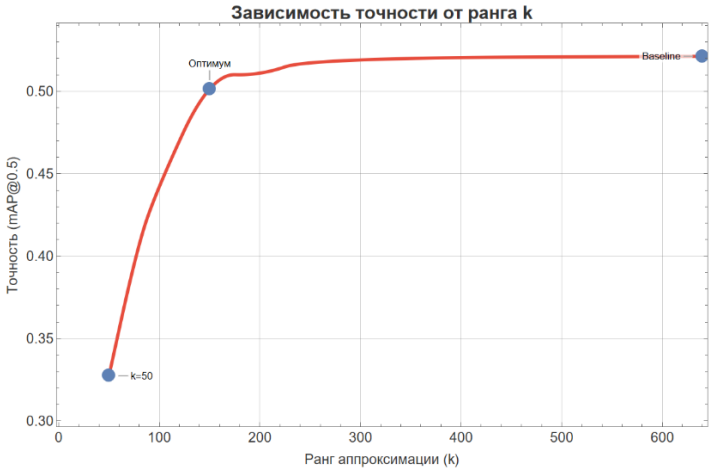


Рисунок 2 – Зависимость точности от ранга k

Как видно из графика, в диапазоне k от 50 до 150 наблюдается рост точности. Это подтверждает, что в первых сингулярных числах сосредоточена ключевая информация о геометрии объектов. После значения $k = 150$ кривая выходит на свой пик, где дальнейшее увеличение ранга практически не дает прироста точности, лишь увеличивая количество ненужных данных.

Наибольшую ценность для практического применения представляет анализ Парето-эффективности [6], отражающий компромисс между сжатием данных и сохранностью метрик модели (рисунок 2).

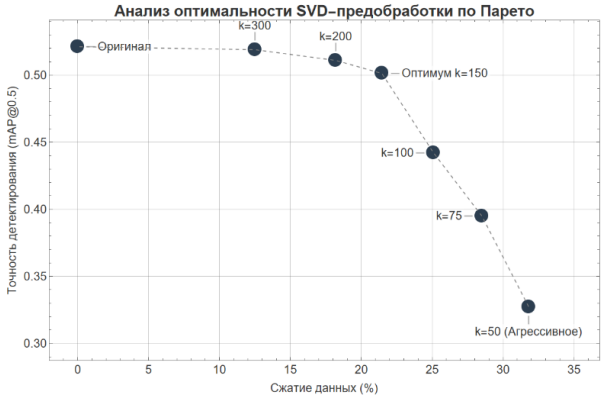


Рисунок 2 – Анализ Парето-эффективности

На графике четко выделяется точка перегиба при $k = 150$. В данной точке достигается сжатие данных на 21,45% (с 776,96 МБ до 610,27 МБ) при падении точности mAP@0.5 всего на 1,9% (с 0,5212

до 0,5013). Агрессивные режимы (например, $k = 50$) обеспечивают сжатие свыше 30%, однако приводят к деградации точности до 0,32, что недопустимо для систем безопасности. Таким образом, режим $k = 150$ является математически оптимальным.

Для стандартного входного изображения YOLOv8 размерностью 640×640 пикселей и выбранного оптимального ранга $k = 150$, коэффициент CR составляет (5):

$$CR = \frac{640 \cdot 640}{150 \cdot (640 + 640 + 1)} \approx 2{,}11 \quad (5)$$

Согласно формуле (5), при ранге $k = 150$ теоретический коэффициент сокращения физических данных составляет $CR \approx 2{,}11$. Однако экспериментальные данные (таблица 1) фиксируют реальное снижение объема файла на 21,45%. Данное расхождение обусловлено тем, что в рамках эксперимента реконструированная матрица A_k сохранялась в стандартном графическом формате (JPEG), который использует собственные алгоритмы сжатия (Discrete Cosine Transform) [7]. В результате этого, полученные 21,45% экономии представляют собой дополнительный прирост эффективности стандартных протоколов сжатия, достигнутый за счет предварительной очистки спектра матрицы.

В сценариях использования специализированных форматов хранения (например, запись напрямую коэффициентов разложения U и V в специально структурированные файлы), выигрыш в объеме будет стремиться к теоретическому пределу в 50–55% (в 2.1 раза). Однако в данной работе был выбран путь сохранения совместимости с нейросетевыми архитектурами, требующими стандартный входной формат изображения.

Математическое моделирование процесса в среде Wolfram Mathematica позволило вывести эмпирическую формулу зависимости точности от ранга (6):

$$mAP(k) \approx 0{,}0767 + 0{,}0759 \cdot \ln(k) \quad (6)$$

Данная логарифмическая зависимость позволяет прогнозировать поведение нейросетевых моделей при изменении параметров передачи данных.

В ходе работы была доказана эффективность численных методов матричных преобразований как инструмента предобработки. Предложенный комбинированный подход, объединяющий SVD-декомпозицию на ядрах CUDA и динамический выбор ранга, позволяет эффективно эксплуатировать нейросети в условиях ограниченных ресурсов. Эксперименты подтвердили, что оптимизация входного изображения методами линейной алгебры является не менее важным этапом, чем оптимизация архитектуры самой нейросети. Полученные результаты могут быть внедрены в системы видеонаблюдения и управления БПЛА для снижения нагрузки на каналы связи без потери качества распознавания объектов.

Список использованных источников:

1. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль. – М. : ДМК Пресс, 2018. – 652 с.

2. Кудрявцева, Н. А. Сингулярное разложение и его применение: учеб.-метод. пособие / Н. А. Кудрявцева ; Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2025. — 24 с.

3. Боресков, А.В. Основы работы с технологией CUDA / А.В. Боресков, А.А. Харламов. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 232 с.

4. Численные методы в компьютерной математике: пособие / Т.С. Степанова [и др.]. – Минск : БГУИР, 2025. – 128 с.

5. Подробные учебные пособия по Ultralytics YOLO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.ultralytics.com/ru/guides/ Дата доступа: 17.03.2026.

6. Ногин, В. Д. Множество и принцип Парето : учеб. пособие / В. Д. Ногин. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Изд.-полигр. ассоц. высш. учеб. заведений, 2022. – 110 с.

7. Исследование сокращения психофизической избыточности в алгоритме JPEG / Д. П. Горбукова [и др.] // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных. — 2024. — С. 12–18.

UDC 519.61:004.93

THE NUMERICAL METHODS OF MATRIX TRANSFORMATIONS FOR IMAGE PROCESSING OPTIMIZATION IN MACHINE LEARNING

Bulavin K.S, Stsepchankou R.O. students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Stepanova T.S. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. The paper investigates the effectiveness of using Singular Value Decomposition (SVD) and matrix condition number analysis as a method for intelligent image preprocessing. A hybrid dynamic approximation algorithm has been developed. It is experimentally proved that the method reduces the data volume by 21.45% while maintaining the accuracy (mAP@0.5) at 96.2% of the baseline YOLOv8n model.

Keywords. Matrix transformations, SVD, condition number, approximation, machine learning, YOLOv8, data compression, Pareto efficiency.

УДК 517.443

СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ И ЕГО ПРИКЛАДНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Терёхин Б.В., Гайдук Н.И., Мухин З.С. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лущакова И.Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной работе изложены теоретические основы преобразования Фурье и рассмотрены его основные области применения в различных прикладных дисциплинах. Описано явление эффекта Гиббса, приведена теорема Котельникова. Предложена формула для расчёта среднеквадратической погрешности аппроксимации функции с помощью конечного числа членов ряда Фурье. Рассмотрена концепция дискретного преобразования Фурье и алгоритм алгоритм быстрого преобразования Фурье, эффективно реализующий её. Разработано приложение, использующее алгоритм быстрого преобразования Фурье, которое позволяет визуализировать спектр функции.

Ключевые слова. Ряд Фурье, преобразование Фурье, спектр функции, области применения преобразования Фурье, среднеквадратическая погрешность, эффект Гиббса, теорема Котельникова, дискретное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, спектральная утечка.

1. Теоретические основы спектрального представления функций. Спектральное представление функции – это разложение сложных функции (сигнала) на сумму более простых гармонических колебаний. Такое разложение осуществляется с использованием ряда Фурье и преобразования Фурье.
Ряд Фурье – это представление периодической функции f с периодом T в виде:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right)\right), \tag{1}$$

где a_0, a_k и b_k – коэффициенты ряда Фурье.
Нулевой член ряда является постоянным значением и равняется среднему значению функции f на интервале, равном периоду T:

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt \tag{2}$$

Коэффициенты a_k и b_k находятся по следующим формулам:

$$a_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right)dt \tag{3}$$

$$b_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right)dt \tag{4}$$

Для нахождения членов ряда Фурье также удобно использовать комплексные числа, руководствуясь тождеством:

$$e^{it} = \cos t + i\sin t \tag{5}$$

Тогда k-й коэффициент ряда Фурье c_k можно найти по следующей формуле:

$$c_k = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)e^{-i\frac{2\pi kt}{T}}dt \tag{6}$$

Модуль такого комплексного числа равняется половине амплитуды, а аргумент отвечает за сдвиг соответствующей синусоиды.
Ряд Фурье в комплексной форме для функции f принимает вид:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{i\frac{2\pi kt}{T}} \tag{7}$$

Преобразование Фурье можно назвать обобщением ряда Фурье для непериодических функций. Преобразование Фурье функции $g(t)$ определяется как:

$$\mathcal{F}\{g(t)\} = G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-2\pi ift}dt \quad (8)$$

Результатом является функция G от частоты f. Таким образом, $G(f)$ показывает, какой вклад в функцию $g(t)$ вносит частота f, поэтому функцию $G(f)$ можно назвать спектром функции $g(t)$.
Существует и обратное преобразование Фурье, позволяющее восстановить исходную функцию $g(t)$ из функции $G(f)$:

$$\mathcal{F}^{-1}\{G(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{2\pi ift}df = g(t) \quad (9)$$

2. Основные области применения преобразования Фурье.

Преобразование Фурье является одним из важнейших инструментов прикладных дисциплин, так как оно позволяет переходить от представления функции (сигнала) во временной или пространственной области к частотному представлению, где многие задачи становятся более наглядными и удобными для решения. Благодаря этому свойству преобразование Фурье широко применяется не только в математике, но и в информатике, физике, астрономии и множестве других областей. Рассмотрим основные применения преобразования Фурье на конкретных примерах.

2.1. Применение преобразования фурье в математике

2.1.1. Быстрое перемножение полиномов и чисел. При помощи алгоритма быстрого преобразования Фурье (бпф) можно ускорить процесс перемножения двух полиномов, уменьшив количество операций с $O(n^2)$ до $O(n * \log_2 n)$, где n – степень итогового полинома. Использование преобразования Фурье позволяет перевести полиномы, заданные коэффициентами, в их значения в специальных точках, представленных комплексными числами. Далее производится почленное перемножение полученных значений за линейное количество операций. Наконец, для получения результата применяется обратное преобразование Фурье, возвращающее результат из вида точек обратно в форму коэффициентов итогового полинома.

Этот же способ можно использовать для перемножения чисел. Для этого требуется записать числа в позиционном представлении как полиномы, затем эффективно перемножить их способом, описанным выше, и выполнить перенос разрядов.

2.1.2. Нахождения всех возможных комбинаторных сумм

Рассмотрим задачу, в которой нам даны два массива чисел A и B и требуется найти все возможные суммы вида $\mathrm{A[i]} + \mathrm{B[j]}$, где $1 \le i \le n, 1 \le j \le m$, n и m – длины массивов A и B соответственно. Для каждой возможной суммы требуется посчитать количество способов её получить. Для этого сначала требуется построить два полинома для массивов A и B, в которых числа массива будут являться степенями полинома, а коэффициенты будут показывать количество вхождений соответствующего числа в массив. После эффективного перемножения этих двух полиномов способом, описанным выше, получается полином C, в котором степени будут являться всеми возможными суммами, которые можно получить, а соответствующие коэффициенты будут обозначать количество способов их получить.

2.2. Применение преобразования фурье в информатике

2.2.1. Сжатие звуковых файлов и изображений, шумоподавление

В обработке звука и изображений преобразование фурье используется для уменьшения количества памяти, занимаемого файлами. В случае звукового файла сигнал разбивается на короткие временные промежутки, для каждого из которых вычисляют спектр. Далее коэффициенты, соответствующие частотам, неслышимым уху человека, отбрасываются. При шумоподавлении такой подход также позволяет выявлять и подавлять шумы определённых частот. Затем в файле сохраняются оставшиеся коэффициенты спектра для каждого временного промежутка. Для воспроизведения такого звукового файла применяется обратное преобразование Фурье, в результате которого мы получаем звуковой сигнал, достаточно близкий к исходному. Подобный модифицированный способ сжатия звуковых файлов используется форматом MP3.

При сжатии изображений цветовые каналы обрабатываются по отдельности, так как каждый из них определяет яркость пикселей в данном канале, которую можно интерпретировать как амплитуду. Изображение также разбивается на маленькие блоки пикселей, к которым применяется преобразование Фурье. Низкие частоты в картинке представляют собой плавные переходы цвета, а высокие частоты – резкие. Далее амплитуда каждой частоты делится на соответствующее предопределённое число, которое тем выше, чем выше частота. Из-за этого большое количество высоких частот, незаметных

человеческому глазу, превращается в нули, что позволяет уменьшить количество информации об изображении, хранящейся в файле. Для восстановления изображения из такого файла используется обратное преобразование Фурье. Подобный модифицированный способ сжатия изображений используется форматом JPEG.

2.3. Применение преобразования фурье в физике

2.3.1. Решение дифференциальных уравнений теплопроводности

При решении уравнений теплопроводности начальное распределение температуры представляется в виде суммы гармонических составляющих. Для каждой такой составляющей уравнение решается отдельно, а затем по принципу линейности все частные решения складываются, что даёт решение исходной задачи. Этот способ упрощает решение исходного дифференциального уравнения, разбивая его на части, которые в отдельности решаются гораздо проще, а затем собирая их в итоговый ответ.

2.4. Применение преобразования фурье в астрономии

2.4.1. Анализ света, испускаемого небесными телами

В астрономии преобразование Фурье используется при анализе света, полученного от звёзд и других небесных объектов. Полученный свет рассматривается как сигнал, составленный из волн различной длины, и исследуется его спектр. По спектру света можно определить, из каких химических элементов состоит небесное тело, а также узнать некоторые его физические свойства.

3. Погрешность при аппроксимации функции с помощью ряда фурье. При аппроксимации функций с точками разрыва 1-го рода с помощью ряда фурье вблизи точек разрыва возникают колебания, или всплески. Это поведение называют эффектом гиббса. При увеличении числа членов ряда фурье такие всплески не исчезают полностью: их ширина уменьшается, стремясь к нулю при приближении числа членов ряда фурье к бесконечности, но высота остаётся прежней. Стоит отметить, что эффект гиббса возникает только вблизи точек разрыва 1-го рода. Если функция непрерывна, но имеет резкие изменения значения, вблизи таких изменений при конечном числе членов ряда фурье могут возникать подобные колебания, однако их амплитуда стремится к нулю при приближении числа членов ряда фурье к бесконечности.

Для вычисления погрешности аппроксимации функции f с помощью N первых членов ряда Фурье воспользуемся формулой среднеквадратической погрешности:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T |f(t) - g(t)|^2 dt} \tag{10}$$

Подставим в качестве функции $g(t)$ сумму первых N членов ряда Фурье и получим:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left| f(t) - \sum_{k=-N}^{N} c_k e^{i\frac{2\pi kt}{T}} \right|^2 dt} \tag{11}$$

4. Алгоритмы реализации преобразования Фурье. В информатике используются алгоритмы так называемого дискретного преобразования фурье (дпф), поскольку компьютеры оперируют исключительно дискретными величинами. Дпф позволяет перевести дискретные значения сигнала из временной формы в частотную, распределяя вклад частот по соответствующим ячейкам итогового массива. При этом точность вычислений напрямую зависит от длины анализируемого отрезка сигнала: чем длиннее интервал, тем меньше становится шаг между соседними частотными ячейками в полученном массиве, позволяя различить более близкие по значению частоты, которые при меньшей длине анализируемого отрезка слились бы в общую частотную составляющую. Ширина одной частотной ячейки итогового массива, или минимальная различимая разница между соседними частотами, вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta f = \frac{1}{T}, \tag{12}$$

где T – длительность анализируемого интервала.

Существует теорема Котельникова, утверждающая, что любую функцию $f(t)$, состоящую из частот от 0 до f_{max}, можно непрерывно передавать с любой точностью при помощи чисел, следующих друг за другом через интервалы времени, вычисляемые по следующей формуле:

$$\Delta x = \frac{1}{2f_{max}}, \tag{13}$$

где f_{max} – наибольшая частота, присутствующая в спектре функции.

То есть, согласно этой теореме, частота дискретизации должна как минимум в два раза превышать верхнюю границу его спектра, чтобы избежать потерю данных и некорректное восстановление исходного сигнала. Увеличение же частоты дискретизации сигнала выше этого минимального порога при неизменной длине анализируемого отрезка сигнала всё ещё позволяет снизить значение среднеквадратической погрешности за счёт усреднения шума и повышения точности интерполяции.

На практике используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), так как он выполняет $O(n * \log_2 n)$ операций, тогда как «наивная» реализация выполняет $O(n^2)$ операций, где n – количество дискретных значений сигнала, поданных на вход. Основная идея БПФ заключается в применении принципа «разделяй и властвуй». Исходная последовательность разделяется на две части – элементы с чётными и нечётными индексами. Затем преобразование Фурье вычисляется отдельно для каждой из этих частей, после чего полученные результаты объединяются. Благодаря этому удаётся многократно переиспользовать промежуточные результаты вычислений и существенно сократить число выполняемых операций.

5. Визуализация преобразования фурье. С целью наглядно увидеть результат работы алгоритма дискретного преобразования фурье было разработано приложение. Оно позволяет создать функцию с помощью суммирования произвольного количества синусоид, параметры которых, такие как частота, амплитуда и сдвиг, задаются пользователем. Далее, чтобы однозначно передать полученную функцию, дискретные значения функции высчитываются в точках с шагом, не превышающим Δx, вычисляемым согласно формуле (13). Затем дискретизированные данные передаются на вход алгоритма быстрого преобразования фурье, после чего строятся графики. Интерфейс приложения и демонстрация дискретного преобразования фурье функции, состоящей из двух синусоид с частотами 3 и 5 гц, приведены на рисунке 1.

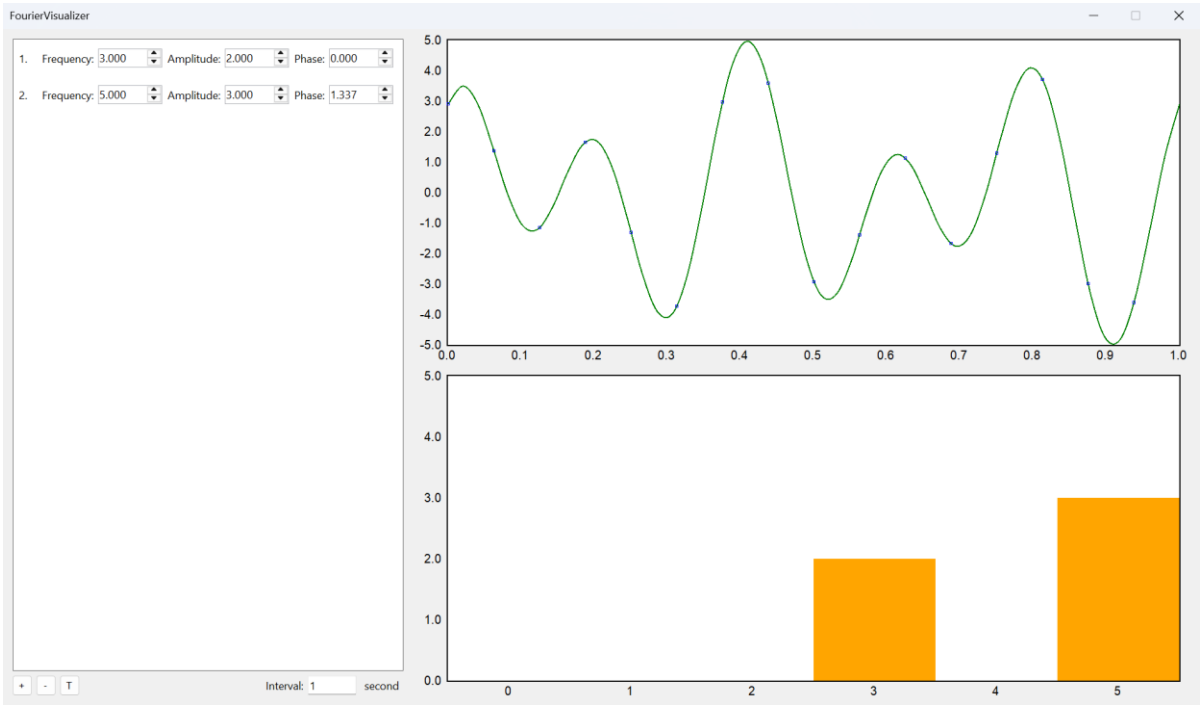


Рисунок 1 – Интерфейс разработанного приложения

Интерфейс приложения имеет 3 основных панели. В левой части интерфейса пользователь может добавлять произвольное количество синусоид, сумма которых образует функцию, и редактировать их параметры. В правой части интерфейса расположены 2 графика. На верхнем графике изображена исходная функция с нанесёнными на неё точками дискретизации. На нижнем графике – результат работы дискретного преобразования Фурье. В данной ситуации алгоритм в точности определяет частоты и амплитуды синусоид, составляющих исходную функцию. Шаг между соседними ячейками результата вычисляется по формуле (12) и в данном случае равняется 1 Гц, так как длительность анализируемого интервала равняется 1 секунде, что можно видеть под первой панелью. При увеличении длительности анализируемого интервала в 4 раза, шаг между соседними ячейками результата уменьшится в такое же количество раз, позволяя теперь различать частоты с разницей 0.25 Гц, что можно видеть на рисунке 2.

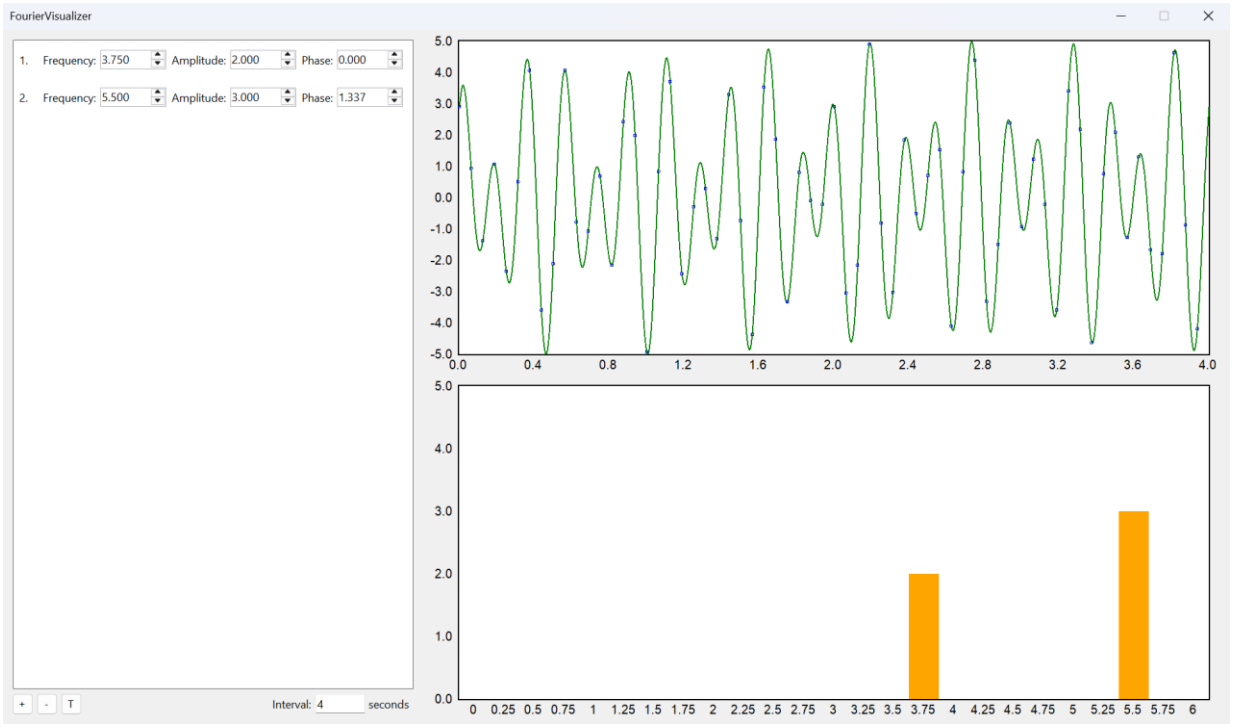


Рисунок 2 – Результат дискретного преобразования Фурье при длительности анализируемого интервала в 4 секунды

Если же изменить частоты синусоид, образующих исходную функцию, таким образом, чтобы они не были кратны шагу между соседними ячейками итогового массива, тогда можно будет наблюдать эффект, называемый «спектральной утечкой» (от англ. spectral leakage). Спектральная утечка возникает потому, что при несоблюдении кратности в указанный отрезок времени помещается не целое число периодов волн, в результате чего конечное значение сигнала не совпадает с его начальным значением. Поскольку алгоритм дискретного преобразования Фурье воспринимает анализируемый фрагмент данных как бесконечно повторяющийся, то в местах соединения фрагментов возникает разрыв 1-го рода и образуется скачок функции, что приводит к возникновению дополнительных частотных составляющих. Данный эффект изображён на рисунке 3.

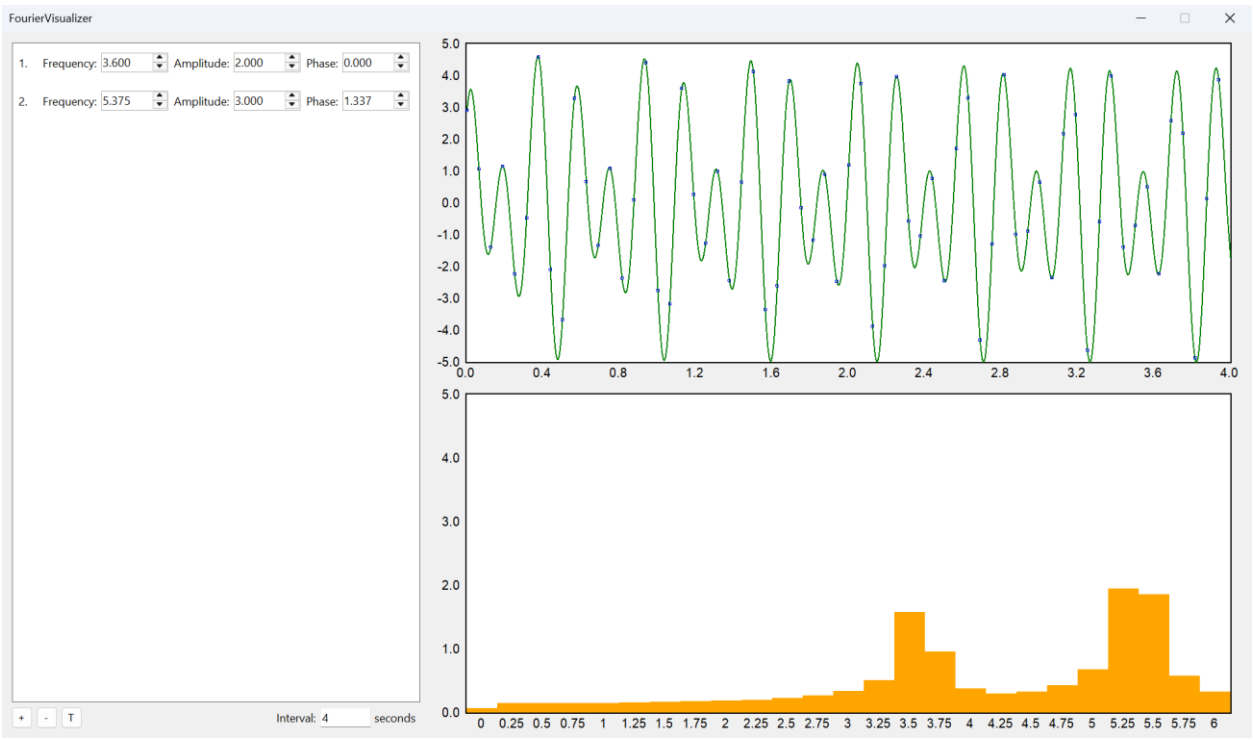


Рисунок 3 – Демонстрация спектральной утечки

Для решения проблемы спектральной утечки используются оконные функции, на которые умножается исходный сигнал перед выполнением дискретного преобразования Фурье. Такой подход позволяет плавно снизить амплитуду сигнала у его границ, что существенно сглаживает разрыв в местах соединения фрагментов.

Список использованных источников:

1. Fourier Series [Электронный ресурс] // The Fourier Transform. – Режим доступа: URL: https://thefouriertransform.com (дата доступа: 02.04.2026)

2. Fast Fourier transform [Электронный ресурс] // Algorithms for Competitive Programming. – Режим доступа: URL: https://cp-algorithms.com/algebra/fft.html (дата доступа: 04.04.2026)

3. The Applications of Fourier Analysis in Audio Compression [Электронный ресурс] // Medium. – Режим доступа: URL: https://medium.com/@27ane/the-applications-of-fourier-analysis-in-audio-compression-800f0f7fe9a3 (дата доступа: 05.04.2026)

4. JPEG [Электронный ресурс] // Wikipedia. – Режим доступа: URL: https://en.wikipedia.org/wiki/JPEG (дата доступа: 05.04.2026)

5. Solving the heat equation | DE3 [Видеозапись] // YouTube. – Режим доступа: URL: https://www.youtube.com/watch?v=ToIXSwZ1pJU (дата доступа: 11.04.2026)

6. Gibbs phenomenon [Электронный ресурс] // Wikipedia. – Режим доступа: URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Gibbs_phenomenon (дата доступа: 12.04.2026)

7. Nyquist–Shannon sampling theorem [Электронный ресурс] // Wikipedia. – Режим доступа: URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon_sampling_theorem (дата доступа: 13.04.2026)

8. Spectral leakage [Электронный ресурс] // Wikipedia. – Режим доступа: URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_leakage (дата доступа: 19.04.2026)

UDC 517.443

SPECTRAL REPRESENTATION OF FUNCT IONS AND ITS APPLICATIONS

Teryokhin B.V., Gaiduk N.I., Mukhin Z.S., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Lushchakova I.N. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. This article presents the theoretical foundations of the Fourier transform and examines its main applications in applied disciplines. The Gibbs phenomenon is described, the Kotelnikov (Nyquist–Shannon) theorem is stated. A formula is proposed for calculating the root mean square error when a function is approximated by a finite number of terms of the Fourier series. The concept of the discrete Fourier transform and the algorithm that efficiently implements it, the fast Fourier transform algorithm, are considered. An application based on the fast Fourier transform algorithm has been developed, which makes it possible to visualize the spectrum of a function.

Keywords. Fourier series, Fourier transform, spectrum of a function, applications of the Fourier transform, root mean square error, Gibbs phenomenon, Kotelnikov (Nyquist–Shannon) theorem, discrete Fourier transform, fast Fourier transform, spectral leakage.

УДК 003.26-021.333

ИДЕАЛЬНАЯ КРИПТОСИСТЕМА. ШИФР ВЕРНАМА.

Ципко А.И., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Баркова Е.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрена концепция идеальной криптосистемы и приведены доказательства ее существования. Продемонстрирована работа шифра Вернама, представлены преимущества и недостатки этой системы, предложены перспективы развития.

На протяжении всего существования человечества необходимо было передавать секретные сообщения. Идея создания невзламываемого шифра многократно разбивалась об острые умы криптоаналитиков, но в конце концов удалось сформулировать концепцию идеальной криптосистемы, которую невозможно взломать. Настоящая работа посвящена поиску доказательств существования идеальной криптосистемы, перечню требований к ней и демонстрации работы совершенно-криптостойкого шифра.

Как известно, энтропия - характеристика системы, определяющая меру ее неопределенности и вычисляющаяся по формуле [1]:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} P(x_i \in X) * log_2(P(x_i \in X), \quad (1)$$

где основание логарифма - система счисления подсчета энтропии (в нашем случае энтропия считается в битах).

Идеальная (совершенная) криптосистема - метод шифрования, шифротекст которого не раскрывает абсолютно никакой новой информации о сообщении. Исходя из данного определения вытекает следующее уравнение:

$$H(M|C) = H(M), \quad (2)$$

неопределенность сообщения независима от шифротекста. Или иначе:

$$P(M|C) = P(M), \quad (3)$$

апостериорная вероятность сообщения из множества M, при условии знания шифротекста $c_i \in$C равна априорной. Взяв это условие за основу, начнем выводить требования для его выполнения.

Воспользуемся теоремой Байеса, позволяющей взглянуть иначе на определение идеальной криптосистемы в вероятностном виде:

$$P(M|C) = \frac{P(C|M)P(M)}{P(C)} \rightarrow P(C|M) = P(C). \quad (4)$$

Результатом является независимость некоторого шифротекста из множества C от любого из сообщений. Для дальнейшей работы необходимо определить, что некоторый шифротекст $c_i \in$C является результатом работы некоторой функции E (применение метода шифрования):

$$c_i = E_k(m).$$

Применим закон полной вероятности [2] для условной вероятности P(C|M):

$$P(c_t \in \mathrm{C}|m_t \in \mathrm{M}) = \sum_{i=1}^{n} P(c_t \in \mathrm{C}|k_i, m_t \in \mathrm{M}) * P(k_i|m_t \in \mathrm{M}), \quad (5)$$

где c_t - это шифротекст, который получается применением к сообщению m_t некоторого ключа. Благодаря этому действию мы можем связать вероятность появления c_t при условии знания m_t с ключом $k_i \in K$.

Пусть далее ключ выбирается независимо от сообщений:

$$P(k_i|\mathrm{M}) = P(k_i), \tag{6}$$

и данная криптосистема является детерминированной, то есть одна и та же пара сообщения и ключа всегда даст один и тот же шифротекст. И в обратную сторону, используя получившийся шифротекст и ключ, который использовался, мы однозначно восстановим исходное сообщение. Тогда формула (5) примет новый вид:

$$P(c_t \in \mathrm{C}|m_t \in M) = \sum_{i=1}^{n} P(c_t \in \mathrm{C}|k_i, m_t \in M) * P(k_i), \tag{7}$$

Как было сказано ранее, наша система детерминирована, тогда

$$P(c_t \in \mathrm{C}|k_i, m_t \in \mathrm{M}) = 1$$

при условии, что k_i - это ключ, применив который к m_t мы получим c_t, назовем его альфа ключ, а также

$$P(c_t \in \mathrm{C}|k_i, m_t \in \mathrm{M}) = 0$$

для всех остальных случаев.

Действительно, так как к определенному шифротексту для некоторого исходного сообщения приводит лишь один единственный ключ, то заменяя только что-то одно из пары сообщение-ключ (либо ключ, либо сообщение) мы никогда снова не получим этот шифротекст, только если поменять и сообщение, и ключ, что не имеет никакого смысла. Тогда, рассматривая все возможные ключи, примененные к разным сообщениям, получим, что одна часть всех возможных сумм уравнения (7) будет равна нулю, а другая будет равна сумме вероятностей появления альфа ключа:

$$P(c_t \in \mathrm{C}|m_t \in M) = \sum_{k:E_k(m_t)=c_t}^{n} P(k). \tag{8}$$

Далее необходимо, чтобы для любого m_t уравнение было верным. Этого можно добиться полным контролем распределения вероятностей множества ключей, синхронизирующимся с множеством сообщений, что довольно сложно. Есть еще один вариант, полностью противоположный - абсолютная непредсказуемость - равномерное распределение вероятностей множества ключей. Для второго варианта достаточно лишь добиться для всех ключей равновероятности - одно условие для всего множества. Выбирая этот способ, мы получаем следующие требования:

1. Шифрующий ключ используется всегда один раз.
2. Множество ключей K обладает равномерным распределением вероятностей.

Эти два требования обеспечивают выполнение равенства (4), так как никакое сообщение никогда не изменит вероятность появления шифротекста.

Для дальнейшей работы введем определение [1; 3]:
Условная энтропия - величина, рассчитываемая по формуле

$$H(X|Y) = -\sum_{k=1}^{p} P(y_k \in Y) \sum_{i=1}^{n} P(x_i \in X|y_k \in Y) * log_2 P(x_i \in X|y_k \in Y), \tag{9}$$

преобразуем полученное равенство занесением $P(y_k \in Y)$ под знак первой суммы, умножением на условную вероятность $P(x_i \in X|y_k \in Y)$. В результате получим совместную вероятность $P(x_i \in X, y_k \in Y)$. Следовательно формула (9) примет новый вид:

$$H(X|Y) = -\sum_{i=1,k=1}^{n,p} P(x_i \in X, y_k \in Y) * log_2 P(x_i \in X|y_k \in Y). \quad (10)$$

По теореме умножения распишем совместную вероятность трех событий:

$$P(X,Y,Z) = P(X|Y,Z) * P(Y|Z) * P(Z). \quad (11)$$

Найдем совместную энтропию для трех событий:

$$H(X,Y,Z) = -\sum P(X,Y,Z) log_2 P(X,Y,Z) =$$

$$= -\sum P(X,Y,Z) log_2 P(X|Y,Z) - \sum P(X,Y,Z) log_2 P(Y|Z) - \sum P(X,Y,Z) log_2 P(Z). \quad (12)$$

Рассмотрим слагаемые детально по отдельности:

$$-\sum P(X,Y,Z) log_2 P(Z) = -\sum_z \sum_y \sum_x P(X,Y,Z) log_2 P(Z) = \sum_z log_2 P(Z) \sum_{x,y} P(X,Y,Z).$$

Найдем маргинальную вероятность [4] события Z, суммируя совместную вероятность $P(X,Y,Z)$ по X и Y, тогда получим:

$$-\sum_z P(Z) log_2 P(Z) = H(Z),$$

- по определению энтропии.

$$-\sum P(X,Y,Z) log_2 P(X|Y,Z) = H(X|Y,Z),$$

- по уравнению (10).

Для оставшегося слагаемого воспользуемся сначала маргинализацией, затем уравнением (10):

$$-\sum P(X,Y,Z) log_2 P(Y|Z) = H(Y|Z).$$

Таким образом было доказано, что разложение энтропии некоторой системы событий* X на сумму энтропий новых преобразованных систем событий $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ повторяет преобразование X при разложении ее вероятности на множители с эквивалентными системами событий $Y_1, Y_2 \dots Y_n$. Назовем это свойствами связи энтропии и вероятностей. Это объясняется особенностями логарифма, присутствующего в формуле энтропии.

*Будем называть системой событий любое множество событий, пересечение и/или объединение множеств событий.

Рассмотрим следующие преобразования, руководствуясь свойствами связи и приведенными определениями:

$$H(K|C) = H(K|C) + H(M|K,C) = H(M,K|C),$$

где $H(M|K,C) = 0$

$$H(M,K|C) = H(M|C) + H(K|M,C) = H(K|C),$$

$H(K|M,C) \geq 0$, т.к. по определению энтропия не может быть меньше нуля, следовательно

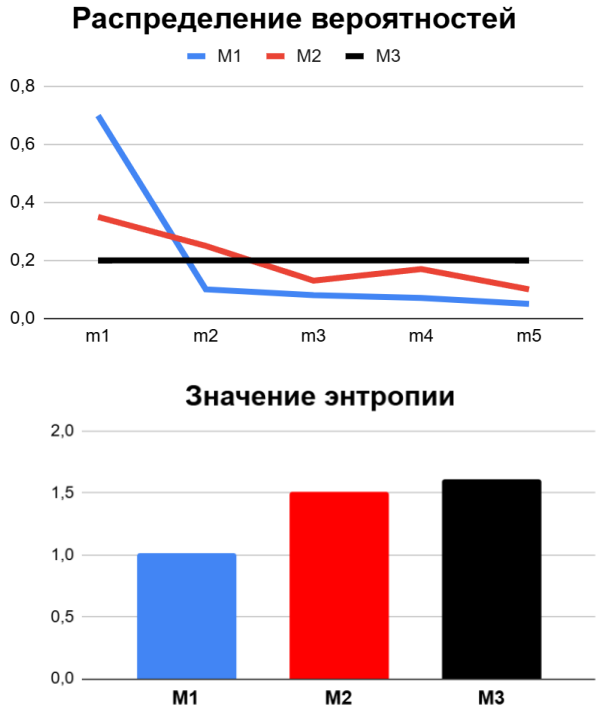
$$H(K|C) \geq H(M|C) \rightarrow H(K) \geq H(M). \quad (13)$$

Результатом этих преобразований является следующее утверждение: “Энтропия ключа должна быть не меньше энтропии сообщения”.

Как уже было определено, распределение вероятностей ключа должно быть равномерным, тогда неопределенность ключа полностью зависит от мощности множества ключей, которая зависит от длины ключа.

$$H(K) = -\sum \frac{1}{|K|} log_2 \frac{1}{|K|} = |K| * \frac{1}{|K|} * log_2 |K| = log_2 |K|. \quad (14)$$

Рассмотрим динамику изменения энтропии в зависимости от распределения вероятностей этого множества событий на примере из пяти элементов для трех множеств:



По графикам видно, что энтропия максимальна при равномерном распределении вероятностей. Тогда для анализа энтропии сообщения неравенства (13) достаточно рассмотреть максимальную энтропию сообщения, то есть когда все сообщения равновероятны:

$$H(M)_{max} = -\sum \frac{1}{|M|} log_2 \frac{1}{|M|} = |M| * \frac{1}{|M|} * log_2|M| = log_2|M|. \quad (15)$$

На основании последних двух уравнений делаем вывод, что длина ключа должна быть не меньше длины сообщения:

$$H(K) \geq H(M) \rightarrow L(K) \geq L(M). \quad (16)$$

Только что мы вывели третье требование к системе. Таким образом совершенная криптосистема - это такая криптосистема, которая удовлетворяет следующим требованиям:

1. Шифрующий ключ используется всегда один раз.
2. Множество ключей K обладает равномерным распределением вероятностей.
3. Длина ключа должна быть не меньше длины сообщения.

Было доказано, что существует криптосистема, которая является идеальной, это шифр Вернама. Мною написана программа, реализующая и демонстрирующая работу этой криптосистемы

```
Введите сообщение:
BSUIR
Вы ввели:
BSUIR

len = 48
Сообщение в двоичном коде     01000010 01010011 01010101 01001001 01010010 00001010
                              ++++++++ ++++++++ ++++++++ ++++++++ ++++++++ ++++++++
Ключ                          00001000 10101000 10000010 00000010 10011011 00100000
                              ======== ======== ======== ======== ======== ========
Шифротекст                    01001010 11111011 11010111 01001011 11001001 00101010
ЈыЧКЙ*
Зашифрованное сообщение
ЈыЧКЙ*

Шифротекст в двоичном коде    01001010 11111011 11010111 01001011 11001001 00101010
                              ++++++++ ++++++++ ++++++++ ++++++++ ++++++++ ++++++++
Ключ                          00001000 10101000 10000010 00000010 10011011 00100000
                              ======== ======== ======== ======== ======== ========
Результат                     01000010 01010011 01010101 01001001 01010010 00001010

BSUIR
```

Принцип работы предельно простой: каждый символ кодируется битами согласно таблице ASCII, далее генерируется ключ, длиной, равной длине сообщения (в данном случае + 8 бит в конце для управляющего символа). Ключ должен генерироваться равновероятно для всех возможных вариантов $2^{L(K)}$. После этого производится последовательное сложение по модулю 2 соответствующих битов сообщения и ключа. Для расшифровки к результату предыдущей операции снова применяется тот же секретный ключ.

Для практической оценки надежности данного метода представим следующее: злоумышленник пытается расшифровать перехваченное послание. Он уже знает, каким образом шифровалось полученное им сообщение. Также предположим, что у него есть бесконечное количество времени на взлом и бесконечные вычислительные мощности. Так или иначе, если не получается обнаружить закономерности или уязвимости шифра, которые помогли бы определить исходное сообщение, всегда можно перебрать все возможные варианты, чем злоумышленник и займется. Для шифротекста “JыЧКЙ*“ таких вариантов получится 2^{40} - столько сообщений в результате получит злоумышленник, из которых лишь 12-15 тысяч* будут иметь значение. Какое слово из 12-15 тысяч было зашифровано? Этого ни он, ни кто-либо другой никогда не узнают без альфа ключа, не говоря уже про то, что сообщение могло быть обманкой и вообще не иметь смысла. Это практическая суть идеальной криптосистемы.

Конечно, у такой системы есть и недостатки:

1. Необходимо использовать ключ, генерация которого равновероятна относительно всех возможных других ключей, чего не так просто добиться.

2. В нашей системе длина ключа равна длине сообщения. Обязательным условием конфиденциальности является секретная передача ключа. Но вот парадокс: если есть возможность по некоторому секретному каналу передать ключ, длиной, равной сообщению, то что мешает по этому же каналу сразу же передать сообщение?

В ходе выполненной работы была доказана концепция идеальной криптосистемы, разработан алгоритм, представляющий собой шифр Вернама. Данная тема представляет интерес идеей невзламываемого шифра, который гарантирует абсолютную секретность переданной информации. Впереди концепцию ждут модернизации и адаптации под реалии. В основном банально нет необходимости добиваться абсолютной криптостойкости, так как современные алгоритмы шифрования обеспечивают секретность на необходимый промежуток времени, однако все равно регулярно происходят взломы теми или иными методами. Поэтому идею идеальной криптосистемы ждет перспективное будущее, когда у людей больше не будет сложностей с хранением и передачей больших ключей. Также перспективным направлением будет создание криптосистемы, свойства которой стремятся к идеальной системе, но при этом ее работа будет менее затратной и более эффективной.

Список использованных источников:

[1] Shannon, C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – P. 379–423, 623–656.

[2] Онлайн ресурс курс лекций “Теория вероятностей”, Райгородский А.М МФТИ.

[3] Онлайн ресурс курс лекций “Теория информации”, Григорьев А.А МФТИ.

[4] Marginal distribution, wikipedia.

UDC 003.26-021.333

THE IDEAL CRYPTO SYSTEM. THE VERNAM CIPHER.

Tsipko A.I., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Barkova E.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. The concept of an ideal cryptosystem is examined, and proofs of its existence are provided. The operation of the Vernam cipher is demonstrated, the advantages and disadvantages of this system are presented, and prospects for its development are proposed.

УДК 514

ТЕОРЕМА ПИФАГОРА В ЭКОНОМИКЕ: ИНТЕРАКТИВНАЯ ГОЛОВОЛОМКА КАК МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕСУРСНЫХ ЗАТРАТ

Чой А. К., Жибрик А. В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л. В. — старший преподаватель

Аннотация: в данной работе рассматривается нетривиальное применение геометрической теоремы Пифагора для решения экономических задач оптимизации. Автором предлагается концепция интерактивной головоломки «Экономический треугольник», которая позволяет визуализировать взаимосвязь между различными видами затрат (переменными и постоянными) и итоговым изменением себестоимости или прибыли.

Ключевые слова: теорема Пифагора, визуализация в экономике, Парето-эффективность.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска простых и наглядных методов объяснения экономических процессов. Теорема Пифагора, известная более 2500 лет, традиционно считается инструментом чистой геометрии и физики. Однако её суть — установление количественной связи между составляющими частями системы — может быть спроецирована на экономическую плоскость. Цель данной работы — разработать модель интерактивной головоломки, доказывающей, что принцип «квадрата гипотенузы равен сумме квадратов катетов» применим к анализу ресурсных затрат предприятия.

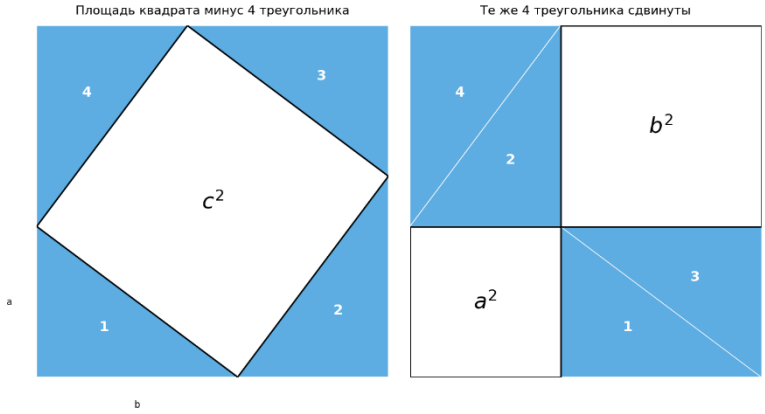


Рисунок 1 — Интерактивная головоломка

На рисунке 1 большой квадрат со стороной $(a + b)$ разделён на четыре равных прямоугольных треугольника с катетами a и b и центральный квадрат со стороной c (гипотенуза). Площадь большого квадрата равна $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$. Если убрать четыре треугольника, остаётся квадрат площадью c^2. Во второй части рисунка те же четыре треугольника перегруппированы так, что они образуют два прямоугольника, а оставшееся пространство складывается в два меньших квадрата со сторонами a и b. Таким образом, визуально доказывается, что $c^2 = a^2 + b^2$. Ключевой момент: общая площадь и количество треугольников остаются неизменными, меняется лишь их конфигурация.

В экономике ресурсы всегда ограничены: их общий объём аналогичен постоянной сумме площадей всех фигур на чертеже. Перемещение треугольников из одного положения в другое не создаёт новой площади – это аналог перераспределения ресурсов без увеличения их общего количества. Состояние, при котором невозможно улучшить один параметр (например, площадь одного из квадратов), не ухудшив другой, называется Парето-эффективным. В данной модели равновесие достигается тогда, когда треугольники расположены так, что мы можем чётко выделить квадраты a^2 и b^2 – это символизирует оптимальную структуру, где каждый элемент выполняет свою функцию без потерь.

В первом чертеже треугольники разобщены, а между ними остаются пустоты. Если интерпретировать треугольники как производственные модули или логистические маршруты, а пустоты – как транзакционные издержки (простои, потери на трении между подразделениями), то первая схема показывает неоптимальную организацию. Переход ко второму чертежу, где треугольники плотно прилегают друг к другу, а пустоты исчезают (или преобразуются в два чётких квадрата), демонстрирует эффект синергии и снижения транзакционных издержек благодаря улучшению структуры

взаимодействия. Это наглядно иллюстрирует важность институциональной организации и менеджмента: перегруппировка тех же самых элементов может высвободить скрытую ценность (квадраты становятся видимыми). Этот же математический инструмент — теорема Пифагора — позволяет решить и другую, более прикладную задачу: определить расстояние до горизонта.

Рисунок 2 — Расстояние до горизонта

Для определения расстояния до видимого горизонта рассмотрим геометрическую модель, в которой Земля представлена как идеальная сфера со средним радиусом R (принимаем R ≈ 6371 км). Точка A - точка наблюдения, расположенная на высоте *h* над поверхностью Земли. Точка O - центр Земли. Видимый горизонт определяется как множество точек касания прямых, проведённых от наблюдателя к сфере(рисунок 2).

Рассмотрим треугольник ∆ABO, где точка *B* — точка касания прямой видимости с поверхностью сферы (точка горизонта). По определению касательной к окружности (в сечении плоскостью, проходящей через точки *A*, *O* и *B*), радиус *OB*, проведенный в точку касания, перпендикулярен касательной *AB*. Таким образом, в треугольнике ∆ABO угол при вершине *B* является прямым (∠ABO = 90°), что доказывает прямоугольность данного треугольника. Гипотенузой в этом треугольнике является отрезок *AO*, соединяющий наблюдателя с центром планеты. Катетами являются радиус Земли *OB* = *R* и искомое расстояние до горизонта *AB* = d.

Для прямоугольного треугольника ∆ABO справедлива теорема Пифагора. Длина гипотенузы *AO* складывается из радиуса Земли и высоты наблюдателя: *AO* = *R* + *h*. Следовательно, уравнение имеет вид:

$$(R + h)^2 = d^2 + R^2 \quad (1)$$

Раскрывая скобки и упрощая выражение, получаем точную формулу для расстояния до горизонта:

$$R^2 + 2Rh + h^2 = d^2 + R^2 \quad (2)$$

$$d^2 = 2Rh + h^2 \quad (3)$$

$$d = \sqrt{2Rh + h^2} \quad (4)$$

В большинстве практических задач (наблюдение с высоты роста человека, зданий) высота наблюдателя *h* мала по сравнению с радиусом Земли *R* (*h* << *R*). В таких условиях слагаемым h^2 под корнем можно пренебречь. Это приводит к приближенной формуле, используемой в морском деле, авиации и топографии:

$$d \approx \sqrt{2Rh} \quad (5)$$

где *d* — расстояние до горизонта, *R* — радиус Земли, *h* — высота точки наблюдения. Для удобства расчетов, подставляя среднее значение радиуса Земли (6371 км) и приводя единицы измерения к согласованному виду (обычно *h* в метрах, *d* в километрах), формулу часто записывают в эмпирическом виде: $d \approx 3{,}57h$, где результат получается в километрах при подстановке высоты в метрах.

Для анализа зависимости дальности горизонта от высоты наблюдателя составим расчетную таблицу 1, используя приближенную формулу $d \approx 3{,}57h$ (с округлением до десятых).

Таблица 1 – Расстояние до горизонта с высоты разных объектов

Высота наблюдения (h)	Характерный объект	Расстояние до горизонта (d)
1,7 м	Уровень глаз человека стоя	4,7 км
25 м	Палуба корабля / Береговой утес	17,9 км
100 м	Маяк / Смотровая площадка	35,7 км
1 км (1000 м)	Легкий самолет (базовая высота)	112,9 км
10 км	Высотный пассажирский самолет	357,1 км
400 км	Орбита МКС (International Space Station)	2264,2 км

Данные расчеты из таблицы 1 демонстрируют нелинейный характер зависимости: с увеличением высоты дальность растет пропорционально квадратному корню. Важным прикладным аспектом является расчет прямой видимости между двумя объектами, находящимися на высотах h_1 и h_2 над поверхностью. Максимальное расстояние L, на котором наблюдатель на высоте h_1 сможет увидеть объект на высоте h_2 (например, маяк и палубу корабля), определяется суммой дальностей горизонтов для каждой из высот:

$$L = \sqrt{2Rh_1} + \sqrt{2Rh_2} \quad R^2 \qquad (6)$$

В этой геометрической модели радиус Земли R выступает в качестве постоянных издержек. Высота наблюдателя h — это переменный ресурс (инвестиции в маркетинг, разведку, образование). Расстояние до горизонта d — результат (информация, зона охвата рынка, дальновидность стратегии).

Формула $d \approx \sqrt{2Rh}$ демонстрирует классический экономический закон убывающей отдачи: чтобы увидеть вдвое дальше, необходимо увеличить высоту не в два, а в четыре раза. Это точная аналогия тому, как инвестиции в НИОКР или рекламу дают все меньший прирост результата при увеличении бюджета. График функции $d(h)$ — это ветвь параболы, наглядно показывающая, что экстенсивное наращивание ресурсов неэффективно без изменения базовых условий (R).

В ходе работы была успешно демонстрирована применимость геометрической теоремы Пифагора к анализу экономических процессов. На примере перегруппировки элементов классического чертежа наглядно показано, что изменение структуры использования ограниченных ресурсов (аналог перестановки треугольников) может минимизировать транзакционные издержки и повысить общую эффективность системы до состояния, близкого к Парето-оптимальному. Анализ формулы расстояния до горизонта позволил выявить фундаментальную экономическую закономерность: квадратичная зависимость результата от затрат иллюстрирует принцип убывающей отдачи, где для удвоения «зоны охвата» (d) требуется четырехкратное увеличение вложений (h). Таким образом, модель успешно проецирует математический закон на сферу ресурсного менеджмента, предлагая простой и наглядный инструмент для объяснения концепций эффективности, оптимизации и стратегического планирования.

***Список использованных источников**:*

1. Перельман Я. И. Занимательная геометрия / под ред. и с доп. Б. А. Кордемского. — 10-е изд., стер. — М. : Физматгиз, 1958. — 304 с. — Библиогр.: с.

2. Расстояние до горизонта[Электронный ресурс] — Режим доступа: https://book.etudes.ru/articles/skyline/

3. Тайна тайн теоремы Пифагора[Электронный ресурс] — Режим доступа: https://multiurok.ru/files/taina-tain-teoremy-pifagora.html

4. Теорема Пифагора: великий обман[Электронный ресурс] — Режим доступа: https://habr.com/ru/articles/972262/

UDC 514

THE PYTHAGOREAN THEOREM IN ECONOMICS: INTERACTIVE PUZZLE AS A METHOD OF VISUALIZING RESOURCE COSTS

Choi A. K., Zhibrik A.V. students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Lobanok L. V., Senior lecturer at the Department of Higher Mathematics

Annotation. Consider a non-trivial application of the Pythagorean geometric theorem to solve economic optimization problems. The author proposes the concept of an interactive puzzle "Economic triangle", which allows you to visualize the relationship between different types of costs (variable and constant) and the final change in cost or profit..

Keywords. Pythagorean theorem, visualization in economics, Pareto efficiency.

УДК 519.246.87:336.74-028.27

ПРИМЕНЕНИЕ РЯДОВ ФУРЬЕ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА К ВЫЯВЛЕНИЮ ЦИКЛИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НА КРИПТОВАЛЮТНОМ РЫНКЕ

Плехов М.К., Чумак А.П., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л.В. – старший преподаватель

Аннотация. В работе показывается применение рядов Фурье для выявления и проверки закономерностей в ценовой динамике криптовалют на примере самой популярной из них – биткоина. Проведён спектральный анализ на разных временных промежутках с целью выявления циклических закономерностей различной периодичности. Установлено, что большинство обсуждаемых в трейдерском сообществе циклов статистически не подтверждаются, однако суточный цикл, связанный со сменой торговых сессий мировых финансовых центров, обнаруживается надёжно. Также выявлена тенденция снижения ценовых неэффективностей и приближения динамики цен криптовалют к модели случайного блуждания.

Ключевые слова. Ряды Фурье, спектральный анализ, оконная функция Ханна, FFT, DFT, криптовалюты, биткоин, Python, циклические закономерности, преобразование Фурье, спектр мощности, волатильность, торговые сессии.

Введение. Криптовалютный рынок за последнее десятилетие превратился из маргинального явления в значимый сегмент мировой финансовой системы. Капитализация рынка криптовалют превышает 2 триллиона долларов, а дневной объём торгов сопоставим с крупнейшими фондовыми биржами.[16] Среди участников рынка широко распространено мнение о существовании различных циклических закономерностей. Однако объективная математическая проверка этих гипотез проводилась редко, ведь для этого нужен инструмент, который не зависит от субъективного восприятия человеком графиков цен, так как наш мозг эволюционно настроен искать паттерны (повторяющиеся элементы) везде, даже там, где их нет. Таким инструментом является спектральный анализ на основе рядов Фурье. Этот метод позволяет разложить любой сложный сигнал на простые волны и точно определить, какие ритмы в нём присутствуют, а какие — нет. Если анализ покажет, что на той или иной криптовалюте может присутствовать цикл определённой длины, то при повторе волны трейдер сможет заработать на движении цены.

Чтобы нагляднее показать, как на практике используются ряды Фурье, представим, что мы слушаем музыку. Из колонки идёт звук – он может одновременно включать в себя голос певца, гитару, барабаны и бас. Всё смешано в одну волну. Но звуковой эквалайзер в плеере разделяет этот звук на полоски: низкие частоты (бас), средние (голос), высокие (тарелки). Мы видим, сколько баса, сколько голоса, сколько высоких частот присутствует в каждый момент. Преобразование Фурье – это тот самый эквалайзер, только для любого сигнала. Оно берёт сложную кривую и раскладывает её на простые волны (синусоиды) разной частоты.

Теперь вместо музыки подставим график цены криптовалюты, например, биткоина. График цены – тоже сложная кривая. На рисунке 1 представлено изменение курса биткоина и его анализ с помощью рядов Фурье.

Рисунок 1 – Индикатор преобразования Фурье на платформе для анализа финансовых рынков TradingView

Целью нашей работы является применение спектрального анализа на основе рядов Фурье к реальным данным криптовалютного рынка для проверки гипотез о существовании циклов различной периодичности на примере самой популярной криптовалюты – биткоина.

Теоретические сведения. Спектральный анализ — это совокупность методов обработки данных, позволяющая показать частотный состав измеряемого сигнала. Суть этой методики заключается в смене точки зрения: мы перестаём рассматривать данные во временной области (как сигнал меняется каждый день или год) и переходим в частотную область (из каких повторяющихся ритмов состоит этот сигнал всей области).

На стыке физики и экономики возникло направление эконофизика, которое предполагает, что финансовые рынки, подобно физическим волнам и процессам, могут иметь скрытую периодичность. Применяя этот метод к графикам цен, мы пытаемся отфильтровать все случайные скачки и найти настоящие, скрытые ритмы рынка.[17]

Всё началось не с графиков и даже не с музыки. Жан-Батист Жозеф Фурье в начале XIX века (1822 год) выдвинул революционную для того времени идею: любую сложную функцию, даже с резкими углами, можно представить как сумму бесконечного количества плавных синусоид.[12]

Более полное математическое обоснование этой теории появилось только спустя десятилетия после смерти Фурье. Петер Густав Лежён Дирихле первым сформулировал чёткие условия (условия Дирихле), при которых функция раскладывается в ряд Фурье: функция должна быть периодической, иметь конечное количество точек экстремума и конечное количество точек разрыва первого рода на периоде. А в общем виде формула выглядит так:[11]

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega x) + b_n \cdot \sin(n\omega x)), \quad (1)$$

где $f(x)$ – Это исходный сложный сигнал, функция, или, в нашем случае, график цены актива за какой-то промежуток времени; $\frac{a_0}{2}$ – Среднее значение функции. Или, другими словами, та цена актива, вокруг которого происходят колебания. Если бы рынок был статическим, то в формуле разложения, осталась бы только эта переменная; $\sum_{n=1}^{\infty}$ (Сумма) – Знак того, что мы складываем бесконечное количество простых волн (синусов и косинусов) чтобы в конечном итоге получить одну сложную; $\cos(n\omega x)$ и $\sin(n\omega x)$ (Гармоники): Это сами волны. Каждая со своей частотой. Синус и косинус берутся вместе, так как они являются чётной и нечётной функцией, со сдвигом в π, что даёт возможность улавливать все пики и минимумы, двигая синусоиды влево и вправо (изменять фазу); a_n и b_n (Амплитуды): Это веса, они показывают, насколько сильно конкретная частота влияет на общий график (исходную волну). Если коэффициент большой – эта волна играет важную роль. Если наоборот, то закономерность отсутствует.

Данные коэффициенты рассчитываются по следующим формулам:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \cos(n\omega x)dx,\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \sin(n\omega x)dx, \quad (2)$$

Они вычисляются путём сравнения исходного сигнала с эталонными волнами соответствующих частот. Если сигнал «резонирует» с эталоном определённой частоты, соответствующий коэффициент оказывается большим. Если резонанса нет — коэффициент близок к нулю.

Для анализа того, какие частоты доминируют в сигнале, строится спектр мощности:

$$P(x) = {a_n}^2 + {b_n}^2, \quad (3)$$

Спектр мощности представляет собой график, где по горизонтальной оси отложен период (или частота), а по вертикальной – сила соответствующей циклической компоненты. Наличие выраженного пика на определённом периоде будет свидетельствовать о присутствии цикла с данной периодичностью. Пример графика спектра мощности приведён на рисунке 2.

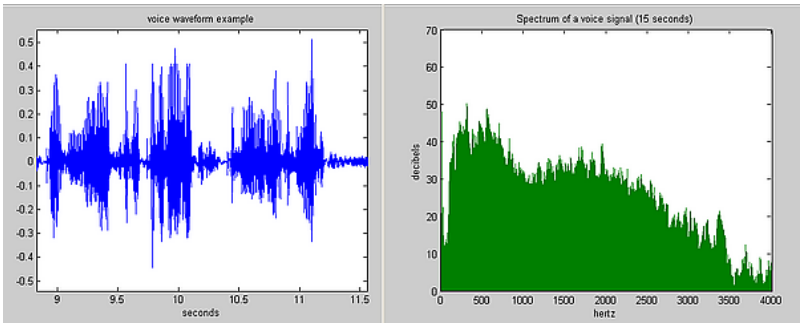


Рисунок 2 – Пример спектральной плотности мощности

Если вернуться к теории о циклах, то среди трейдеров и аналитиков существует несколько устойчивых убеждений о повторяющихся закономерностях на рынке криптовалют.

Самым популярным и, пожалуй, наиболее обоснованным считается четырёхлетний цикл. Он привязан к халвингу биткоина — запрограммированному уменьшению награды майнерам, которое создаёт искусственный дефицит и предотвращает инфляцию. Халвинг происходит примерно раз в 4 года, и исторически после каждого из них наблюдался заметный рост цены. На рисунке 3 представлены 3 произошедших халвинга и изменение цены вовремя каждого из них.

Рисунок 3 – Временные рамки каждого из халвингов биткоина

Помимо этого, многие верят в то, что рынок ведёт себя по-разному в зависимости от месяца. Отсюда родились выражения «Sell in May» (продавай в мае) и «Uptober» (октябрь роста). Также существует гипотеза о недельном цикле, согласно которой торговая активность в будни и выходные отличается. Наконец, говорят о суточном цикле — он связан с тем, что крупнейшие финансовые центры мира расположены в разных часовых поясах, и их торговые сессии открываются и закрываются в разное время.

Практическая часть. Эти временные циклы мы и проверим на практике. Для автоматизации процесса анализа данных использовался язык программирования Python с библиотеками Numpy и Matplotlib для работы с большим массивом данных и построения графиков. Также была проведена работа с библиотекой yfinance, которая имеет открытый код и способна получать информацию в реальном времени с сайта Yahoo Finance. С её помощью мы получили котировки биткоина (BTC/USDT) временным промежутком с 17.09.2014 до 19.03.2026 (Рисунок 4).

Date	Open	High	Low	Close ⓘ	Adj Close ⓘ	Volume
Mar 1, 2026	67,005.88	75,988.40	65,076.73	70,517.86	70,517.86	1,050,050,822,429
Feb 1, 2026	78,626.13	79,322.61	60,074.20	66,995.86	66,995.86	1,397,829,262,737
Jan 1, 2026	87,508.05	97,860.60	75,815.88	78,621.12	78,621.12	1,257,318,501,232
Dec 1, 2025	90,389.11	94,601.57	83,862.25	87,508.83	87,508.83	1,487,947,448,337
Nov 1, 2025	109,558.63	111,167.31	80,659.81	90,394.31	90,394.31	2,121,328,523,236
Oct 1, 2025	114,057.59	126,198.07	103,598.43	109,556.16	109,556.16	2,225,033,226,796
Sep 1, 2025	108,228.75	117,911.79	107,271.18	114,056.09	114,056.09	1,450,418,370,470
Aug 1, 2025	115,738.95	124,457.12	107,444.45	108,236.71	108,236.71	2,048,378,158,799
Jul 1, 2025	107,144.38	123,091.61	105,157.40	115,758.20	115,758.20	2,061,338,304,539
Jun 1, 2025	104,637.30	110,561.42	98,286.20	107,135.34	107,135.34	1,424,277,758,118
May 1, 2025	94,212.86	111,970.17	93,399.86	104,638.09	104,638.09	1,496,397,538,233
Apr 1, 2025	82,551.92	95,768.39	74,436.68	94,207.31	94,207.31	1,060,974,068,310

Рисунок 4— исторические котировки биткоина

Однако просто применять преобразование Фурье к ценам нельзя: цена биткоина за этот период изменялась в сотни раз, и колебания на 30 долларов при цене 300 и при цене 100 000 имеют совершенно разную значимость. Для корректной работы программы, абсолютные цены были переведены в дневные логарифмические доходности по формуле:

$$r_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1}), \quad (4)$$

где P_t – цена закрытия в день t.

Благодаря этому из данных убирается общий рост, а колебания за разные годы становятся одного порядка (теперь мы измеряем не изменение в долларах, а изменение в процентах) (Рисунок 4).

Рисунок 4 – Дневные логарифмические доходности биткоина

Поскольку графики цен на криптовалюты никак не периодические функции, вместо классического ряда Фурье на практике использовалось дискретное преобразование Фурье (DFT), которое не требует наличия строгих периодов. Для его вычисления применялся алгоритм быстрого преобразования Фурье (FFT), это было реализовано через функцию numpy.fft.fft.

Затем мы столкнулись с проблемой: FFT воспринимает переданный ему фрагмент данных как бесконечно повторяющийся. Если начало и конец графика не совпадают (обычно так и есть на реальном рынке), при их искусственной склейке появляется скачок. Такая разница в данных воспринимается алгоритмом как мощный всплеск, так и появляются «ложные циклы» (явление в спектральном анализе имеет название «спектральная утечка»), которых на самом деле не существует.

Чтобы этого избежать, перед анализом массив данных был умножен на оконную функцию Ханна:

$$w(n) = 0{,}5\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right), \quad (5)$$

где N — общее число дней, а n — номер текущего дня.

Она сохраняет данные в середине отрезка неизменными (умножает на 1 и близкие к единице числа), но плавно сводит к нулю значения на самых краях графика (умножает на близкие к нулю и нулевые значения). В результате начало и конец ряда идеально пересекаются на нуле, устраняя искажения.

После того как данные сглажены, они пропускаются через алгоритм Фурье. На выходе мы получаем спектр мощности — график, показывающий силу найденных циклов, где для каждой частоты вычисляется квадрат модуля соответствующего коэффициента Фурье:

$$P_k = |X_k|^2. \quad (6)$$

Именно этот график показывает, какие периодические составляющие присутствуют в сигнале и насколько они сильны. Однако возникает новая проблема: алгоритм устроен так, что он найдет пики даже в абсолютно хаотичном наборе чисел.

Чтобы отличить реальные закономерности от иллюзий, программа сгенерировала 100 суррогатных графиков (искусственных подделок) «случайного блуждания». Они имели ту же волатильность, что и биткоин, но не содержали никаких циклов. Обработав их тем же методом (окно Ханна + преобразование Фурье), мы вычислили порог статистической значимости — 95-й перцентиль (мы отсортировали по мощности все 100 результатов от самого слабого к самому сильному и взяли 95-й по счёту). Цикл считается подтвержденным, только если его пик на графике реального биткоина превышает эту планку случайного шума.

Такой подход решил проблему потери 5-20% данных на концах временного ряда, которую мы получали из-за окна Ханна. Поскольку мы сглаживали края и у реального биткоина, и у всех случайно сгенерированных графиков, то корректность итоговых данных гарантирована.

Проверка макроциклов (дневные таймфреймы). Описанные выше методы были применены к массиву дневных доходностей. Для наглядной демонстрации сравнения реальных данных с порогом случайного блуждания был построен график спектра мощности, представленный на рисунке 5.

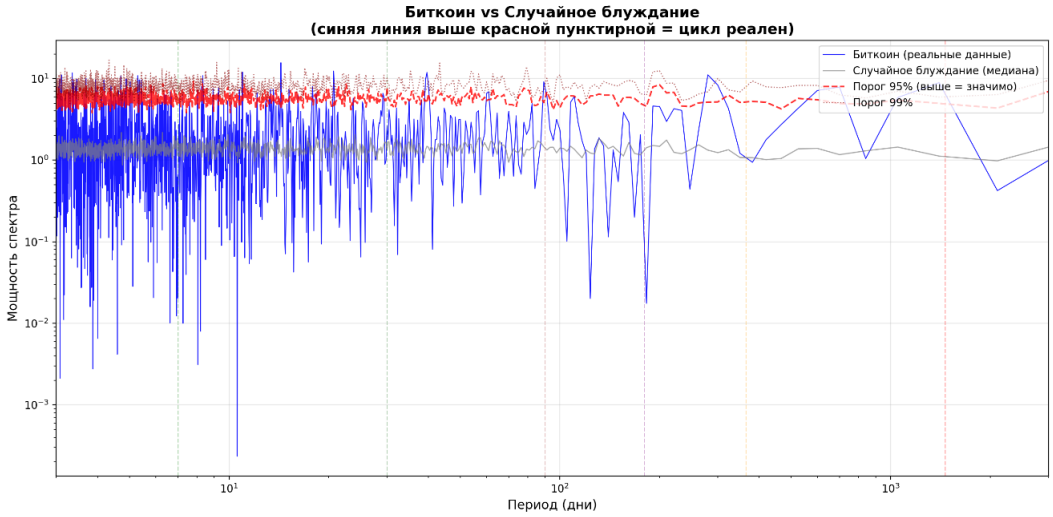


Рисунок 5 – Сравнение спектра мощности биткоина с порогом случайного блуждания

Как видно из графика, большая часть ценовых колебаний (синяя линия) находится ниже порога значимости (красная пунктирная линия). Это означает, что их мощность неотличима от обычного рыночного шума. Цикл считается реальным только если пик спектра мощности пробивает порог в 95%. Данный график подтверждает, что из всех глобальных периодов значимым является лишь один крупный всплеск в правой части графика, он соответствует 4-летнему периоду. Остальные проверяемые циклы оказались иллюзией. Сводные результаты проверки всех популярных трейдерских гипотез представлены на рисунке 6.

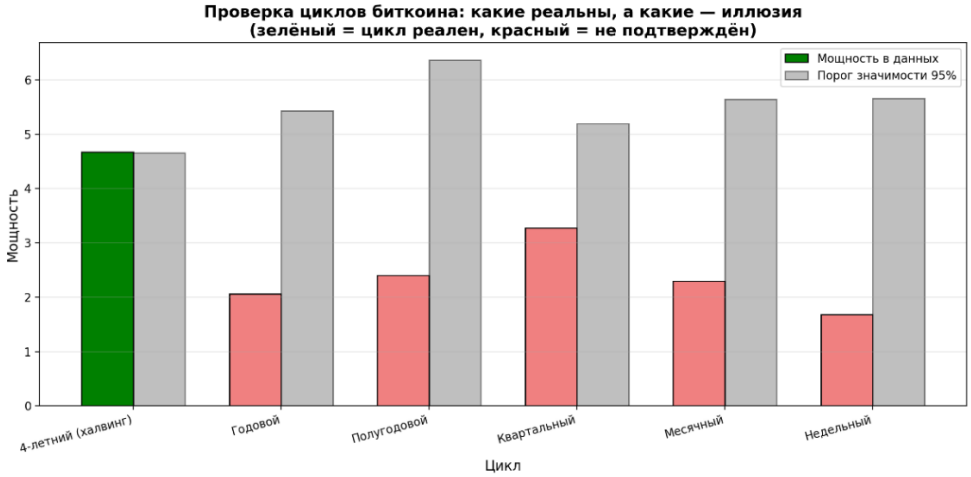


Рисунок 6 – Проверка гипотез о цикличности биткоина (спектральная мощность)

Проверка микроциклов (часовые таймфреймы). Для исследования суточных ритмов мы повторили спектральный анализ на массиве часовых логарифмических доходностей. Однако спектр мощности не выявил статистически значимых пиков на периодах в 24, 12 и 8 часов. Это опровергает гипотезу о том, что цена биткоина имеет направленные циклы внутри дня. Полученный график представлен на рисунке 7.

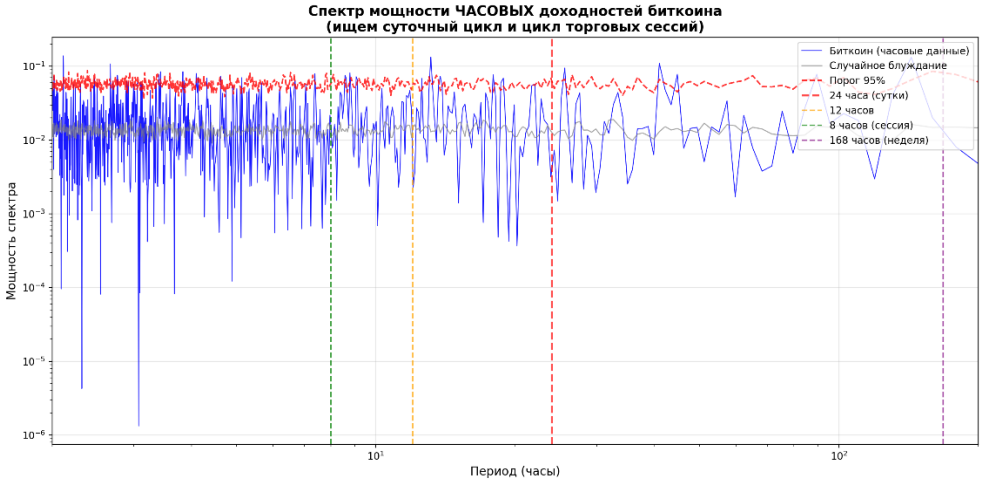


Рисунок 7 – Спектр мощности часовых доходностей биткоина

Однако это не означает, что рынок одинаково активен в течение всего дня. Криптовалютный рынок работает круглосуточно без выходных и его основные участники — крупные институциональные инвесторы, фонды и маркетмейкеры. Концентрация большого капитала в определенные рабочие часы формирует периоды сильных движений и затишья. Именно поэтому наш исследовательский фокус сместился с поиска закономерностей в направлении цены на поиск закономерностей в амплитуде ценовых колебаний. В качестве объекта была выбрана волатильность. Она показывает насколько сильно отклоняется цена, и не зависит от того идет она вверх или вниз. Для наглядного подтверждения была рассчитана средняя волатильность биткоина по часам. Конечная диаграмма представлена на рисунке 8.

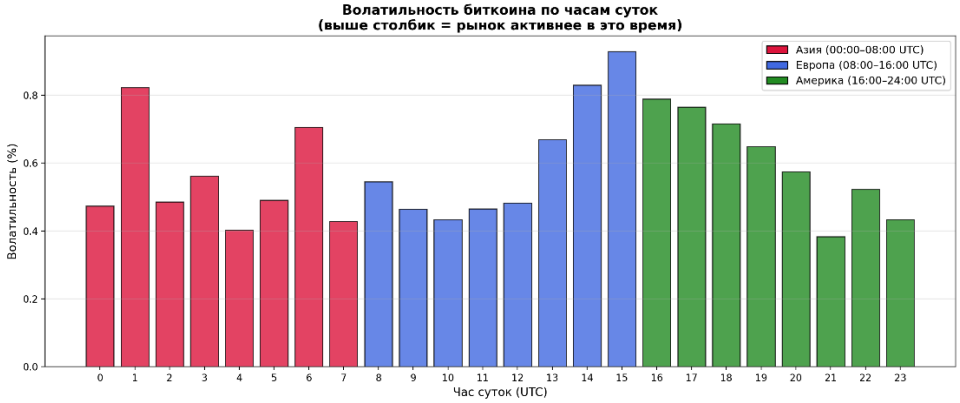


Рисунок 8 – Волатильность биткоина в зависимости от часа суток (UTC)

График демонстрирует четкую зависимость активности рынка от расписания мировых торговых сессий. Максимальная волатильность фиксируется в моменты открытия американской сессии (15:00–16:00 UTC) и старта торгов в Азии (00:00–01:00 UTC).

Вывод. В результате проведённого анализа было установлено, что график изменения цены биткоина не имеет ярко выраженных циклов в привычном понимании этого слова. Годовой, квартальный, месячный и недельный циклы, широко обсуждаемые в трейдерском сообществе, оказались статистически неотличимы от случайного шума. Четырёхлетний цикл халвинга приближается к порогу значимости и имеет под собой экономическое обоснование, однако четырёх наблюдений недостаточно для однозначного подтверждения. Вместе с тем анализ часовых данных выявил устойчивый суточный цикл, связанный со сменой торговых сессий мировых финансовых центров.

Ряды Фурье показали свою эффективность как инструмент поиска скрытых закономерностей, однако метод предполагает стационарность данных, ищет строго периодические компоненты и требует значительного объёма исторических данных для обнаружения длинных циклов.

Рынок криптовалют постепенно приближается к модели случайного блуждания: с приходом институциональных инвесторов и появлением торговых ботов, основанных на искусственном интеллекте, неэффективности исчезают всё быстрее. Криптовалютный рынок проходит тот же

эволюционный путь, что и фондовый, но за значительно более короткий срок. Понимание случайной природы рынка может уберечь от убыточных решений не хуже, чем знание прибыльной стратегии.

Следует отметить, что анализ был проведён исключительно на примере биткоина — наиболее ликвидной и популярной криптовалюты, что само по себе влияет на характер ценовой динамики. На менее ликвидных и менее изученных рынках других криптовалют аналогичный подход может дать иные результаты и выявить циклы, которые ещё не были «выровнены» действиями участников рынка.

Список использованных источников:

1.Amplitude FFT – индикатор преобразования Фурье / TradExperts [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tradexperts.ru/indikatory-forex/amplitude-fft

2.What are harmonics / eMastered [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://emastered.com/ru/blog/what-are-harmonics

3.What is the Bitcoin cycle / Nexo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nexo.com/ru/blog/what-is-the-bitcoin-cycle

4.yfinance: Download market data from Yahoo! Finance's API / Python Package Index [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pypi.org/project/yfinance/

5.Дронова, Е. Н. Особенности опции «Анализ Фурье» в таблице Excel при проведении спектрального анализа и для выявления периодических закономерностей / Е. Н. Дронова // Вестник Кемеровского государственного университета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-optsii-analiz-furie-v-tablitse-excel-pri-provedenii-spektralnogo-analiza-i-dlya-vyyavleniya-periodicheskih

6.Кожевников, Д. Преобразование Фурье на пальцах / Д. Кожевников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://proglib.io/p/fourier-transform

7.Математический анализ: учеб.-метод. пособие. – Минск: БГУИР, 2019. – Режим доступа: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_141416.pdf

8.Почему в 95% статистической значимости нет ничего особенного / LPgenerator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lpgenerator.ru/blog/2018/08/21/pochemu-v-95-statisticheskoj-znachimosti-net-nichego-osobennogo/

9.Ряды Фурье: от теории к практике / Habr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/raft/articles/887486/

10.Синусоида: график и основные свойства / FX-Currencies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://fx-currencies.ru/articles/sinusoida-grafik/

11.Теорема Дирихле о рядах Фурье // Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Дирихле_о_рядах_Фурье

12.Фурье, Жан-Батист Жозеф // Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Фурье,_Жан-Батист_Жозеф

13.Цифровая обработка изображений. Ряд Фурье и преобразование / CoderLessons [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://coderlessons.com/tutorials/akademicheskii/tsifrovaia-obrabotka-izobrazhenii/riad-fure-i-preobrazovanie

14.Циклы биткоина и их влияние на рынок / Т-Банк Инвестиции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tbank.ru/invest/social/profile/Trejder_maminoj_podrugi/5113cdcf-ff86-48a1-acdb-5cceee39e200/

15.Циклы на криптовалютном рынке / BytWork [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://bytwork.com/trade/cycles

16.CoinMarketCap — Cryptocurrency Market Capitalizations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://coinmarketcap.com/charts/

17.Эконофизика // Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эконофизика

UDC 519.246.87:336.74-028.27

APPLICATION OF FOURIER SERIES AND SPECTRAL ANALYSIS TO IDENTIFICATION OF CYCLIC PATTERNS IN THE CRYPTOCURRENCY MARKET

Plekhov M.K., Chumak A.P., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics1
Minsk, Republic of Belarus

Lobonok L.V. – Senior Lecturer of the Department of Higher Mathematics

Annotation. The paper demonstrates the application of Fourier series for identifying and verifying patterns in the price dynamics of Bitcoin. Spectral analysis was performed on different time intervals to detect cyclic patterns of various periodicities. It was established that most cycles discussed in the trading community are not statistically confirmed, however the daily cycle associated with the change of trading sessions of major financial centers is reliably detected. A tendency towards decreasing price inefficiencies and convergence of cryptocurrency price dynamics to a random walk model was also revealed.

Keywords. Fourier series, spectral analysis, Hann window function, FFT, DFT, cryptocurrencies, Bitcoin, cyclic patterns, Fourier transform, power spectrum, volatility, trading sessions.

УДК 517.17

СВОЙСТВА ФУНКЦИЙ, ДОПУСКАЮЩИХ РАЗРЫВЫ ПЕРВОГО РОДА

Берговин С. А., Юркевич Д. А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Люксембург И. Л. – ассистент

Аннотация. В работе рассматриваются функции, определённые на отрезке $[0;1]$, которые в каждой точке имеют односторонние пределы (то есть допускают разрывы лишь первого рода). Доказывается, что множество точек разрыва такой функции не более чем счётно. Для любого счётного множества $A \subset [0;1]$, разбитого на четыре произвольных подмножества, строится функция, непрерывная вне множества A и имеющая в точках каждого подмножества разрыв заранее заданного типа (устранимый, скачок с непрерывностью слева, скачок с непрерывностью справа или скачок без односторонней непрерывности).

Ключевые слова. Разрывы первого рода, односторонние пределы, непрерывность функции, классификация разрывов, множество точек разрыва, функция Римана, равномерная сходимость, построение функций.

Введение. При построении математических моделей различных физических, химических и биологических процессов обычно используются дифференциальные и интегральные уравнения, коэффициенты которых описывают состояние внешней среды, в которой протекает исследуемый процесс. Эти коэффициенты отражают такие параметры, как температура, давление, плотность, химический состав или другие факторы, определяющие состояние среды. В классических подходах к моделированию обычно предполагается, что коэффициенты уравнений являются непрерывными функциями.

Однако, при моделировании процессов, протекающих в средах с резкими изменениями параметров, например, при моделировании турбулентности, фазовых переходов или других явлений с резкими градиентами возникают уравнения, коэффициенты которых могут иметь особенности. Поэтому возникает необходимость изучения свойств функций, допускающих разрывы.

Пусть функция f определена на множестве $[0;1]$ и имеет односторонние пределы в каждой точке:

$$\mathrm{f}^{-}(\mathrm{x}_0) = \lim_{\mathrm{x}\to \mathrm{x}_0 - 0} \mathrm{f}(\mathrm{x}) \text{ – предел в точке } \mathrm{x}_0 \text{ слева},$$
$$\mathrm{f}^{+}(\mathrm{x}_0) = \lim_{\mathrm{x}\to \mathrm{x}_0 + 0} \mathrm{f}(\mathrm{x}) \text{ – предел в точке } \mathrm{x}_0 \text{ справа}.$$

Это значит, что в каждой точке f или непрерывна, или имеет разрыв первого рода. Важным примером функции, допускающей такие разрывы, является функция Римана R (рис. 1). Она определяется следующим образом:

$$\mathrm{R}(\mathrm{x}) = \begin{cases} 0, & \mathrm{x} \in [0;1]\setminus\mathbb{Q}, \\ \dfrac{1}{\mathrm{m}}, & \mathrm{x} = \dfrac{\mathrm{n}}{\mathrm{m}}, \text{где } \dfrac{\mathrm{n}}{\mathrm{m}} - \text{несократимая дробь}. \end{cases}$$

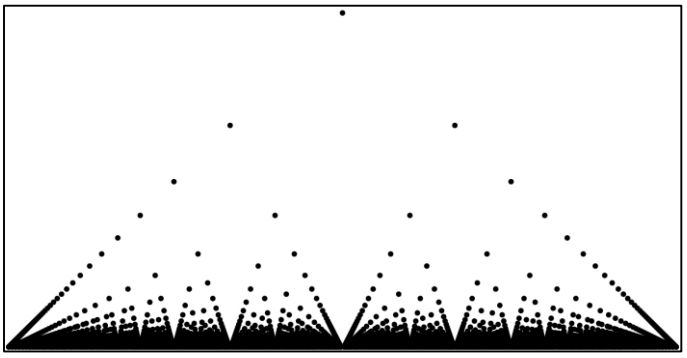


Рисунок 1 – График функции Римана

Функция Римана непрерывна на $[0;1]\setminus\mathbb{Q}$, так как предел и значение в каждой иррациональной точке равны нулю, и терпит устранимые разрывы на $\mathbb{Q}$.

Возникает вопрос: насколько пример такой функции типичен? Каковым может быть множество точек разрыва функции, имеющей односторонние пределы, какие у него теоретико-множественные и топологические свойства? Настоящая работа посвящена ответом на эти вопросы.

Мощность множества точек разрыва 1-го рода

Пусть функция f определена на множестве $[0;1]$ и имеет односторонние пределы в каждой точке и D – множество ее точек разрыва. Тогда справедлива следующая теорема:

Теорема 1. *Множество D не более чем счётно.*

Доказательство. Введём величину разрыва функции в точке x

$$\Delta(x) = \max\{|f^-(x) - f^+(x)|, |f^-(x) - f(x)|, |f^+(x) - f(x)|\}$$

Рассмотрим множество точек разрыва x с величиной $\Delta(x)$ больше, чем $\frac{1}{n}$:

$$D_n = \left\{x \in [0;1] : \Delta(x) > \frac{1}{n}\right\}$$

Достаточно показать, что D_n конечно. Предположим противное, тогда, по теореме Больцано – Вейерштрасса [1, стр. 87], множество D_n имеет предельную точку p. Это значит, что в любой окрестности точки p бесконечно много точек D_n. Тогда или в любой левосторонней окрестности, или в любой правосторонней окрестности бесконечно много точек D_n. Не ограничивая общности, предположим, что в левосторонней окрестности бесконечно много точек D_n. Тогда:

$$\forall \delta > 0\ \exists x_0 \in (D_n \cap (p - \delta; p) :\ \Delta(x_0) > \frac{1}{n}$$

Поскольку $x_0 \in D_n$, выполняется хотя бы одно из условий:

$$|f(x_0) - f^+(x_0)| > \tfrac{1}{n} \text{ или } |f(x_0) - f^-(x_0)| > \tfrac{1}{n} \text{ или } |f^+(x_0) - f^-(x_0)| > \tfrac{1}{n}$$

Тогда, существуют точки x_1, x_2 близкие к x_0 такие, что:

$$|f(x_1) - f(x_2)| > \frac{1}{n} \quad (1)$$

Действительно, пусть:

$$\Delta(x_0) = |f^+(x_0) - f^-(x_0)| > \frac{1}{n} \quad (2)$$

Тогда для $\varepsilon = \frac{\Delta(x_0) - \frac{1}{n}}{2}$:

$$\exists \delta^- : x_1 \in (x_0 - \delta^-; x_0) \cap (p - \delta; p) \Longrightarrow |f(x_1) - f^-(x_0)| < \varepsilon \quad (3)$$
$$\exists \delta^+ : x_2 \in (x_0; x_0 + \delta^+) \cap (p - \delta; p) \Longrightarrow |f(x_2) - f^+(x_0)| < \varepsilon \quad (4)$$

Из неравенства треугольника и неравенств (2), (3) и (4) следует неравенство (1).

Пусть:

$$\Delta(x_0) = |f(x_0) - f^-(x_0)| > \frac{1}{n}$$

Тогда в качестве x_2 можно взять x_0, а x_1взять как в неравенстве (3). Для $\Delta(x_0) = |f(x_0) - f^+(x_0)|$, x_1, x_2 находятся аналогично.

С другой стороны, так как $f(x)$ имеет левый предел в точке p, то:

$$\text{для } \varepsilon = \frac{1}{2n}, \exists \delta(\varepsilon) > 0 :\ \forall x \in (p - \delta; p) \Longrightarrow |f(x) - f^-(p)| < \frac{1}{2n}$$

Тогда если $x_1, x_2 \in (p - d; p)$, то по неравенству треугольника:

$$|f(x_1) - f(x_2)| < \frac{1}{n}$$

Получаем противоречие с неравенством (1). Значит D_n– конечное множество.

$$D = \bigcup_{n=1}^{\infty} D_n$$

Получаем счётное объединение конечных множеств, которое является не более чем счётным множеством [2, стр 25].

Пусть теперь функция f определена на множестве $\mathbb{R}$ и имеет односторонние пределы в каждой точке и D – множество ее точек разрыва.

Следствие. *Множество D не более чем счётно.*

Доказательство. Функция f на любом конечном отрезке допускает не более чем счётное число разрывов. Поскольку $\mathbb{R}$ представляется в виде объединения счётного числа отрезков:

$$\mathbb{R} = \bigcup_{k\in\mathbb{Z}} [k; k+1]$$

и счётное объединение не более чем счётных множеств не более чем счётно [2, стр. 25], то множество D не более чем счетно.

Построение функции с заданными типами разрывов на счетном множестве

Разрывы первого рода дополнительно классифицируются на два типа: устранимый разрыв и разрыв-скачок. Эта классификация основана на соотношении трех величин, правого предела, левого предела и значения в точке. В таблице 1 приведем более подробную классификацию.

Таблица 1 – Классификация разрывов первого рода.

Тип разрыва	Соотношение	Характеристика
0	$f^+(x) = f^-(x) = f(x)$	Непрерывность
1	$f^+(x) = f^-(x) \neq f(x)$	Устранимый разрыв
2	$f^+(x) \neq f^-(x) = f(x)$	Скачок, непрерывность слева
3	$f^-(x) \neq f^+(x) = f(x)$	Скачок, непрерывность справа
4	$f^-(x) \neq f^+(x)$ $f^-(x) \neq f(x)$ $f^+(x) \neq f(x)$	Скачок, отсутствие односторонней непрерывности

Пусть функция φ непрерывна в точке x и функция ψ имеет разрыв типа i в точке x, тогда справедливо следующее:

Утверждение 1. Функция $g = \varphi + \psi$ в точке x имеет разрыв типа i.

Доказательство следует из линейности односторонних пределов.

Теорема 2. Для любого $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n, \dots\}$ – счётного подмножества отрезка $[0; 1]$, представленного в виде дизъюнктного объединения четырех своих подмножеств: $A = A_1 \coprod A_2 \coprod A_3 \coprod A_4$, существует функция, непрерывная вне множества A и имеющая разрыв типа i на подмножестве A_i.

Доказательство. Элементы множества A будем обозначать как $a_n^{i_n}$, где нижний индекс показывает его номер во множестве A, а верхний – принадлежность к одному из подмножеств A_i, $i_n \in \{1, 2, 3, 4\}$.

Для каждого n, рассмотрим функции $h_n^{(i_n)}$ которые в точке $a_n^{i_n}$ имеют разрыв типа i_n и непрерывные в остальных точках и $\left|h_n^{(i_n)}(x)\right| < \frac{1}{2^n}\ \forall x$.

Например, можно взять такие функции:

Тип 1 (устранимый разрыв)

$$h_{a_n}^{(1)}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_n \\ \frac{1}{2^n}, & x = a_n \\ 0, & x > a_n \end{cases}$$

Тип 2 (непрерывность слева)

$$h_{a_n}^{(2)}(x) = \begin{cases} 0, & x \le a_n \\ \frac{1}{2^n}, & x > a_n \end{cases}$$

Тип 3 (непрерывность справа)

$$h_{a_n}^{(3)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^n}, & x < a_n \\ 0, & x \ge a_n \end{cases}$$

Тип 4 (общий случай)

$$h_{a_n}^{(4)}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_n \\ \frac{1}{2^{n+1}}, & x = a_n \\ \frac{1}{2^n}, & x > a_n \end{cases}$$

Составим функцию:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} h_n^{(i_n)}(x) \qquad (5)$$

Покажем, что ряд (5) сходится равномерно. По условию $\left|h_n^{(i_n)}(x)\right| < \frac{1}{2^n}$, рассмотрим $M_n = \frac{1}{2^n}$. Тогда $\left|h_n^{(i_n)}(x)\right| \le M_n$, для всех x и ряд:

$$\sum_{n=1}^{\infty} M_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} = \frac{\frac{1}{2}}{1-\frac{1}{2}} = 1$$

сходится и равен 1.

Следовательно, указанный числовой ряд мажорирует ряд (5), а значит, по признаку Вейерштрасса [3, стр. 427], ряд (5) сходится равномерно на [0;1].

Покажем, что функция f удовлетворяет утверждению теоремы. Возьмём произвольную точку y не принадлежащую множеству A. Для каждого n функция $h_n^{(i_n)}$ имеет разрыв только в точке $a_n^{i_n}$. Так как y не принадлежит A, каждая функция $h_n^{(i_n)}$ непрерывна в точке y. Если ряд из непрерывных в точке y функций сходится равномерно, то и сумма ряда в этой точке также будет непрерывна [3, стр. 430]. Значит, f непрерывна в y и в любой точке не принадлежащей A.

Рассмотрим произвольную точку $a_m^{i_m} \in A$, разложим ряд (5) на два слагаемых:

$$f(x) = h_m^{(i_m)}(x) + \sum_{n \ne m} h_n^{(i_n)}(x)$$

Тогда каждая функция $h_n^{(i_n)}$ непрерывна в точке $a_m^{i_m}$, если $n \ne m$, поэтому для любого фиксированного m функция

$$R_m(x) = \sum_{n \ne m} h_n^{(i_n)}(x)$$

непрерывна в точке $a_m^{i_m}$, так как ряд сходится равномерно. Тогда f есть сумма непрерывной и имеющей разрыв типа i_m в точке $a_m^{i_m}$, а значит, по утверждению 1, f имеет разрыв типа i_m в точке $a_m^{i_m}$.

Заключение. В данной работе были рассмотрены функции, определённые на отрезке $[0;1]$ и имеющие в каждой точке односторонние пределы. Такие функции образуют важный класс, занимающий промежуточное положение между непрерывными функциями и функциями с более сложными типами разрывов. В первой части исследования было доказано, что множество точек разрыва такой функции не более чем счётно.

Далее была приведена уточнённая классификация разрывов первого рода, выделяющая четыре типа: устранимый разрыв, разрыв с непрерывностью слева, разрыв с непрерывностью справа и разрыв без односторонней непрерывности. Такая классификация позволяет более детально описывать локальное поведение функции в точках разрыва.

Основным результатом работы стала конструкция, показывающая, что для любого счётного множества $A \subset [0;1]$, разбитого на четыре произвольных подмножества, существует функция, непрерывная вне A и имеющая в точках каждого подмножества разрыв заранее заданного типа.

Список использованных источников

1. Фихтенгольц, г.м. – курс дифференциального и интегрального исчисления. Том i, м., «наука», 1966г., 616 с.

2. П. С. Александров – введение в общую теорию множеств и теорию функций, огиз-гостехиздат, 1948 г., 419 с.

3. Фихтенгольц, г.м. – курс дифференциального и интегрального исчисления. Том ii, м., «наука», 1966 г., 800 с.

UDC 517.17

PROPERTIES OF FUNCTIONS WITH SIMPLE DISCONTINUITIES

Bergovin S. A., Yurkevich D. A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Minsk, Republic of Belarus

Luxembourg I. L. – Assistant Professor

Annotation. This paper studies functions defined on the interval $[0, 1]$that possess one-sided limits at every point (that is, functions that may have only simple discontinuities). It is proved that the set of discontinuity points of such a function is at most countable. For any countable set $A \subset [0,1]$, partitioned into four arbitrary subsets, a function is constructed that is continuous outside A and has, at the points of each subset, a discontinuity of a prescribed type (removable discontinuity, a jump discontinuity with left continuity, a jump discontinuity with right continuity, or a jump discontinuity without one-sided continuity).

Keywords. Simple discontinuities, one-sided limits, continuity of a function, classification of discontinuities, set of discontinuity points, Riemann function, uniform convergence, construction of functions.

МАТЕМАТИКА РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

Гомонов М.А., Васильев А.М. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Князюк Н.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент

В работе рассмотрены четыре вида рекомендательных систем: контентная, коллаборативная, экспертная и комбинированная, изучена их математическая составляющая. Исследованы реальные примеры использования рекомендательных систем.

Рекомендательные системы – это технологии, используемые для предсказания и рекомендации продуктов или контента, наиболее подходящих для конкретного пользователя [1]. Принцип работы таких систем реализуется с помощью обучения искусственного интеллекта на векторах, содержащих характеристики объекта, по которым будут осуществляться поиск и фильтрация.

Контентная система строит рекомендации на основе уже просмотренного пользователем контента, подбирая объекты, наиболее похожие на оценённые [2, 3]. Пусть $I = \{i_1, \ldots, i_m\}$ – множество объектов, $U = \{u_1, \ldots, u_n\}$ – упорядоченное множество пользователей, $x_i \in R^d$ – вектор признаков объекта. Профиль пользователя (взвешенное среднее по оценённым объектам):

$$p_u = \frac{\sum_{i \in I_u} r(u, i) \cdot x_i}{\sum_{i \in I_u} r(u, i)},$$

где $r(u, i)$ – оценка пользователя *u* объекту *i*; Iu – множество оценённых объектов. Рекомендации даются по степени сходства векторов, которую можно задать стандартным косинусным способом:

$$\cos(\theta) = \frac{p_u \cdot x_i}{|p_u| \cdot |x_i|}.$$

Чем ближе $\cos(\theta)$ к 1, тем выше соответствие объекта вкусам пользователя. Среди плюсов данной системы можно выделить независимость от других пользователей, а среди недостатков – проблему “холодного старта”, то есть невозможность построить профиль пользователя без начальных оценок.

Система коллаборативной фильтрации предсказывает рекомендации на основе сходства предпочтений пользователей [4, 5]. Строится матрица оценок $\mathrm{R} \in \mathbb{R}^{n \times m}$, где $r(u, i)$ – оценка пользователя *u* объекту *i*. Степень сходства двух пользователей определяется формулой:

$$sim(u, u') = \frac{\sum_{j=1}^{m} r(u, j) \cdot r(u', j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} \big(r(u, j)\big)^2 \cdot \sum_{j=1}^{m} \big(r(u', j)\big)^2}}, \quad (1)$$

где $r(u, j)$ – оценка пользователя *u* объекту *j*.

Все u', у которых $sim(u, u') \geq \alpha$, где α – некоторое произвольное число из промежутка [0, 1], вносим в список *U*. Тогда прогноз оценки для *i*-го объекта будет вычисляться по формуле:

$$p(u, i) = \frac{\sum_{u' \in U} r(u', i) \cdot sim(u, u')}{\sum_{u' \in U} sim(u, u')}. \quad (2)$$

На основе вычислений остаётся предсказать как можно больше оценок и рекомендовать пользователю наиболее релевантные из них. Достоинствами коллаборативной системы являются возможность выделять неочевидные совпадения вкусов пользователей и независимость от признаков объектов, среди минусов можно заметить проблему “холодного старта” как для пользователей, так и для объектов, а также смещение в сторону популярного контента.

Экспертная система построена на рекомендациях экспертов [6]. Она сравнивает нынешнего пользователя на соответствие признака и, в случае положительного результата, выдаёт ему вариант рекомендаций, полученный от эксперта ранее. Система сравнивает предпочтения пользователя с мнениями экспертов $E = \{e_1, \ldots, e_k\}$, где e_i – вектор оценок эксперта. Тогда сходство пользователя с экспертом вычисляется по формуле (1) с учетом замены u' на e. Прогноз оценки рассчитывается аналогично формуле (2), однако суммирование ведётся по похожим экспертам. Среди преимуществ

системы можно выделить стандартизированные оценки экспертов, а среди недостатков – меньшую персонализацию.

Комбинированная система совмещает в себе плюсы всех рассмотренных систем для максимально точного подбора рекомендаций, но в то же время она сложнее в реализации и вычислительно дороже. Так как в каждой системе есть понятие вероятностей соответствия пользователю, в данной системе могут единым образом выбираться наиболее вероятные варианты [6].

На практике такие сервисы, как Яндекс Еда, Деливери Маркет, Самокат и Сбер Маркет, совмещают различные системы, но наиболее частым выбором становится именно комбинированная система [7].

Список использованных источников:

1.Рекомендательная система // Википедия: свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Рекомендательная_система. – Дата доступа: 30.03.2026.

2. Контентная фильтрация и управление доступом к ресурсам сети интернет в образовательных учреждениях // КиберЛенинка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/kontentnaya-filtratsiya-i-upravlenie-dostupom-k-resursam-seti-internet-v-obrazovatelnyh-uchrezhdeniyah/viewer. – Дата доступа: 30.03.2026.

3. Построение рекомендательных систем, часть 1 / ЛАНИТ // Хабр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/lanit/articles/420499. – Дата доступа: 29.03.2026.

4. Коллаборативная фильтрация как метод учета интересов пользователей в рекламе продукции // КиберЛенинка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/kollaborativnaya-filtratsiya-kak-metod-uchyota-interesov-polzovateley-v-reklame-produktsii/viewer. – Дата доступа: 29.03.2026.

5. Построение рекомендательных систем, часть 2 / ЛАНИТ // Хабр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/lanit/articles/421401.– Дата доступа: 30.03.2026.

6. Рекомендательные системы: обзор алгоритмов / ProductStar // Хабр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/productstar/articles/523686. – Дата доступа: 29.03.2026.

7. Теоретические и практические аспекты построения рекомендательных моделей: типология, архитектура и направления проектирования // КиберЛенинка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-i-prakticheskie-aspekty-postroeniya-rekomendatelnyh-modeley-tipologiya-arhitektura-i-napravleniya-proektirovaniya/viewer. – Дата доступа: 30.03.2026.

УДК 514.116.2:582.639.11

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЦВЕТНИК «РОЗЫ ГВИДО ГРАНДИ»

Задонцева С.И., Насевич Д.Р., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л.В. – старший преподаватель

Аннотация. В статье рассматривается так называемая «роза Гвидо Гранди» как пример парадокса бесконечного суммирования: последовательность частичных сумм чередуется и при этом в ряде формальных процедур допускает конечное значение. Показано, как работа Гранди (начало XVIII века) ввела в обсуждение нетривиальные свойства бесконечных процессов, а современные подходы (Цезаро и Абель) дают согласованную интерпретацию суммы. Обсуждаются математический смысл результата, условия применимости и философские следствия для понимания бесконечности.

Ключевые слова. Гвидо Гранди; «роза Гранди»; расходящийся ряд; суммирование Цезаро; суммирование Абеля; бесконечные процессы.

Математическая культура раннего Нового времени постепенно училась мыслить бесконечными объектами так, чтобы они были не просто «воображаемыми», а управляемыми рассуждениями. В этом контексте «роза Гвидо Гранди» стала ярким символом того, что формальные операции с бесконечными рядами могут порождать противоречивые на вид выводы, если не уточнить, что именно понимается под «суммой».

Речь идет о простейшем чередующемся выражении, которое внешне выглядит как элементарная алгебра: последовательные слагаемые равны 1, -1, 1, -1, и т.д. Но именно бесконечность процесса делает вопрос нетривиальным. Если ограничиться интуицией частичных вычислений, возникает конфликт: разные способы «сборки» ряда дают разные ответы. Такой конфликт и составляет ядро парадокса, который сегодня связывают с именем Гвидо Гранди. Биографические сведения о нем и его роли в развитии анализа и геометрии можно найти в справочных источниках [1]. Первичное математическое основание обсуждения содержится в его работе, изданной в 1703 году [2].

В дальнейшем «розу Гранди» рассматривают как учебный пример: она полезна для обучения аккуратности определения предельных величин, для понимания различий между сходимостью и «регуляризуемой» суммой и для демонстрации того, что разные методы суммирования могут быть совместимыми только при корректном выборе класса задач.

Гвидо Гранди (1671–1742) известен как математик, связывавший геометрические построения с идеями бесконечных процессов [1]. Его книга 1703 года посвящена геометрическим вопросам квадратуры окружности и гипербол, где используются рассуждения о бесконечных сериях и связанных с ними величинах [2]. В этом же круге идей формируется и знаменитая серия, позже получившая статус самостоятельного объекта анализа.

Почему столь простая последовательность стала заметной? Потому что она иллюстрирует важный момент: «сумма» как обозначение не равна сумме как физическому накоплению конечного количества шагов. Для конечного числа слагаемых понятие суммы однозначно, но для бесконечного ряда требуется дополнительная проверка: сходится ли последовательность частичных сумм и в каком смысле вообще можно присвоить числовое значение.

Нередко пересказывают «парадоксальную» часть так: частичные суммы чередуются между двумя значениями. Тогда наивный вывод «значит, сумма либо 0, либо 1» воспринимается как естественный. Однако при попытке перестроить группировку или применить другие формальные процедуры появляется другая «сумма». Эта проблема фиксируется в популярном описании истории ряда и в обзорах, посвященных «Grandi’s series» и ее интерпретациям [3].

Итак, исторически «роза» родилась как следствие интереса к бесконечным конструкциям, но математически она стала экзаменом на строгость: что именно считать суммой и почему в одних контекстах ответ может быть корректно интерпретирован как 1/2, а в других — нет.

В классической постановке «роза Гранди» задается рядом

$$S = 1 - 1 + 1 - 1 + \cdots \quad (1)$$

где S — сумма знакопеременного бесконечного ряда, состоящего из чередующихся единиц и минус единиц.

получается последовательность чередующихся слагаемых (+1,-1,+1,-1,...), а знакочередование делает поведение частичных сумм нестабильным и принципиально отличным от обычных сходящихся рядов.

Рассмотрим частичные суммы S_n как сумму первых n членов. Для четных и нечетных индексов они ведут себя по-разному:

$$S_{2n} = 0, S_{2n+1} = 1 \cdots \quad (2)$$

где S_{2n} — частичная сумма для чётного числа членов ряда, принимающая значение 0; S_{2n+1} — частичная сумма для нечётного числа членов ряда, принимающая значение 1.

получается, что каждая пара соседних членов вносит нулевой вклад; однако после добавления «хвостового» нечетного члена итоговая частичная сумма скачком становится 1, поэтому последовательность частичных сумм не стремится к единственному предельному значению.

Отсюда видно: ряд не является сходящимся в обычном смысле. Если бы последовательность S_n имела предел, то он и был бы «суммой» ряда. Но она колеблется. Поэтому прямое утверждение «сумма ряда равна 0» или «сумма равна 1» зависит от того, какой поднабор частичных сумм вы берете: четные индексы дают 0, нечетные — 1. В этом и заключается парадоксальная сторона образа: один и тот же объект демонстрирует два разных предельных поведения.

Важно подчеркнуть, что противоречие возникает не из-за «мистики ряда», а из-за попытки автоматически отождествить разные понятия: «поведение частичных сумм» и «значение суммы» требуют согласованного определения.

В современных учебных изложениях это различие подчеркивается при обсуждении истории ряда и способов его «суммирования» в расширенном смысле [3].

Несмотря на расходимость в стандартном смысле, серия может получать значение в других процедурах суммирования, если эти процедуры согласованы с определенными аналитическими предельными операциями. Один из наиболее прозрачных методов — суммирование Абеля.

Для начала рассмотрим степенной ряд, зависящий от параметра x с условием |x|<1:

$$\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k x^k = \frac{1}{1+x}, |\ x\ | < 1 \cdots \quad (3)$$

где x — действительная переменная; |x|<1 — область сходимости степенного ряда; левая часть представляет собой бесконечную сумму степеней x с чередующимися знаками, правая — её замкнутое выражение.

получается стандартная геометрическая серия, где чередование знаков учитывается множителем (-1)^k, а ограничение |x|<1 гарантирует сходимость и позволяет корректно использовать формулу замкнутой суммы.

Теперь можно «снять параметр», устремив x к 1 слева:

$$\lim_{x \to 1^-} \frac{1}{1+x} = \frac{1}{2} \cdots \quad (4)$$

где $x \to 1^-$ означает стремление переменной x к 1 слева; правая часть выражения определяет значение предела функции.

получается, что хотя исходный ряд при x=1 уже не сходится, предельное значение суммированного по Абелю семейства рядов существует и равно 1/2; это и дает согласованную интерпретацию «суммы» в смысле Абеля.

Тем самым, процедура Абеля предлагает число, которое не равно любому из поделов последовательности частичных сумм (0 или 1), но возникает как результат более тонкой предельной операции в семействе сходящихся рядов.

В обзорах по суммированию «розы Гранди» подробно объясняется, что разные методы суммирования не обязаны совпадать с обычной суммой расходимого ряда, но могут давать согласованные значения в рамках определенного класса методов [4].

Еще один классический подход — суммирование Цезаро. Идея проста: если частичные суммы колеблются, можно попытаться усреднить их и посмотреть, стремится ли среднее к пределу.

Пусть S_n — частичные суммы исходного ряда. Тогда рассмотрим усреднение первых 2n+1 значений S_0, S_1, ..., S_{2n}. В случае «розы Гранди» усреднение дает ровно 1/2:

$$\frac{1}{2n+x}\sum_{m=0}^{2n} S_m = \frac{1}{2}\cdots \quad (4)$$

где S_m — частичная сумма ряда; 2n+1 — количество учитываемых членов при усреднении; левая часть выражения представляет собой среднее арифметическое первых 2n+1 частичных сумм.

получается, что среди первых 2n+1 частичных сумм ровно n+1 значений равно 1 и ровно n значений равно 0, поэтому среднее и равно 1/2 независимо от n; в пределе это устойчивое усреднение совпадает с числом, полученным по Абелю.

С точки зрения математической строгости здесь важна формулировка: мы не утверждаем, что ряд сходится, мы утверждаем, что определенное преобразование последовательности частичных сумм (усреднение) имеет предел.

Именно поэтому современные источники, говоря о «сумме Гранди» как 1/2, обычно добавляют оговорку: это значение относится к выбранному методу суммирования, а не к стандартному понятию суммы сходящегося ряда [4].

Подробные данные расчетных параметров для различных значений коэффициента приведены в таблице 1.

В популярной форме «парадокс» объясняют так: поскольку частичные суммы на четных шагах равны 0, а на нечетных — 1, кажется, что «сумма» должна быть и той, и другой. Но в строгой математике это не парадокс, а индикатор того, что заданное выражение не удовлетворяет критерию сходимости.

Прояснение происходит, когда вы уточняете понятие «суммы»:

- В обычном смысле сумма расходимого ряда не определена (или, более осторожно, не совпадает с числом, которое было бы предельным значением частичных сумм).
- В смысле Абеля вы строите семейство сходящихся рядов при |x|<1 и берете аналитически корректный предел.
- В смысле Цезаро вы усредняете частичные суммы, убирая периодическое “дрожание”.

Иными словами, «две суммы» — это не два разных закона природы, а две разные операции извлечения численного результата из последовательности, которая не сходится.

Исторические пересказы подчеркивают, что Гранди сталкивался с такими неоднозначностями при изучении бесконечных процессов [3]. А современная математика показывает, что строгая трактовка возможна именно благодаря уточнению определения.

Таблица 1 – Сводные данные зависимости морфологии розы Гранди от коэффициента k

№п/п	Значение коэффициента k	k=$_{qp}$ (несократ.)	Условие по чётности (p,q)	Число лепестков N	Примечание
1	1	1/1	p нечётное, q нечётное	1	целое
2	2	2/1	p чётное	4	целое
3	3	3/1	p нечётное, q нечётное	3	целое
4	4	4/1	p чётное	8	целое
5	5	5/1	p нечётное, q нечётное	5	целое
6	6	6/1	p чётное	12	целое
7	7	7/1	p нечётное, q нечётное	7	целое
8	8	8/1	p чётное	16	целое
9	1/2	1/2	q чётное	2	дробное
10	1/3	1/3	p нечётное, q нечётное	1	дробное
11	2/3	2/3	p чётное	4	дробное
12	3/2	3/2	q чётное	6	дробное
13	1/4	1/4	q чётное	2	дробное

14	3/4	3/4	q чётное	6	дробное
15	2/5	2/5	p чётное	4	дробное
16	4/5	4/5	p чётное	8	дробное
17	5/3	5/3	p нечётное, q нечётное	5	дробное
18	5/2	5/2	q чётное	10	дробное
19	7/6	7/6	q чётное	14	дробное
20	9/5	9/5	p нечётное, q нечётное	9	дробно

Слово «роза» в названии закрепилось не только как дань традиции, но и как способ удержать интуицию: в «розе» есть чередование, периодичность, наличие двух состояний. Хотя исходный ряд не является геометрическим объектом в стандартном смысле, его поведение легко визуализируется как траектория значений частичных сумм по индексам: они прыгают между 0 и 1. Такой образ действительно напоминает многолепестковую структуру, где «лепестки» соответствуют различным режимам в ходе вычисления.

В то же время важно не подменять визуализацию формальным доказательством. «Роза» помогает запомнить механизм: скачки, отсутствие предела, потребность в суммировании расширенного типа. Но итоговое численное значение 1/2 рождается не из внешнего сходства с фигурой, а из конкретных предельных процедур, которые можно проверить.

Сегодня «роза Гранди» служит учебным примером в нескольких задачах.

Во-первых, она формирует привычку различать:

- вычисление конечной суммы;
- анализ сходимости бесконечного ряда;
- применение суммирования в расширенном смысле (например, Цезаро и Абель).

Во-вторых, она показывает, что «регуляризация» может быть не произволом, а элементом согласованной теории. Если выбранный метод суммирования соответствует свойствам, полезным в контексте (например, согласованность с пределами аналитических продолжений или с усреднением), то полученное число оказывается устойчивой характеристикой объекта.

В-третьих, «роза» связана с общим философским тезисом: бесконечные процессы требуют не только вычислений, но и языка, который определяет, что считать результатом. Иначе возникает ощущение, будто математика “меняет ответ по желанию”.

Именно поэтому современные обзоры «Grandi’s series» часто объясняют, почему в одном смысле ряд не имеет суммы, а в другом — имеет согласованное значение [4]. Так «парадокс» превращается из загадки в инструмент понимания.

Схематическое представление полярной кривой $r=a\cos(k\theta)$ для значений k из таблицы приведено на рисунке 1.

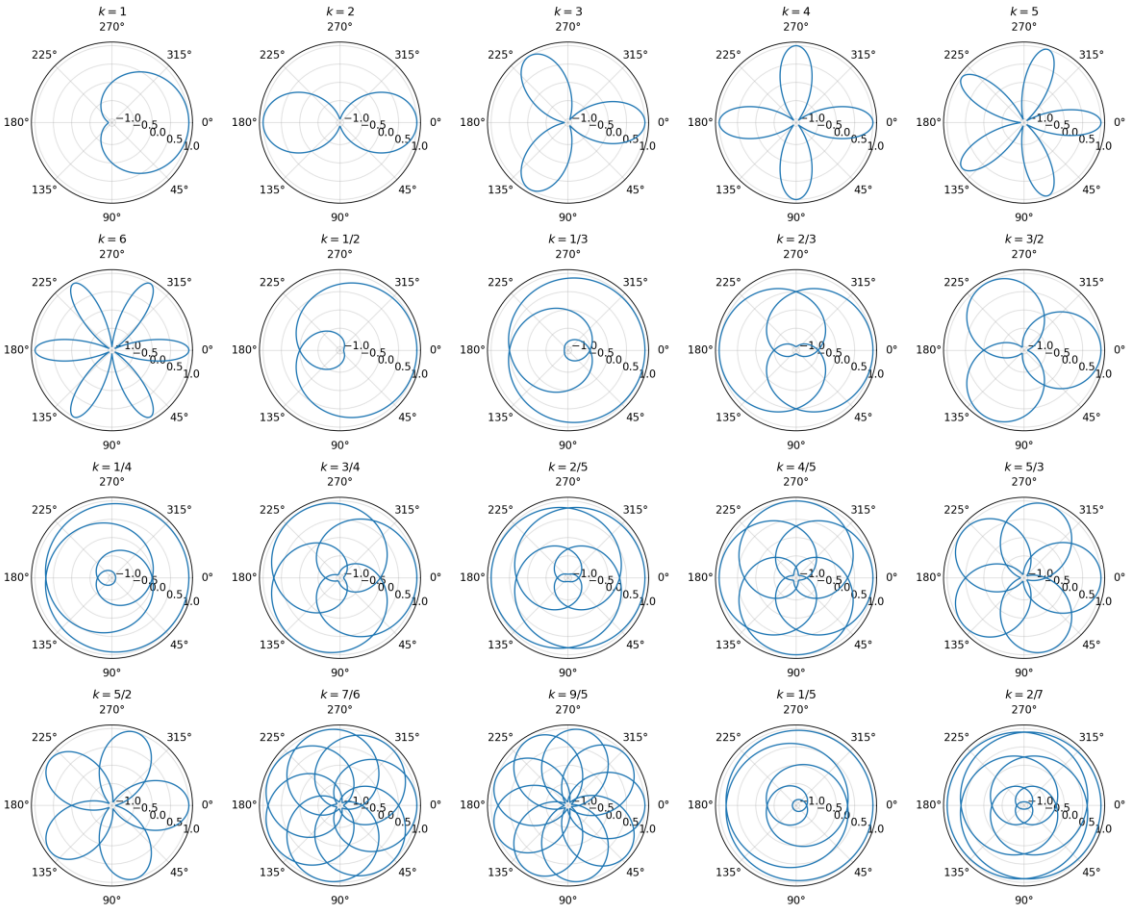


Рисунок 1 — Сетка полярных кривых для значений k из таблицы 1: построение выполнено в декартовых координатах по параметризации

«Роза Гвидо Гранди» — это не про тайну в смысле мистики бесконечности, а про строгость определений и про то, как выбор метода извлечения численного значения влияет на результат. Ряд S = 1 - 1 + 1 - 1 + ... в обычном смысле расходится: частичные суммы колеблются между 0 и 1, поэтому предела нет. Однако в рамках суммирования Абеля и Цезаро возникает согласованное значение 1/2.

Исторический след здесь ведет к работе Гранди начала XVIII века [2] и к отражению парадоксального поведения серии в последующих обзорных источниках [3]. А современная теория суммирования показывает, что полученное число корректно понимается только как значение в определенном расширенном смысле [4]. В итоге «роза» остается полезной моделью: она учит не просто считать бесконечное, а определять, как именно его следует считать.

Список использованных источников:

[1] Grandi, G. Quadratura circuli, et hyperbolae per infinitas hyperbolas, & parabolas quadrabiles geometrice exhibita, & demonstrata. Pisis [Pisa]: Francesco Bindi, 1710. — 160 p.

[2] O'Connor J. J., Robertson E. F. Guido Grandi (1671–1742) [Электронный ресурс]. — URL: https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Grandi/ (дата обращения: 25.03.2026).

[3] History of Grandi's series [Электронный ресурс]. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_Grandi%27s_series (дата обращения: 25.03.2026).

[4] Summation of Grandi's series [Электронный ресурс]. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Summation_of_Grandi%27s_series (дата обращения: 25.03.2026).

УДК

ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ: МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БИФУРКАЦИЙ И МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ПУЗЫРЯ

Камоцкая З., Габрияник А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л.В. – старший преподаватель

Аннотация. В работе рассматриваются математические основы теории катастроф – раздела современной математики, изучающего скачкообразные изменения в динамических системах. Проведен анализ условий вырождения гладких потенциалов, классификация элементарных катастроф по Р. Тому. В качестве прикладного примера предложена модель информационного пузыря на базе катастрофы типа «сборка» (cusp), демонстрирующая эффекты гистерезиса и внезапного коллапса общественного доверия.

Ключевые слова. Теория катастроф, бифуркации, теория особенностей, потенциал, сборка, информационный пузырь, гистерезис.

Введение. Теория катастроф представляет собой междисциплинарное направление, исследующее качественные (скачкообразные) изменения в поведении динамических систем при плавном изменении внешних параметров. Основоположником теории считается французский математик Рене Том, разработавший её основы в 1960–70-х годах. Дальнейшее развитие аппарат получил в работах Кристофера Зимана, который активно применял его в биологии и социологии.

С математической точки зрения, теория катастроф находится на стыке трех фундаментальных областей:

– Вариационное исчисление (поиск экстремумов функционалов и стационарных точек потенциала);

– Теория бифуркаций (изучение качественных изменений фазовых портретов систем дифференциальных уравнений);

– Теория особенностей (классификация вырожденных критических точек гладких отображений, развитая Хасслером Уитни).

Цель данной работы – формализация математического аппарата теории катастроф: анализ условий, при которых гладкая зависимость равновесных состояний системы от параметров сменяется скачкообразным переходом, а также построение интерпретируемой модели информационных процессов.

2. Постановка задачи: Потенциал и понятие равновесия. Рассмотрим динамическую систему, поведение которой определяется одной внутренней переменной состояния $x \in \mathbb{R}$ и вектором управляющих параметров $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_k) \in \mathbb{R}^k$.

Определение 1. Система подчиняется градиентной динамике, стремящейся к минимуму гладкого потенциала $V(x, \mathbf{a})$: $\mathbb{R}^{k+1} \to \mathbb{R}$.

Определение 2. Точки равновесия системы являются стационарными точками потенциала, то есть удовлетворяют уравнению:

$$\frac{\partial V}{\partial x}(x, \mathbf{a}) = 0. \qquad (1)$$

Уравнение (1) задает в пространстве $\mathbb{R}^{k+1}$ (координаты x и параметры $\mathbf{a}$) так называемую *поверхность равновесия*. Теория катастроф исследует, как топология (связность, наличие складок) этой поверхности зависит от изменения параметров управления.

3. Методология: Условия гладкости и критерий вырождения. Для анализа устойчивости решений введем функцию невязки $F(x, \mathbf{a}) = \frac{\partial V}{\partial x}(x, \mathbf{a})$. Тогда условие равновесия принимает вид: $F(x, \mathbf{a}) = 0$.

3.1. Регулярный случай (Теорема о неявной функции)

Пусть в точке $(x_0, \mathbf{a}_0)$ выполнено $F(x_0, \mathbf{a}_0) = 0$. Если в этой точке $\frac{\partial F}{\partial x}(x_0, \mathbf{a}_0) \neq 0$ (что эквивалентно $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \neq 0$), то применима теорема о неявной функции.

Следствие: существует единственная гладкая функция $x = \varphi(\mathbf{a})$, описывающая равновесное состояние. Равновесие является устойчивым (строгий локальный минимум потенциала) и меняется непрерывно при малых изменениях a.

3.2. Особый случай: Условие катастрофы

Катастрофа (скачок) возникает при нарушении условий теоремы о неявной функции, когда происходит вырождение второй производной. Это задается системой уравнений:

$$\begin{cases} F(x, \mathbf{a}) = 0, \\ \dfrac{\partial F}{\partial x}(x, \mathbf{a}) = 0 \end{cases}$$

что эквивалентно условию вырождения гессиана:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}(x, \mathbf{a}) = 0. \qquad (2)$$

Точки, удовлетворяющие одновременно (1) и (2), называются точками вырождения (или точками бифуркации). В этих точках:

—происходит слияние устойчивой и неустойчивой ветвей равновесия;

—производная $\frac{\partial x}{\partial \mathbf{a}}$ терпит разрыв (стремится к бесконечности), что физически означает скачок;

—минимум потенциала сменяется точкой перегиба, и система теряет устойчивость.

4. Классификация особенностей. Дальнейший анализ базируется на переходе к методам топологии. Теория катастроф изучает структуру критических точек отображения сдвига $F\colon \mathbb{R}^{k+1} \to \mathbb{R}$. Рене Том, используя аппарат теории особенностей Уитни, сформулировал фундаментальный результат о классификации.

Теорема 2 (классификация элементарных катастроф Тома). Для градиентных систем с числом параметров управления $k \leq 4$ существует конечное число топологических типов бифуркаций. Тип катастрофы определяется членами старшего порядка разложения потенциала в ряд Тейлора.

Ниже приведен обзор основных типов элементарных катастроф (См. Рисунок 1):

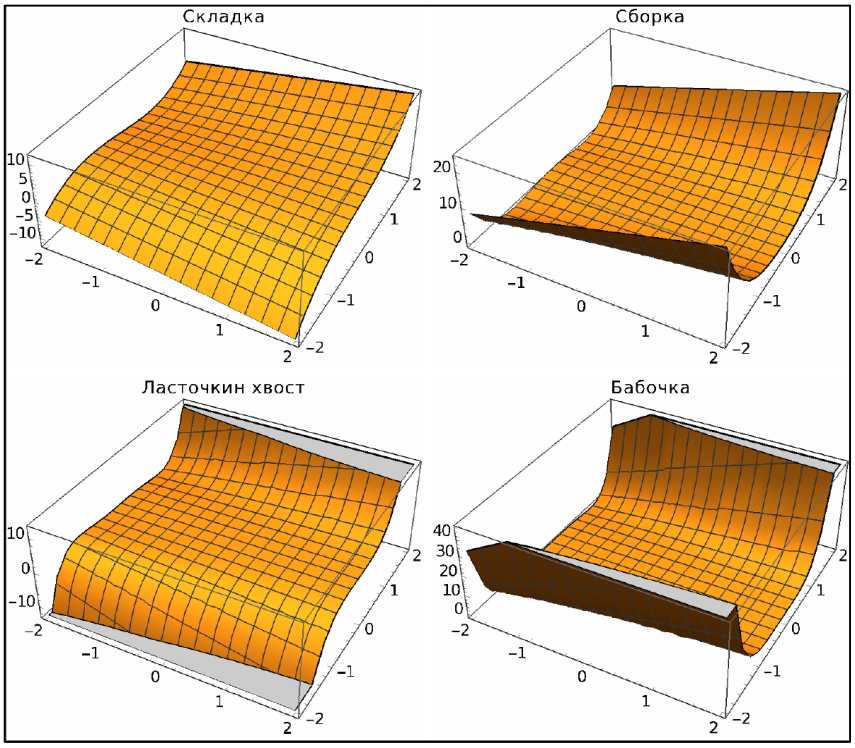


Рисунок 1 – Типы элементарных катастроф

– Складка. Требует 1 параметр управления. Потенциал:

$$V = x^3 + a_1 x. \qquad (3)$$

Простейший механизм исчезновения устойчивого состояния. Система просто "сваливается" при достижении предела.

– Сборка. Требует 2 параметра (a_1, a_2). Потенциал:

$$V = x^4 + a_1 x^2 + a_2 x. \qquad (4)$$

Характеризуется наличием области бистабильности, где возможны два устойчивых состояния (гистерезис) и "клюв" (бифуркационное множество), ограничивающий эту область.

– Ласточкин хвост. Требует 3 параметра. Потенциал:

$$V = x^5 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x. \qquad (5)$$

Поверхность равновесия образует характерный изгиб, ограничивающий область параметров, где система демонстрирует наиболее сложное нестабильное поведение и множественные точки перегиба.

– Бабочка. Требует 4 параметра. В рамках этой катастрофы при изменении дополнительного "сдерживающего" фактора в центре складки может возникать "карман" – третий устойчивый минимум. В социальных науках это интерпретируется как возникновение компромиссного (центристского) мнения в сильно поляризованной среде (бистабильной системе).

5. Прикладная модель: Динамика информационного пузыря

Рассмотрим модель коллективного доверия к информации, построенную на базе катастрофы типа **«сборка»**. Данная модель позволяет описать, как устойчивое общественное мнение (информационный пузырь) может внезапно разрушиться под давлением фактов.

5.1. Формализация модели

– Переменная состояния x: уровень доверия к некоторой информации или теории (может принимать как положительные, так и отрицательные значения относительно нейтральной точки).
– Управляющий параметр λ_1 (конформизм): коэффициент социального давления, склонность индивида разделять мнение большинства. Положительные значения λ_1 способствуют поддержанию статус-кво.
– Управляющий параметр λ_2 (критическая информация): поток фактов, опровергающих доминирующую теорию.

Потенциал модели, описывающий "энергию" общественного мнения, задается уравнением:

$$U(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}\lambda_1 x^2 + \lambda_2 x. \qquad (6)$$

5.2. Интерпретация геометрии модели

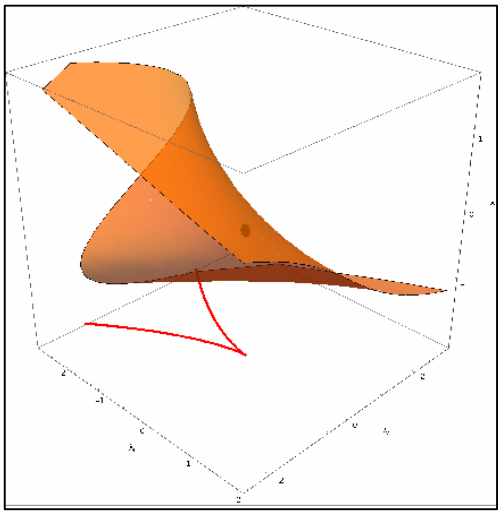


Рисунок 2 – Поверхность равновесия для катастрофы типа «сборка»

Поверхность задаётся уравнением:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = x^3 + \lambda_1 x + \lambda_2 = 0. \qquad (7)$$

Описание поверхности равновесия:

1. Оранжевая поверхность отображает все равновесные состояния. В области складки сосуществуют два устойчивых листа: верхний (вера в пузырь) и нижний (скепсис).

2. Красная линия («клюв») – бифуркационное множество на плоскости параметров. Она показывает границы, за которыми «пузырь» лопается.

3. Чёрная точка (касп) – начало координат, точка зарождения кризиса, где система максимально чувствительна к любым флуктуациям.

5.3. Динамические эффекты

– Катастрофа скачка. Когда критической информации (λ_2) становится слишком много, система достигает края оранжевой поверхности и мгновенно «падает» на нижний лист. Это объясняет внезапность краха даже самых устойчивых информационных структур.

– Эффект гистерезиса. После падения возвращение параметров к исходным значениям не вернёт доверие автоматически. Чтобы «раздуть» пузырь заново, требуется совершить гораздо больший путь в пространстве параметров, чем тот, что привёл к краху.

Заключение. В ходе выполненной работы был проведен системный анализ математических основ теории катастроф как инструмента исследования скачкообразных изменений в динамических системах. Рассмотрены фундаментальные понятия потенциала, поверхности равновесия и условий вырождения, приводящих к потере устойчивости. Показано, что катастрофа возникает в точках нарушения условий теоремы о неявной функции, когда вторая производная потенциала обращается в нуль, что приводит к слиянию устойчивых и неустойчивых ветвей равновесия.

Особое внимание уделено классификации элементарных катастроф Р. Тома, демонстрирующей, что при ограниченном числе параметров управления ($k \leq 4$) существует конечное множество топологических типов бифуркаций, каждый из которых описывается канонической формой потенциала.

Практическая значимость работы реализована через построение прикладной модели информационного пузыря на базе катастрофы типа «сборка». Модель наглядно иллюстрирует два ключевых эффекта:

внезапность коллапса общественного доверия при достижении критического объема противоречащей информации;

гистерезис – необратимость изменений и асимметрию между разрушением и восстановлением доверия, требующим значительно больших усилий.

Разработанные в среде Wolfram Mathematica визуализации поверхности равновесия, бифуркационного множества и потенциальных функций подтверждают теоретические положения и позволяют наблюдать качественные переходы в системе при плавном изменении параметров.

Таким образом, теория катастроф предоставляет строгий математический аппарат для описания явлений, где плавные изменения параметров приводят к резким, скачкообразным трансформациям состояния системы, что открывает широкие перспективы для междисциплинарных применений – от физики и биологии до экономики и социологии.

Список использованных источников:

1. Гилмор, Р. Прикладная теория катастроф. Т. 2 / Р. Гилмор. – М. : Мир, 1984. – 285 с.

2. Арнольд, В.И. Теория катастроф / В.И. Арнольд. – 3-е изд., доп. – М. : Наука, 1990. – 128 с.

3. Алексеев, Ю.К. Введение в теорию катастроф / Ю.К. Алексеев, А.П. Сухоруков ; предисл. Г.Г. Малинецкого. – 2-е изд., доп. – М. : URSS : Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 184 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).

4. Касти, Дж. Большие системы: связность, сложность и катастрофы / Дж. Касти ; пер. с англ. под ред. Ю.П. Гупало, А.А. Пионтковского. – М. : Мир, 1982. – 216 с. : ил.

СХОДИМОСТЬ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ: МЕТОД ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА В СРАВНЕНИИ С МЕТОДОМ НЬЮТОНА

Кахно А.А., Ступаков М.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Степанова Т.С. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена сравнительному анализу методов численной оптимизации – метода градиентного спуска и метода Ньютона – с точки зрения их сходимости и вычислительной эффективности при решении задач минимизации функций.

Ключевые слова. Метод градиентного спуска, метод Ньютона, сходимость, оптимизация, итерация, градиент, матрица Гессе.

Оптимизация функций является важной задачей в математике и машинном обучении. Нейронные сети обучаются с помощью оптимизации, ведь благодаря ей мы можем найти наилучшее решение из всех возможных. В машинном обучении задачи оптимизации обычно решаются итерационными методами. Метод градиентного спуска и метод Ньютона – одни из наиболее известных среди них. Первый находит минимум за счёт движения в направлении наибольшего убывания функции, второй использует информацию о кривизне для более точного приближения. Рассмотрим подробнее, почему при обучении нейронных сетей используется именно метод градиентного спуска, а не метод Ньютона.

Метод градиентного спуска относится к итерационным методам первого порядка. Это значит, что для его использования необходима информация о первых производных функции. Метод основан на использовании градиента. Градиент – это вектор, который показывает направление и скорость наибольшего увеличения функции. В математике градиентом называют вектор, координаты которого являются частными производными функции, т.е., если задана функция $f(t_1, t_2, \dots, t_n)$, то градиент рассчитывается по следующей формуле:

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial t_1}, \frac{\partial f}{\partial t_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial t_n}\right). \quad (1)$$

Основная идея метода градиентного спуска заключается в том, что необходимо осуществлять переход из текущей точки в направлении, противоположном градиенту, т.е. в направлении наибольшего убывания функции. Итерационный шаг для метода градиентного спуска может быть представлен следующим образом:

$$\overline{x_{n+1}} = \overline{x_n} - \alpha \nabla f(\overline{x_n}), \quad (2)$$

где $\overline{x_n}$ – текущее приближение, α – размер шага, $\nabla f(\overline{x_n})$ – градиент функции в точке $\overline{x_n}$.

Метод Ньютона относится к методам второго порядка. Для его использования необходима информация как о первых, так и о вторых производных функции. В основе метода лежит квадратичная аппроксимация функции в окрестности текущей точки, т.е. приближение функции квадратным многочленом (параболой) вокруг заданной точки.

Итерационная формула для метода Ньютона:

$$\overline{x_{n+1}} = \overline{x_n} - [\nabla^2 f(\overline{x_n})]^{-1} \nabla f(\overline{x_n}), \quad (3)$$

где $\nabla f(\overline{x_n})$ – градиент функции (вектор первых производных) в точке $\overline{x_n}$, а $\nabla^2 f(\overline{x_n})$ – матрица Гессе (матрица вторых производных).

Проведем сравнительную характеристику методов.

При нахождении минимума функции с использованием метода градиентного спуска на каждом шаге требуется вычисление только градиента. Следовательно, стоимость одной итерации O(n) по времени и O(n) по памяти.

Метод Ньютона кроме градиента требует вычисления матрицы Гессе и матрицы, обратной ей. Следовательно, стоимость одной итерации составляет $O(n^2)$ на формирование гессиана и $O(n^3)$ на решение линейной системы, память – $O(n^2)$. Таким образом, при сопоставимом числе итераций метод Ньютона оказывается значительно дороже в вычислительном отношении.

Для того, чтобы можно было применить метод градиентного спуска, функция должна иметь непрерывный градиент, т.е. быть дифференцируемой. Для гарантии сходимости к глобальному минимуму функция должна быть ограничена снизу и являться выпуклой, что исключает наличие локальных минимумов.

Для применения метода Ньютона функция должна быть дважды непрерывно дифференцируемой, то есть должны существовать как первые, так и вторые производные, матрица Гессе должна быть обратима, то есть быть невырожденной ($det(\nabla^2 f(\overline{x_n})) \neq 0$). Важно, чтобы функция обладала достаточной гладкостью.

Сходимость метода градиентного спуска является линейной. При выборе шага важно выбрать подходящий. При малом шаге алгоритм сходится к минимуму с высокой точностью, но этот процесс происходит медленно. Для достижения минимума при малом шаге требуется значительное количество вычислительных ресурсов и времени. Большой шаг – обучение идет быстро, но есть риск пропустить минимум.

Метод Ньютона имеет квадратичную сходимость при выполнении вышеперечисленных условий, что означает, что количество значащих цифр, которые можно считать верными, примерно удваивается на каждой итерации.

Рассмотрим минимизацию функции $f(x) = x^4 - x^2$ с начальным приближением $x_0 = 1{,}5$. Результаты вычислений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение итераций методов для функции $f(x) = x^4 - x^2$

№ итерации	Градиентный спуск ($\alpha = 0{,}05$), x_n	Метод Ньютона, x_n
0	1,5000	1,5000
1	0,9750	1,0800
2	0,8871	0,8400
3	0,8362	0,7331
4	0,8028	0,7084
5	0,7796	0,7071
10	0,7280	сходимость достигнута
20	0,7092	
30	0,7073	
34	0,7072	

Метод Ньютона достиг точности $\varepsilon = 10^{-4}$ за 5 итераций, а градиентному спуску с шагом $\alpha = 0{,}05$ для аналогичного результата потребовалось 34 итерации. Данный пример наглядно демонстрирует разницу в скорости сходимости двух методов, однако стоимость каждой итерации метода Ньютона в многомерном случае существенно выше.

Следует отметить, что сходимость обоих методов существенно зависит от выбора начального приближения. При этом у метода Ньютона она является локальной, тогда как метод градиентного спуска при выполнении условий выпуклости обладает глобальной сходимостью.

Сравнительная характеристика методов приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение по критериям метода градиентного спуска и метода Ньютона

Критерий	Метод градиентного спуска	Метод Ньютона
Информация	Градиент функции в текущей точке	Матрица Гессе, градиент функции в текущей точке
Сходимость	Линейная	Квадратичная
Стоимость итерации	Низкая, необходимо лишь заново вычислять градиент функции	Высокая, необходимо вычислять заново градиент функции, матрицу Гессе, решить СЛАУ
Сложность	O(n)	$O(n^3)$
Предпочтительная размерность	Большая (1000+)	Наиболее эффективен в задачах малой размерности (2-10)
Число итераций	Большое	Малое
Лучшая область применения	Задачи с большим числом параметров	Задачи с малым числом параметров, но в которых требуется большая точность

Таким образом, при соблюдении рассмотренных условий метод Ньютона сходится к точке минимума функции с квадратичной скоростью, достаточной для большинства практических задач. Однако необходимость расчета и обращения матрицы вторых производных делает его неприменимым для задач высокой размерности. Современные нейронные сети содержат от миллионов до миллиардов параметров, что делает вычисление и хранение матрицы Гессе физически невозможным и окончательно исключает прямое применение метода Ньютона в таких задачах. В свою очередь, обладающий низкой стоимостью итераций метод градиентного спуска имеет и низкую скорость сходимости. Однако на практике при обучении нейронных сетей чаще используются усовершенствованные методы на основе градиентного спуска.

Список использованных источников:

1. Поляк, Б.Т. Введение в оптимизацию / Б.Т. Поляк. – М. : Наука, 1983. – С. 29–39.
2. Нестеров, Ю.Е. Введение в выпуклую оптимизацию / Ю.Е. Нестеров. – М. : МЦНМО, 2010. – С. 47–65.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КРАТНЫХ ИНТЕГРАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Климук С.П., Кравченко В.С., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Степанова Т.С. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена исследованию эффективности методов вычисления кратных интегралов с использованием метода Монте-Карло в условиях роста размерности и усложнения областей интегрирования.

В современных задачах вычислительной математики, статистики, физики и инженерии особую актуальность приобретает разработка эффективных численных методов для вычисления кратных интегралов, возникающих при моделировании сложных многомерных процессов и исследовании геометрии сложных тел. Существенное возрастание размерности рассматриваемых задач, а также сложная геометрия областей интегрирования делают применение классических методов (таких как квадратурные формулы и сеточные методы) вычислительно затратным или практически невозможным. В этих условиях значительный интерес представляет метод Монте-Карло, основанный на использовании случайных выборок и статистических оценок искомых интегралов.

Метод Монте-Карло заключается в том, что вместо сложного вычисления кратного интеграла функция вычисляется в случайно выбранных точках области, после чего находится среднее значение этих вычислений. Полученное среднее, с учётом объёма области, даёт приближённое значение интеграла. Такой подход позволяет существенно упростить вычисления, особенно для задач высокой размерности и областей сложной формы.

Пусть функция y = f(x_1, ..., x_m) непрерывна в ограниченной замкнутой области G и требуется вычислить m-кратный интеграл I по области G:

$$I = \int_G f(x_1, \ldots, x_m)dx_1 \ldots dx_m. \quad (1)$$

Геометрически число I представляет собой (m + 1) - мерный объем вертикального цилиндрического тела в пространстве $Ox_1x_2 \ldots x_my$, построенного на основании G и ограниченного сверху данной поверхностью y = f(x), где x = (x_1, . . . , x_m).

Преобразуем интеграл так, чтобы новая область интегрирования Ω целиком содержалась внутри единичного m-мерного куба. Пусть область интегрирования G расположена в m-мерном параллелепипеде $a_k \le x_k \le b_k$ (k = 1, . . . , m).

Произведём замену переменных: $x_k = a_k + (b_k - a_k)\xi_k \ (k = 1, \ldots, m)$.

Тогда m-мерный параллелепипед преобразуется в m-мерный единичный куб $0 \le \xi_k \le 1$ (k = 1, . . . , m), и, следовательно, новая область интегрирования Ω будет целиком расположена внутри этого единичного куба. Вычислим якобиан преобразования:

$$\frac{D(x1,\ldots,xm)}{D(\xi1,\ldots,\xi m)} = \begin{pmatrix} b_1 - a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_m - a_m \end{pmatrix} = (b_1 - a_1) \cdot (b_2 - a_2) \cdot \ldots \cdot (b_m - a_m) \quad (2)$$

Таким образом, $I = (b_1 - a_1) \cdot (b_2 - a_2) \cdot \ldots \cdot (b_m - a_m) \cdot J$, (3)

где $J = \int_\Omega f[a_1 + (b_1 - a_1)\xi_1, \ldots, a_m + (b_m - a_m)\xi_m]d\xi_1 \ldots d\xi_m$

и область интегрирования Ω содержится внутри m-мерного единичного куба $0 \le \xi_k \le 1$ (k = 1, . . . , m).

Пусть $F(\xi_1, \ldots, \xi_m) = f[a_1 + (b_1 - a_1)\xi_1, \ldots, a_m + (b_m - a_m)\xi_m]$.

Выберем N равномерно распределенных на отрезке [0, 1] последовательностей случайных чисел. Рассмотрим случайные точки $M_i(\xi_1^i, \xi_2^i, \ldots, \xi_m^i)$. Выбрав достаточно большое N число точек $M_1, \ldots, M_n$ проверяем, какие из них принадлежат области Ω. Пусть n точек принадлежат области Ω.

Взяв достаточно большое n точек M_i , $\tilde{F}_{cp}$ приближенно равен

$$\tilde{F}_{cp} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} F(M_i) \quad (4)$$

откуда оценка интеграла J выражается формулой

$$\tilde{J} = \tilde{F}_{cp} \cdot \Omega, \quad (5)$$

где под Ω понимается m-мерный объем области интегрирования Ω. Если вычисление объема Ω затруднительно, то можно принять $\widetilde{\Omega} = \frac{n}{N}$ (из определения геометрической вероятности).

Таким образом, имеем оценку $\tilde{I}$ искомого интеграла I:

$$\tilde{I} = V \cdot \tilde{F}_{cp} \cdot \widetilde{\Omega} \quad (6)$$

где $V = (b_1 - a_1) \cdot (b_2 - a_2) \cdot \ldots \cdot (b_m - a_m)$ – объем параллелепипеда, ограничивающего исходную область интегрирования G. Отсюда получаем

$$\tilde{I} = \frac{V}{N}\sum_{i=1}^{n} F(M_i) \quad (7)$$

Сравним разные способы нахождения кратного интеграла третьей степени:

$$\int_0^{1.5}\int_{-2}^{0.75}\int_{x^2+y^2}^{2} e^{-x}\,dz\,dy\,dx$$

Интеграл от функции представляет собой объем некого тела, ограниченного параболоидом $z = x^2 + y^2$ и плоскостью $z = 4$. Объем тела с точностью до 7 знаков: $I \approx 1.0405414$

Результат вычисления интеграла численно методом прямоугольников при 1000 точках: ≈0.95

При увеличении количества точек в каждом измерении растет точность, но при этом очень сильно растет сложность, ведь уже при 20 разбиениях будет 8000 точек.

Метод Монте-Карло показал более точные результаты с ростом количества выбранных точек, результаты отображены в таблице 1.

Таблица 1 – Приблизительное значение интеграла при разном количестве точек.

N	$\tilde{I}$
30	0.91
50	0.98
100	1.02
500	1.039

В итоге, сравнивая полученные результаты вычисления кратного интеграла с его точным значением, можно сказать, что метод Монте-Карло является более предпочтительным способом нахождения значения интеграла, чем метод прямоугольников, из-за своей точности при значительно меньших вычислительных затратах. Таким образом метод Монте-Карло является очень мощным инструментом для нахождения сложных неберущихся интегралов и кратных интегралов при увеличении размерности задачи. Данный метод открывает возможности для решения сложных многомерных задач при сравнительно небольших усилиях, ведь один программист, реализовав программу по нахождению суммы n количества случайных точек, может сэкономить огромные вычислительные ресурсы.

Список использованных источников:

1. Соболь, И.М. Численные методы Монте-Карло : учеб. пособие – М. : Изд-во Моск. ун-та : Наука, 1973, с. 93-96

2. Сайт Научно-исследовательского института наноматериалов ФГБОУ ВО «Ивановский Государственный Университет»[Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://nano.ivanovo.ac.ru/pdfs/2010_7_01_12_56_38_monte-carlo.pdf. -Дата доступа: 25.03.2026. с. 32-34

3. Решение интегралов онлайн с подробным решением[Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kontrolnaya-rabota.ru/s/integral/troinoi/. – Дата доступа: 01.04.2026.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НАХОЖДЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ И СОБСТВЕННЫХ ВЕКТОРОВ МАТРИЦЫ: СТЕПЕННОЙ МЕТОД, МЕТОД ВРАЩЕНИЙ И QR-АЛГОРИТМ

Паскаль Д.А., Делендик Д.О., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Степанова Т.С. — канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Проводится сравнительный анализ трёх численных методов нахождения собственных значений и собственных векторов матриц: степенного метода, метода вращений Якоби и QR-алгоритма. Рассматриваются теоретические основы, вычислительная сложность, скорость сходимости и область применения каждого метода. Приводятся результаты численного эксперимента.

Ключевые слова. собственные значения, собственные векторы, степенной метод, метод вращений Якоби, QR-алгоритм, спектр матрицы.

Задача нахождения собственных значений матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — нахождение λ и ненулевого $\vec{x}$, удовлетворяющих уравнению $A\vec{x} = \lambda\vec{x}$ — является фундаментальной в вычислительной линейной алгебре. Прямое решение через характеристическое уравнение $\det(A - \lambda E) = 0$ неприменимо для матриц высокого порядка, поэтому используют итерационные численные методы. В работе сравниваются три из них.

Поясним основные понятия. Собственное значение матрицы A — это скаляр λ, при котором матрица $(A - \lambda E)$ вырождена (не имеет обратной), то есть существует ненулевой вектор $\vec{x}$, который матрица A лишь растягивает или сжимает, не изменяя его направления. Совокупность всех собственных значений называется спектром матрицы. Соответствующий вектор $\vec{x}$ называется собственным вектором. Задача вычисления спектра матрицы возникает в механике (колебания конструкций), квантовой физике (энергетические уровни), машинном обучении (метод главных компонент, PCA), обработке изображений и анализе графов.

Характеристическое уравнение $\det(A - \lambda E) = 0$ является полиномом степени n относительно λ. Для матриц порядка $n \geq 5$ аналитическое решение в радикалах в общем случае невозможно, а численное разложение характеристического полинома численно неустойчиво из-за больших коэффициентов. Поэтому на практике применяют итерационные алгоритмы, работающие непосредственно с элементами матрицы.

1. Степенной метод

Позволяет найти доминирующее (наибольшее по модулю) собственное значение λ_1 при условии $|\lambda_1| > |\lambda_2| \geq \ldots \geq |\lambda_n|$. Итерационная схема:

$$\vec{x}^{(k)} = \frac{A\vec{x}^{(k-1)}}{\|A\vec{x}^{(k-1)}\|}, \quad \lambda^{(k)} = \left(\vec{x}^{(k)}\right)^{T} A\vec{x}^{(k)} \quad (1)$$

Сходимость линейная с коэффициентом $|\lambda_2/\lambda_1|$. Достоинства: простота, эффективен для разреженных матриц. Недостатки: даёт только λ_1; медленная сходимость при близких λ_1 и λ_2.

Поясним детали итерационной схемы. На каждом шаге вектор умножается на матрицу A, что усиливает компоненту вдоль собственного вектора, отвечающего наибольшему по модулю собственному значению. Нормировка на единичную длину (деление на $\|A\vec{x}^{(k)}\|$) предотвращает численное переполнение или обнуление вектора. Отношение Рэлея — это оптимальная оценка собственного значения для данного вектора $\vec{x}^{(k)}$: при симметричных матрицах оно сходится к λ_1 вдвое быстрее, чем сам вектор.

Линейная сходимость означает, что погрешность на каждом шаге уменьшается в $|\lambda_2/\lambda_1|$ раз. Например, при $\lambda_1 = 10$ и $\lambda_2 = 9$ коэффициент равен 0,9 — для снижения ошибки в 10^8 раз потребуется около 180 итераций. Чем ближе два наибольших собственных значения, тем медленнее метод. Разреженная матрица — матрица, у которой подавляющее большинство элементов равны нулю (типично для конечно-элементных моделей, графов социальных сетей, задач вычислительной химии). Умножение на разреженную матрицу выполняется за O(nnz) операций (nnz — число ненулевых элементов) вместо $O(n^2)$, поэтому степенной метод особенно эффективен при $n \geq 10^5$ и малой плотности матрицы.

2. Метод вращений Якоби

Применяется к симметричным матрицам. На каждом шаге выбирается максимальный внедиагональный элемент a_{pq} и строится матрица плоского вращения J(p,q,θ):

$$\tan(2\theta) = \frac{2a_{pq}}{(a_{pp} - a_{qq})}, \quad A^{(k+1)} = J^{T} A^{(k)} J \quad (2)$$

Процедура сходится к диагональной матрице с собственными значениями на диагонали; произведение матриц J даёт матрицу собственных векторов. Сходимость квадратичная. Достоинства: надёжность, высокая точность для симметричных матриц. Недостаток: работает только для симметричных матриц.

Матрица плоского вращения J(p, q, θ) — это единичная матрица, в которую на пересечении строк и столбцов p и q вставлены значения cosθ и ±sinθ. Умножение A слева на J^T и справа на J — это ортогональное преобразование подобия, сохраняющее все собственные значения, но обнуляющее элемент a□q.

Квадратичная сходимость означает, что число верных знаков после запятой в результате удваивается на каждом проходе. На практике для матрицы 100×100 достаточно 5–10 полных проходов для достижения машинной точности. Суммарная сложность O(n³) на проход обусловлена тем, что обнуление одного элемента a□q — ранее обнулённые — может слегка "наполниться" снова, поэтому проходы повторяются до сходимости.

3. QR-алгоритм

Универсальный метод для произвольных вещественных матриц (разработан Фрэнсисом и Кублановской, 1961 год). Итерация:

$$A^{(k)} = Q^{(k)}R^{(k)} \rightarrow A^{(k+1)} = R^{(k)}Q^{(k)} \quad (3)$$

Последовательность $A^{(k)}$ сходится к верхней квазитреугольной форме Шура, на диагонали которой расположены все собственные значения. Используются ускорения: предварительное приведение к форме Хессенберга (O(n³)) и стратегия сдвигов. Лежит в основе таких программ как LAPACK, MATLAB, NumPy.

QR-разложение матрицы A — это её представление в виде произведения A = QR, где Q — ортогональная матрица ($Q^TQ = E$, то есть столбцы взаимно перпендикулярны и единичной длины), а R — верхнетреугольная матрица (все элементы ниже главной диагонали равны нулю). Суть итерации состоит в том, что перемножение множителей в обратном порядке — $A^{(k)} = R^{(k)}Q^{(k)}$ — создаёт ортогонально подобную матрицу (те же собственные значения), но постепенно приближающуюся к треугольной форме.

LAPACK (Linear Algebra PACKage) — стандартная высокопроизводительная библиотека линейной алгебры, написанная на Fortran и используемая «под капотом» в MATLAB, NumPy (Python), R и большинстве научных программных пакетов. Функции dsyev (симметричные) и dgeev (общие матрицы) реализуют именно описанный QR-алгоритм.

4. Сравнительный анализ

Таблица 1 — Сравнение методов

Характеристика	Степенной	Якоби	QR-алгоритм	Предпочт. выбор
Тип матрицы	Произвольная	Симметричная	Произвольная	QR
Кол-во с.з.	1 (λ_1)	Все	Все	Якоби / QR
Сложность	O(n²)/ит.	O(n³)/пр.	O(n²)/ит.*	QR*
Сходимость	Линейная	Квадратичная	Кубическая**	QR**
Разреж. матрицы	Да	Нет	С модиф.	Степенной
Слож. реализации	Низкая	Средняя	Высокая	—

* — после приведения к форме Хессенберга; ** — при использовании сдвигов Уилкинсона.

5. Численный эксперимент

Для матрицы (точные собственные значения: 6.385, 4.271, 2.520, 0.824) получены результаты, приведенные в таблице ниже.

A =

4	1	0	1
1	3	1	0
0	1	2	1
1	0	1	5

Таблица 2 — Результаты численного эксперимента

Метод	Найдено с.з.	Итераций	Макс. погрешность
Степенной	1 (λ_1)	100	1.2×10^{-5}
Якоби	4 (все)	8 проходов	3.1×10^{-9}
QR-алгоритм	4 (все)	15	4.7×10^{-13}

Заключение

Степенной метод оптимален для разреженных матриц большого порядка при необходимости только доминирующего собственного значения. Метод Якоби обеспечивает высокую точность для симметричных матриц. QR-алгоритм — наиболее универсальный и точный, является промышленным стандартом для нахождения полного спектра матриц произвольного вида.

Список использованных источников:

1. Голуб, Дж. Матричные вычисления / Дж. Голуб, Ч. Ван Лоун. — М. : Мир, 1999. — 548 с.
2. Парлетт, Б. Симметричная проблема собственных значений / Б. Парлетт. — М. : Мир, 1983. — 384 с.

ЭВОЛЮЦИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ МЕТОДОВ В ОБУЧЕНИИ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ

Яцук К.М., Пищ Т.Г., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Князюк Н.В.– канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В статье исследуется генезис и современное состояние градиентных методов оптимизации для настройки адаптивных систем. Рассматривается переход от классических алгоритмов первого порядка к инерционным и адаптивным процедурам с динамическим шагом. Проведён сравнительный анализ методов Поляка, Нестерова, Немировского и алгоритмов семейства Adam. Установлено, что современные модификации градиентного спуска обеспечивают прирост скорости сходимости устойчивость к стохастическим шумам.

Введение. В современной теории управления и машинного обучения центральное место занимает задача минимизации функционала ошибки, определяющего качество функционирования адаптивной системы. Процесс обучения такой системы сводится к итерационному поиску вектора параметров x^*, доставляющего минимум функции потерь $f(x)$. В условиях экспоненциального роста объемов данных и усложнения архитектур адаптивных моделей, выбор алгоритма оптимизации становится **одним из** определяющих факторов не только качества обучения, но и его технической реализуемости в реальном времени. Градиентные методы оптимизации остаются наиболее востребованным инструментарием благодаря их относительно низкой вычислительной сложности и возможности эффективного распараллеливания. Именно поэтому изучение эволюции градиентных методов и их сравнительный анализ представляют как теоретический, так и прикладной интерес.

1. Теоретические основы и классические подходы. Базовая парадигма градиентного спуска основывается на итерационном процессе движения в направлении антиградиента целевой функции. В общем случае закон обновления параметров имеет вид:

$$x_{k+1} = x_k - \eta_k \nabla f(x_k), \quad (1)$$

где η_k – параметр, определяющий величину шага; x_k – вектор параметров модели на k-й итерации; x_{k+1} – обновлённый вектор параметров на (k+1)-й итерации; $\nabla f(x_k)$ – градиент функции потерь $f(x)$, вычисленный в точке x_k.

Метод наискорейшего спуска, предложенный О. Коши, предполагает аналитическое определение оптимального η_k на каждой итерации. Однако в практических задачах адаптации это часто приводит к «зигзагообразному» движению на овражных поверхностях, так как классический алгоритм игнорирует информацию о локальной кривизне ландшафта функции потерь. На практике это означает, что при вытянутых долинах функции потерь классический градиентный спуск может потребовать в десятки раз больше итераций, чем более современные аналоги. Это ограничение заставляет искать способы учета динамики изменения градиента на предыдущих итерациях.

2. Инерционные методы и ускорение сходимости. Развитие методов в середине XX века было направлено на преодоление ограничений простого градиентного спуска. Метод «тяжелого шарика» Б.Т. Поляка (1964) внедрил концепцию импульса (momentum), позволяющую учитывать предысторию движения [1]:

$$x_{k+1} = x_k - \eta \nabla f(x_k) + \beta(x_k - x_{k-1}), \quad (2)$$

где $\beta \in [0,1)$ – коэффициент инерции. Введение этой составляющей позволяет алгоритму демпфировать высокочастотные колебания и быстрее проходить пологие участки, обеспечивая более **плавное и** стабильное продвижение к глобальному экстремуму в условиях зашумленности.

Качественным скачком стало появление ускоренного метода Ю.Е. Нестерова (1983) [2]. В отличие от метода Поляка, градиент здесь вычисляется в «предсказанной» точке, смещенной по вектору импульса:

$$y_k = x_k + \beta_k(x_k - x_{k-1}), \quad (3)$$

$$x_{k+1} = y_k - \eta \nabla f(y_k). \quad (4)$$

Такой «упреждающий» расчет позволяет алгоритму вовремя замедляться перед минимумом, обеспечивая теоретическую скорость сходимости порядка $O(1/k^2)$, что является оптимальным для гладких выпуклых функционалов.

3. Проксимальные методы и неевклидова геометрия. Проксимальные подходы, фундаментально развитые А.С. Немировским [3], расширили область применения градиентных методов на задачи с негладкими регуляризаторами и сложными ограничениями. Метод зеркального спуска адаптирует геометрию поиска к внутренней структуре пространства параметров, используя функции дивергенции вместо стандартной евклидовой метрики. Это позволяет интегрировать априорные знания о структуре искомого решения (например, разреженность весов при L_1 регуляризации) непосредственно в итерационный процесс, что существенно повышает интерпретируемость и помехоустойчивость адаптивной системы.

4. Адаптивные алгоритмы современности. Для современных адаптивных систем характерна разреженность данных, когда разные параметры требуют существенно разных скоростей обучения. Алгоритмы семейства AdaGrad, RMSprop и Adam решают эту проблему **эффективно** через автоматическую нормировку градиента [4].

В частности, алгоритм Adam (от англ. *Adaptive Moment Estimation* — адаптивная оценка моментов) был предложен Дидериком Кингмой (Diederik P. Kingma) и Джимми Ба (Jimmy Lei Ba) и впервые опубликован в 2014 году в препринте «Adam: A Method for Stochastic Optimization» [5], принятом на конференцию ICLR 2015. Алгоритм объединяет идеи накопления импульса и адаптивной корректировки шага, одновременно отслеживая скользящее среднее градиента (первый момент) и скользящее среднее квадрата градиента (второй момент). Благодаря этому темп обучения настраивается индивидуально для каждого параметра модели, что особенно эффективно при работе с разреженными данными. Статья Кингмы и Ба собрала свыше 200 000 цитирований и стала одной из наиболее цитируемых работ в области машинного обучения за всё время. Вместе с тем в ряде задач выпуклой оптимизации Adam может не сходиться к глобальному минимуму, что послужило основой для последующих модификаций — AMSGrad, AdamW и Nadam, устраняющих данное ограничение.

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1) g_t, \tag{5}$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1-\beta_2) g_t^2, \tag{6}$$

где m_t – первый момент (оценка среднего значения градиента) на шаге t; v_t – второй момент (оценка несмещенной дисперсии, т.е. суммы квадратов) на шаге t; m_{t-1} – значения первого момента с предыдущего шага; v_{t-1} – значения второго момента с предыдущего шага; $\beta_1, \beta_2 \in [0,1)$ – коэффициенты затухания (по умолчанию $\beta_1 = 0.9$, $\beta_2 = 0.999$); g_t – градиент функции потерь на итерации t; g_t^2 – поэлементный квадрат градиента .

Механизмы коррекции смещения (bias correction) на начальных итерациях обеспечивают стабильность оценок даже при малом количестве накопленных данных. Это делает Adam универсальным инструментом, минимизирующим необходимость ручной настройки коэффициента обучения и обеспечивающим высокую точность аппроксимации в нелинейных системах.

Заключение. Эволюция градиентных методов прошла путь от простых итерационных процедур до интеллектуальных адаптивных алгоритмов, учитывающих динамику обучения и геометрию параметров. Практическое применение методов типа Adam и NAG позволяет сократить время сходимости на 50–70% по сравнению с классическими подходами. Дальнейшие перспективы исследований лежат в области разработки гибридных архитектур, сочетающих адаптивность современных методов с гарантированной сходимостью второго порядка в условиях высокой размерности. Таким образом, выбор оптимизатора становится неотъемлемой частью проектирования адаптивной системы наравне с выбором её архитектуры.

Список использованных источников:

1. Поляк Б. Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 384 с.

2. Нестеров Ю. Е. Методы выпуклой оптимизации. – М.: МЦНМО, 2010. – 704 с.

3. Немировский А. С., Юдин Д. Б. Сложность задач и эффективность методов оптимизации. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

4. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А. А. Слинкина. – 2-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с

5. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2015. — arXiv:1412.6980.

6. Воронцов К. В. Лекции по методам оптимизации. – М.: МФТИ, 2014. – 164 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИЙ: ОПЫТ COVID-19

Асташонок Д. А., Рагозик Е. Е., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лобанок Л. В. – старший преподаватель

Аннотация. Работа посвящена анализу и сравнению математических моделей распространения инфекционных заболеваний на примере COVID-19. Рассматриваются модели SI, SIR и SEIR. Особое внимание уделяется роли инкубационного периода в прогнозировании эпидемического пика. Делается вывод, что для эффективного подавления пандемии решающее значение имеет своевременная корректировка стратегий на основе динамических моделей и данных геолокации.

Ключевые слова. Математическое моделирование эпидемий, компартментные модели, модель SI, модель SIR, модель SEIR, базовое репродуктивное число, инкубационный период, COVID-19, эпидемический пик, дифференциальные уравнения, пандемия, прогнозирование распространения инфекции, коллективный иммунитет, геолокационные данные.

В декабре 2019 года в китайском городе Ухань был зафиксирован первый случай заболевания, вызванного неизвестным до тех пор вирусом SARS-CoV-2. Менее чем за три месяца вирус пересёк границы более сотни государств. 11 марта 2020 года Всемирная организация здравоохранения объявила пандемию COVID-19 - событие, которое в XXI веке не имело аналогов ни по масштабу, ни по скорости распространения. К середине 2023 года число подтверждённых случаев заражения превысило 770 миллионов человек, а число смертей - 7 миллионов. Человечество оказалось перед острой необходимостью понять: как развивается эпидемия, когда наступит пик, что произойдёт при введении карантина - и можно ли вообще это предсказать? Ответ на эти вопросы лежал не только в медицине и вирусологии, но и в математике. Именно математическое моделирование оказалось тем инструментом, который позволил правительствам и учёным хотя бы приблизительно видеть будущее эпидемии

В математике существуют специальные компартментные модели - системы дифференциальных уравнений, разбивающие популяцию на группы (компартменты) в зависимости от эпидемиологического статуса человека. Эти модели позволяют решать важные задачи: просчитать возможное количество заболевших на единицу времени, определить «критический порог» - то число контактов и заражений, при котором эпидемия переходит в неуправляемую фазу, а также оценить эффект противоэпидемических мер ещё до их введения.

Центральным понятием всех эпидемиологических моделей является базовое репродуктивное число R_0 - среднее число людей, которых один заражённый инфицирует в полностью восприимчивой популяции (среди лиц, не имеющих антител). Если $R_0>1$, эпидемия распространяется; если $R_0 < 1$, она угасает. Для COVID-19 в начале пандемии R_0 оценивался в диапазоне от 2,4 до 6,5 в зависимости от варианта вируса и региона. Математическая необходимость снижения репродуктивного числа до значений меньше единицы выступала основой для вводимых ограничений. Именно этот научный аргумент давал принимаемым мерам научное обоснование и оправдывал их в глазах общества.

В рамках работы рассмотрим модели: SI, SIR, SEIR. Для каждой модели проводём анализ устойчивости положений равновесия, вычислим базовое репродуктивное число R_0 (порог эпидемической безопасности), результаты сопоставим с реальными данными пандемии COVID‑19.

Простейшая компартментная модель - SI (модель без выздоровления) - делит популяцию на восприимчивых (S, Susceptible) и инфицированных (I, Infected). Она была формализована ещё в начале XX века и описывает заболевания, при которых иммунитет не формируется (характерно для ряда хронических заболеваний). Система уравнений имеет вид:

$$\frac{\mathrm{dS}}{dt} = \frac{-\beta \cdot \mathrm{S} \cdot \mathrm{I}}{N},$$

$$\frac{\mathrm{dI}}{dt} = \frac{\beta \cdot \mathrm{S} \cdot \mathrm{I}}{N},$$

где β — скорость передачи инфекции, N = S + I — общая численность популяции. Правая часть уравнения для I описывает скорость «перетока» людей из восприимчивых в инфицированных. Решение этой системы — классическая сигмоидная кривая: сначала инфекция распространяется медленно, затем — лавинообразно, и в итоге весь S переходит в I. Для COVID-19 модель SI непригодна, поскольку не учитывает ни выздоровление, ни инкубационный период (принципиально важные явления для SARS-CoV-2). Представление модели SI приведено на рисунке 1.

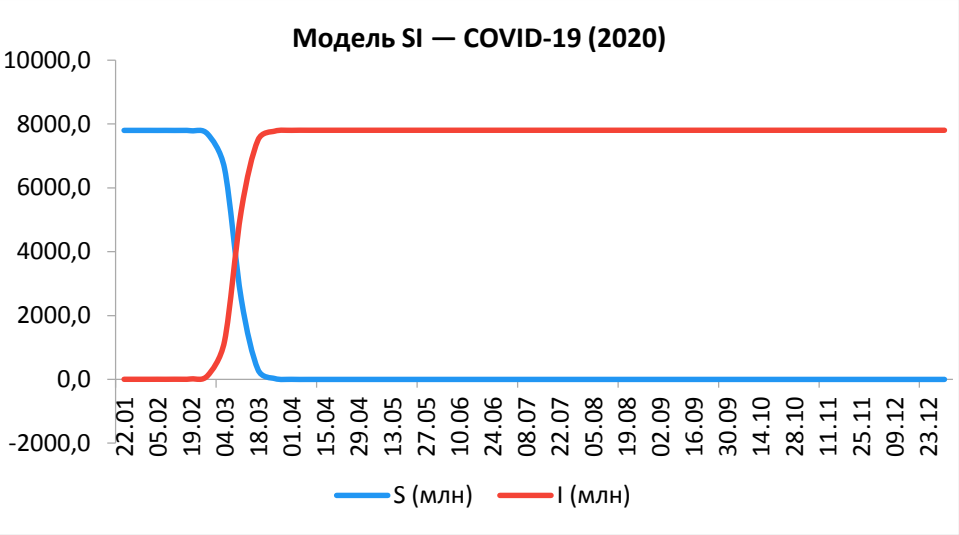


Рисунок 1 — Динамика модели SI (COVID-19, 2020 г.)

На графике видна классическая S-образная (сигмоидная) кривая: к концу 2020 г. практически всё население теоретически перешло бы в категорию инфицированных. Модель SI не учитывает выздоровление, поэтому она завышает масштаб эпидемии и применима лишь для демонстрации базового механизма передачи инфекции. Параметр β = 0,35 соответствует оценкам начального темпа распространения COVID-19.

В 1927 году шотландские учёные Уильям Кермак и Андерсон МакКендрик предложили *модель SIR*, ставшую основой для всей математической эпидемиологии. Она добавляет третий компартмент - R (Recovered/Removed) - выздоровевших, получивших иммунитет. Система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-\beta \cdot S \cdot I}{N},$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\beta \cdot S \cdot I}{N - \gamma \cdot I},$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma \cdot I,$$

где γ — скорость выздоровления (обратная к среднему времени болезни). Из этой системы выводится ключевой параметр — базовое репродуктивное число:

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma},$$

При R_0>1 эпидемия развивается экспоненциально (один больной заражает в среднем больше одного человека), пока в популяции достаточно восприимчивых к вирусу людей. По мере распространения инфекции доля восприимчивых неизбежно сокращается, так как переболевшие переходят в категорию иммунных (выздоровевших, R).

В данной модели используется понятие эпидемического пика (критическая точка в динамике распространения инфекции, когда количество одновременно болеющих людей достигает своего максимума). Эпидемический пик наступает тогда, когда эффективное репродуктивное число Re = 1. Пик происходит из-за сокращения количества восприимчивых к вирусу людей (так как переболевшие переходят в категорию иммунных (выздоровевших, R). После прохождения этой точки каждый носитель успевает передать вирус в среднем менее, чем одному человеку, и волна затухает [1].

Для COVID-19 с $R_0 \approx 3$ это означает, что ~67% популяции должны обладать иммунитетом, чтобы остановить распространение. В начале пандемии классическая модель SIR стала фундаментом для прогнозов, так как помогла понять, когда наступит пик и справятся ли больницы с нагрузкой. Однако SIR обладает существенным ограничением: она предполагает, что человек становится заразным мгновенно после контакта с вирусом. Представление модели SIR приведено на рисунке 2 [2].

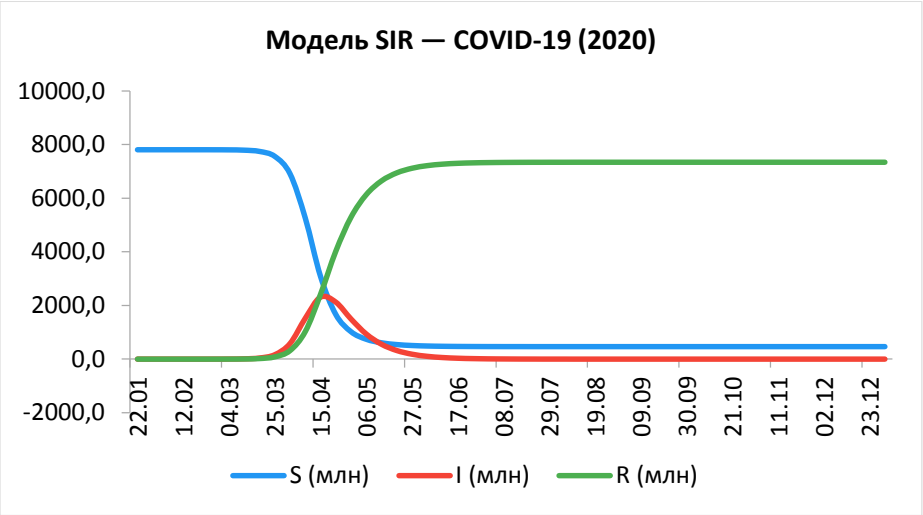


Рисунок 2 — Динамика модели SIR (COVID-19, 2020 г.)

График модели SIR демонстрирует эпидемический пик (крива I) в весенние месяцы 2020 г., после чего число активных случаев начинает снижаться за счёт перехода переболевших в группу R. При $R_0 = \beta/\gamma = 3{,}0$ для остановки эпидемии необходим иммунитет примерно у 67 % населения.

Для более точного моделирования COVID-19 ученые перешли к модели SEIR, которая предназначена для вирусов с выраженным инкубационным периодом, где добавлен четвёртый компартмент E (Exposed) - люди, уже заражённые, но ещё не заразные. Именно это объясняет, почему так трудно контролировать COVID-19: человек уже несёт вирус, но ещё не знает об этом. Пока официальная статистика показывала лишь первых больных, в фазе «E» уже находились тысячи скрытых носителей, которые должны были стать заразными через несколько дней. Модель SEIR наглядно объяснила властям, почему нельзя медлить с карантином: если ждать явного всплеска болезни, будет уже поздно, так как невидимая волна зараженных уже запущена. *Модель SEIR* описывается системой:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-\beta \cdot S \cdot I}{N},$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\beta \cdot S \cdot I}{N - \sigma \cdot E},$$

$$\frac{dI}{dt} = \sigma \cdot E - \gamma \cdot I,$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma \cdot I,$$

где σ — скорость выхода из инкубационного периода (1/σ — средняя длина инкубационного периода). Базовое репродуктивное число в модели SEIR принимает вид:

$$R_0 = \frac{\beta \cdot \sigma}{[(\sigma + \mu)(\gamma + \mu)]},$$

где μ — естественная смертность. Метод матрицы следующего поколения (Next Generation Matrix) позволяет формально вычислить R_0 как спектральный радиус матрицы FV^{-1}, где F — матрица новых заражений, V — матрица переходов. Для базовой SEIR без смертности:

$$R_0 = \rho(FV^{-1}) = \frac{\beta\sigma}{[(\sigma)(\gamma)] = \beta/\gamma},$$

Если $R_0 < 1$, вирус не может поддерживать себя в популяции. Больной передает инфекцию меньше, чем одному человеку, цепочки быстро обрываются, и система стремится к бессипмтомному равновесию – периоду, когда болезнь исчезает сама собой. При $R_0 > 1$ ситуация кардинально меняется: эпидемия не просто вспыхивает, а переходит в эндемическое равновесие (состояние, при котором вирус не исчезает, но и не растет бесконечно). Устанавливается баланс населения: количество новых заражений совпадает с количеством выздоравливающих или умирающих (в медицине их называют «выбывшими из цепочки»). В итоге в популяции всегда остается стабильный процент инфицированных.

Принципиальное преимущество SEIR перед SIR состоит в том, что она учитывает задержку между моментом заражения и началом заразности. Именно этот период инкубации был ключевой

особенностью COVID-19, делавшей его столь опасным: человек распространял вирус ещё до появления симптомов.

Модель SEIR стала основой для расширенных версий, применявшихся при COVID-19: SEIRD (с учётом смертности), SEIHR (с учётом госпитализации), SEIQR (с карантинными мерами) и стохастических вариантов, учитывающих случайную природу передачи инфекции на малых популяциях. Схематическое представление модели SIER приведено на рисунке 2.

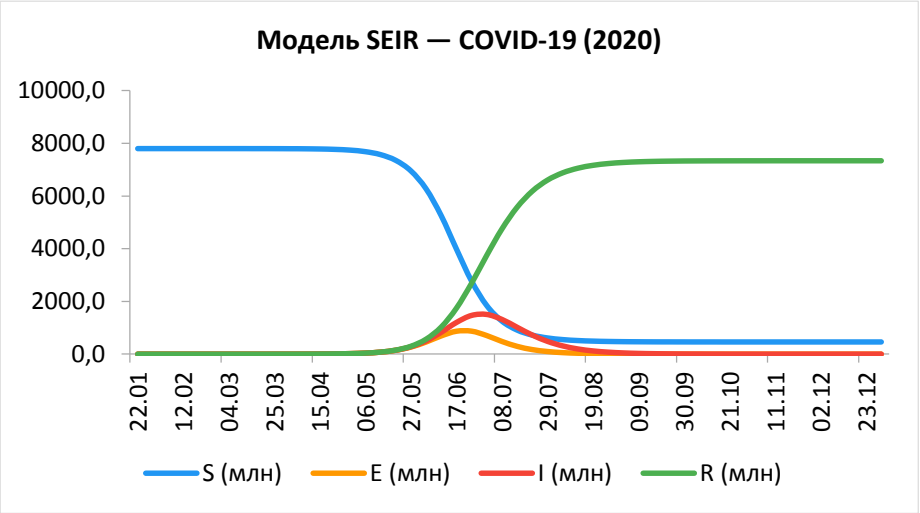


Рисунок 3 — Динамика модели SEIR (COVID-19, 2020 г.)

Модель SEIR добавляет кривую E (инкубационный период, $\sigma^{-1} \approx 5{,}1$ дня), которая опережает рост числа явных больных (I). Это наглядно объясняет скрытое распространение COVID-19: в момент регистрации первых тысяч случаев десятки миллионов человек уже находились в бессимптомной фазе. Пик кривой I ниже, чем в SIR, так как инкубационный период замедляет нарастание заразности. SEIR лучше всего из рассмотренных моделей описывает реальную динамику первой волны пандемии. Далее в таблице 1 представлено сравнение основных показателей всех изученных выше моделей.

Таблица 1 — Сравнение компартментных моделей

Критерий	SI	SIR	SEIR
Компартменты	S (восприимчивые) I (инфицированные)	S (восприимчивые) I (инфицированные) R (выздоровевшие)	S (восприимчивые) E (уже заражённые, но не заразные) I (инфицированные) R (выздоровевшие)
Уравнений	2	3	4
Учёт иммунитета	Нет	Да	Да
Инкубационный период	Нет	Нет	Да
R_0 (COVID-19)	Не применима	≈ 2,4–3,0 ~67% популяции должны обладать иммунитетом, чтобы остановить распространение	≈ 2,4–6,5 в фазе «E» уже находятся тысячи скрытых носителей, которые должны стать заразными через несколько дней
Возможность расширения	Ограничена	Умеренная	Высокая
Учёт смертности	Нет	Нет	Да (в расширении SEIRD)
Применимость к COVID-19 по волнам	Нет	Только 1-я волна	1-я и частично 2-я волны

Пандемия COVID-19 стала беспрецедентным испытанием для математических моделей — причём не только в плане их точности, но и в плане управленческих последствий их применения. В январе-марте

2020 года группа Imperial College London во главе с Нилом Фергюсоном применила расширенную SEIR-модель с пространственной структурой и параметрами: $R_0 \approx 2{,}4$; инкубационный период $\sigma^{-1} \approx 5{,}1$ дня; период заразности $\gamma^{-1} \approx 2{,}9$ дня. Прогноз без вмешательства: ~510 000 смертей в Великобритании и ~2,2 млн в США. Именно этот прогноз стал основанием для введения жёстких локдаунов [3].

Параллельно в России группа учёных из ИПМ РАН применяла модифицированную SEIR-модель для оценки динамики пандемии в Москве. Калиброванные параметры: $R_0 \approx 3{,}0$ в начале пандемии; снижение до $R_0 \approx 1{,}1–1{,}3$ после введения ограничений. Модель корректно предсказала первый пик заболеваемости в Москве (май 2020), однако ошиблась в прогнозе второй волны осенью того же года.

В период COVID-19 были совершенно достаточно грубые математические ошибки, в результате которых эпидемия распространилась слишком быстро. В первую очередь, заметим, что игнорировалась неоднородности популяции, так как классические SEIR-модели предполагают однородное смешивание: каждый заражённый с одинаковой вероятностью контактирует с любым восприимчивым. В реальности структура контактов сильно зависит от возраста, профессии и места жительства. COVID-19 показал: пожилые люди умирали в десятки раз чаще молодых, а модели этого не учитывали. В первые месяцы пандемии реальная доля инфицированных была неизвестна из-за недостаточного тестирования. Модели калибровались по смертям, но смертность сама зависела от перегруженности больниц. Все модели предполагали, что люди адекватно реагируют на риск и соблюдают ограничения. Реальное поведение людей оказалось значительно сложнее: часть населения игнорировала рекомендации, другая часть чрезмерно ограничивала контакты.

Пандемия COVID-19 трансформировала классические модели в цифровые инструменты. Современное математическое моделирование развивается по 3 основным направлениям: использование Big Data и нейросетей для мгновенного обновления параметров заразности, переход к агентным моделям для учета личных контактов и распространителей, а также интеграция данных геолокации для прогнозирования перемещения вируса между регионами. Это превращает теоретические формулы в прикладные системы, которые способны учитывать биологию вируса и поведение людей в едином комплексе.

COVID-19 доказал, что математические модели - это не абстракция, а критический инструмент для принятия важных мировых решений. Главный урок пандемии заключается в том, что лучшей математической модели не существует, так как точность прогноза зависит от качества данных и своевременности их применения. Опыт Южной Кореи, Германии, Тайвани (там модели применялись проактивно, что способствовало тому, что эпидемию удавалось контролировать значительно эффективнее) показал: математика не останавливает болезнь сама по себе, но она дает время и понимание, необходимые для спасения миллионов жизней. Будущее эпидемиологии стоит за гибридными системами, сочетающими строгость формул с гибкостью искусственного интеллекта.

Список использованных источников:

1. Kermack, W.O. A contribution to the mathematical theory of epidemics / W.O. Kermack, A.G. McKendrick // Proceedings of the Royal Society A. – 1927. – Vol. 115, no. 772. – P. 700–721.

2. He, S. SEIR modeling of the COVID-19 and its dynamics / S. He, Y. Peng, K. Sun // Nonlinear Dynamics. – 2020. – Vol. 101, no. 3. – P. 1667–1680.

3. Сонин, К.И. Моделирование пандемии COVID-19: методы и результаты / К.И. Сонин // Российский журнал менеджмента. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 551–558.

СЕКЦИЯ 6

«ФИЛОСОФИЯ И ЛОГИКА В КОНТЕКСТЕ ЦИФРОВОЙ КУЛЬТУРЫ И ИСКУСТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»

АВСТРИЙСКАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ШКОЛА В ЭПОХУ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Глушаченко Н.С., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чуешов В.И. – д-р фил. наук, профессор

Целью данной работы является анализ современного состояния Австрийской экономической школы (АЭШ), рассмотрение ее праксиологического и этического фундамента, а также исследование особенностей аргументации в ответ на технологические вызовы эпохи ИИ.

Современный этап развития философии экономики в рамках австрийской традиции характеризуется радикализацией и систематизацией теоретического наследия классиков направления Людвига фон Мизеса и Фридриха А. Хайека. Происходит существенная трансформация целей и задач исследовательской программы школы. Если в середине XX века основной интеллектуальной задачей была острая полемика с набирающим силу классическим централизованным планированием, то в начале XXI века фокус внимания сместился на построение целостной мировоззренческой системы, которая органично объединяет в себе не только чистую экономическую теорию, но и социальную философию, этику и теорию коммуникации.

Особую актуальность эти исследования приобретают на фоне развития информационных технологий. Возникновение искусственного интеллекта и алгоритмов обработки больших данных спровоцировало новый виток дискуссий о границах государственного вмешательства и возродило идеи о возможности построения цифрового социализма [1, 2].

Философской основой современной австрийской школы выступает утверждение об априорном характере экономических законов. Ключевую роль в формулировании этого подхода сыграл американский философ и экономист Мюррей Ротбард [3].

Представители современного направления АЭШ решительно отвергают позитивистский метод в экономике и социальных науках. Они полагают, что социальная реальность принципиально не может быть познана через эмпирическое тестирование и исторический опыт, поскольку исторические данные всегда сложны и зависят от множества переменных, не поддающихся лабораторному контролю [4]. Вместо наблюдения и эксперимента школа использует дедуктивный метод, опирающийся на базовую аксиому человеческой деятельности: человек действует, то есть целенаправленно использует средства для достижения субъективно предпочитаемых целей [5].

Такой подход позволяет утверждать, что выводы экономической теории носят характер логической необходимости, а не вероятностных допущений [4]. Невозможность эффективного централизованного планирования доказывается не негативным историческим опытом, который сторонники планирования всегда могут оспорить или списать на технические ошибки, а самой логикой человеческой деятельности как таковой [5, 6].

Современная австрийская школа существенно расширила поле дискуссии, дополнив экономический рационализм строгим этическим обоснованием. Важнейшим прорывом в этой области стала этика аргументации, предложенная немецким философом Гансом-Германом Хоппе [7]. В своих работах он предпринял попытку дать чисто логическое обоснование института частной собственности [8].

Хоппе утверждает, что сам факт вступления в аргументированную дискуссию даже с целью отрицания частной собственности уже подразумевает взаимное признание собеседниками права на исключительный контроль над собственным телом. В этом состоит принцип самопринадлежности [7]. Чтобы выдвигать аргументы и пытаться убедить оппонента без применения физической силы, человек должен распоряжаться своим телом и ресурсами, необходимыми для осуществления коммуникации [9].

Таким образом, любая идеология, отрицающая базовые права собственности, объявляется не просто экономически неэффективной, а еще и противоречивой: сторонник регулирования не может обосновать свою позицию в рациональном споре, не впадая в логическое противоречие с условиями самой возможности ведения этого спора [8, 9].

Параллельно с этим, Мюррей Ротбард пересмотрел утилитарный подход к оценке государства и показал, что любая форма государственного перераспределения или централизованного планирования является нарушением фундаментального принципа ненападения [10]. С этой точки зрения плановое общество этически несостоятельно, так как оно базируется на принудительном отчуждении личности и систематизированной агрессии [10].

Современный философско-экономический дискурс характеризуется новым витком спора о возможности социализма, инициированным развитием информационных технологий [11]. Сторонники неомарксизма выдвигают тезис, согласно которому классические аргументы Л. фон Мизеса и Ф. А. Хай-

ека о невозможности экономического расчета устарели в эпоху сверхмощных вычислений [1, 2]. Предполагается, что современные суперкомпьютеры способны собирать колоссальные массивы данных в режиме реального времени и рассчитывать идеальный производственный план, преодолевая тем самым когнитивные ограничения человеческого разума [11].

Ответ современных представителей австрийской школы заключается в том, что проблема планирования – это не проблема обработки данных, а проблема их создания. Компьютер способен оперировать лишь формализованной и уже существующей в прошлом информацией. Однако критически важная экономическая информация не существует в объективном виде до момента принятия решения человеком [12].

Эта информация созидается предпринимателем в процессе его субъективной оценки и действий моментально в непрерывно меняющихся условиях [5]. Значительная часть знаний в обществе является неявной: практические навыки, интуиция и знание уникальных обстоятельств времени и места, которые невозможно агрегировать или перевести в машинный код [12]. Следовательно, централизованное управление остается невозможным даже при наличии квантовых компьютеров, поскольку невозможно собрать информацию, которая еще не сгенерирована человеческим творчеством [12].

Поскольку машинные алгоритмы принципиально не могут заменить предпринимательскую функцию, использование искусственного интеллекта в рамках государственного планирования неизбежно трансформируется из инструмента распределения ресурсов в инструмент тотального социального контроля. Когда единый цифровой план сталкивается с непредсказуемостью человеческого выбора, управляющий аппарат вынужден адаптировать поведение граждан под нужды алгоритма, а не наоборот. Следовательно, делегирование управления экономикой искусственному интеллекту не решает базовую проблему рассеянного знания, а лишь маскирует централизованное планирование видимостью математической и технологической объективности.

Логическим следствием такого социального контроля становится деструкция правовой системы. Важнейшим аспектом австрийской критики здесь выступает классический аргумент Ф. А. Хайека, который противопоставлял понятие верховенства права административному произволу. Он указывал, что в свободном обществе государство устанавливает лишь общие, абстрактные правила, известные заранее и не нацеленные на конкретных людей. В плановой же (или алгоритмической) системе государство вынуждено принимать тысячи конкретных решений, которые всегда дискретны, не могут быть формализованы в общих законах и неизбежно ведут к диктату управляющих.

Подводя итог анализу современного состояния Австрийской экономической школы, можно констатировать, что она успешно преодолела рамки узкой экономической теории, трансформировавшись в масштабную социально-философскую систему. Технологический вызов эпохи искусственного интеллекта и Big Data не отменяет, а лишь подчеркивает актуальность австрийской критики этатизма. Идеи сторонников цифрового социализма разбиваются о фундаментальную проблему: экономическое знание не является статичной базой данных, оно представляет собой неявный, непрерывно созидаемый в процессе предпринимательского поиска феномен. Попытка подчинить этот творческий процесс машинному алгоритму ведет к уничтожению механизма генерации новых знаний и требует применения тоталитарных коммуникативных практик для принудительного согласования человеческих действий. Таким образом, сохранение спонтанного рыночного порядка и свободы аргументации остается главным условием выживания и развития цивилизации в эпоху цифровых трансформаций.

Список использованных источников:

1. Walton N., Nayak B. S. Rethinking of Marxist perspectives on big data, artificial intelligence (AI) and capitalist economic development //Technological Forecasting and Social Change. – 2021. – Т. 166. – С. 120576.

2. Medeiros N. F. P. Big Data Capitalism and Socialism : дис. – Universidade do Porto (Portugal), 2022.

3. Rothbard M. N. Praxeology: The methodology of Austrian economics //The foundations of modern Austrian economics. – 1976. – С. 19-39.

4. Rothbard M. N. Praxeology as the Method of the Social Sciences //Phenomenology and the social sciences. – 1973. – Т. 2. – С. 323-335.

5. Мизес, Л. фон. Человеческая деятельность: трактат по экономической теории / Л. фон Мизес ; пер. с англ. А. В. Куря-ев. – 3-е изд., с изм. и доп. – Москва : Социум, 2023. – 1024 с. – ISBN 978-5-91603-174.

6. Чуешов В. И. О некоторых старых философских уроках исследования предмета экономической науки и их современном смысле //Проблемы современной экономики. – 2007. – №. 4. – С. 36-39.

7. Hoppe H. H. Theory of Socialism and Capitalism, A. – Ludwig von Mises Institute, 1989.

8. Eabrasu M. A reply to the current critiques formulated against Hoppe's argumentation ethics //Libertarian Papers. – 2009. – Т. 1. – С. 1.

9. Slenzok N. Non-aggression, freedom, and argumentation ethics: Avoiding circularity //Reinterpreting Libertarianism. – Routledge, 2025. – С. 134-156.

10. Rothbard, M. N. The ethics of liberty / M. N. Rothbard. – NYU Press, 2002. – 360 p.

11. Nayak B. S., Walton N. Big data, artificial intelligence (AI) and capitalist economic development //Political Economy of Artifi-cial Intelligence: Critical Reflections on Big Data Market, Economic Development and Data Society. – Cham : Springer Nature Switzer-land, 2024. – С. 49-72.

12. Festré A., Østbye S. The tacit dimension and behavioural public policy: insights from Hayek and Polanyi //Behavioural Public Policy. – 2025. – Т. 9. – №. 3. – С. 575-592.

МНОГООБРАЗИЕ ФОРМ ПОЗНАНИЯ. СПЕЦИФИКА ФИЛОСОФСКОГО И НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

Панфиленко Е.Д., Провлоцкая Д.В., магистранты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Малыхина Г.И. – канд. фил. наук, доцент

В работе рассматривается эволюция представлений о формах познания от классической дихотомии «чувственное — рациональное» к современному пониманию их многообразия. На основе сравнительного анализа выявляется специфика философского и научного познания по целям, методам, критериям истинности и социокультурной роли. Показано, что в условиях междисциплинарности и цифровой трансформации их различие становится взаимодополняющим, а философская рефлексия выступает необходимым инструментом научной и инженерной деятельности.

Познание является фундаментальной характеристикой человеческого бытия. На протяжении истории философии сложились различные трактовки его природы: от античного понимания познания как припоминания (Платон) до новоевропейской трактовки его как активного конструирования реальности субъектом (И. Кант). В классической гносеологии познание традиционно делилось на два уровня – чувственный (ощущения, восприятия, представления) и рациональный (понятия, суждения, умозаключения). Однако современная неклассическая эпистемология существенно расширяет это представление, выделяя наряду с ними такие формы, как обыденное познание, формирующееся в повседневной практике; мифологическое и религиозное познание, играющие важную роль в истории культуры; художественное познание, постигающее мир через образы; а также такие специфические формы, как неявное знание (М. Полани), социальное познание, воплощённое познание (embodied cognition) и цифровое познание, связанное с обработкой больших данных и алгоритмами [1, 2]. В этом многообразии философское и научное познание занимают особое место; их специфика часто смешивается, но между ними существуют принципиальные различия, которые требуют специального анализа.

Наука и философия представляют собой две взаимосвязанные, но не тождественные формы духовно-теоретического освоения действительности. Их различие можно проследить по нескольким ключевым параметрам: цель, методы, критерии истинности, отношение к субъекту и социокультурная роль.

Цель. Наука направлена на получение объективного, проверяемого, систематизированного знания о фрагментах действительности. Её идеал – выявление закономерностей, формулировка законов, построение теорий, обладающих предсказательной силой. Философия же стремится к рефлексии над основаниями познания, бытия, ценностей; она проблематизирует границы парадигм и сами критерии рациональности [3]. Философское знание не нацелено на непосредственное практическое применение, но задаёт мировоззренческие ориентиры для других форм познания.

Методы. Научное познание опирается на эмпирические методы (наблюдение, эксперимент, измерение) и теоретические (идеализация, формализация, аксиоматизация). Важнейшую роль играет специальный язык, однозначность терминов и воспроизводимость результатов. Философское познание использует умозрение, рефлексию, герменевтические процедуры, анализ категорий. Оно не продуцирует эмпирически проверяемых фактов, но задаёт концептуальные рамки для их интерпретации. Философские методы носят универсальный характер и применимы к любой сфере познавательной деятельности.

В науке доминирует корреспондентская концепция истины (соответствие знания действительности), дополненная критериями когерентности (согласованность внутри теории) и практической эффективности. В философии помимо этого обсуждаются конвенциональные, прагматические, экзистенциальные трактовки истины, а сам вопрос о её критерии становится предметом рефлексии [1]. Философские истины не подлежат прямой эмпирической верификации; их обоснование достигается через аргументацию, непротиворечивость и убедительность.

Отношение к субъекту. Классическая наука стремилась к исключению субъекта из познания, рассматривая его как источник искажений. Постпозитивизм (Т. Кун, И. Лакатос) показал, что научное сообщество с его парадигмальными установками неизбежно влияет на содержание знания. Тем не менее, идеал объективности остаётся нормативным ориентиром. Философское познание изначально включает субъекта не как помеху, а как условие постановки вопросов о смысле, ценности, границах познания. Философская истина всегда «личностна» в том смысле, что требует от субъекта активного осмысления и выбора.

Социокультурная роль. Наука выступает производителем технологически применимого знания. Она служит двигателем экономического роста, инноваций, модернизации производства. В современном обществе наука выполняет ряд ключевых функций: познавательную (производство нового знания),

культурно-мировоззренческую (формирование научной картины мира), инновационно-практическую (обеспечение технологического развития), социально-управленческую (экспертное сопровождение решений) и духовно-образовательную (трансляция знания через систему образования) [1]. Философия выполняет критическую, мировоззренческую, методологическую функцию, часто обнажая неявные предпосылки научных теорий. Она обеспечивает связь науки с другими сферами культуры – искусством, религией, моралью, политикой.

Проведённое сравнение позволяет выявить не только различия, но и точки пересечения, которые становятся особенно значимыми в исторической ретроспективе. В XX–XXI веках жёсткое противопоставление философского и научного познания уступает место их взаимопроникновению. Постпозитивизм (К. Поппер, Т. Кун, П. Фейерабенд) показал, что развитие науки невозможно без философской рефлексии над основаниями исследовательских программ. В свою очередь, натурализованная эпистемология (У. Куайн) предлагает рассматривать традиционно философские проблемы познания как предмет эмпирического изучения когнитивной психологии и нейронауки [3]. Это сближение порождает новые дисциплины – философию науки, философию искусственного интеллекта, социальную эпистемологию.

Обращение к историческому развитию форм познания позволяет глубже понять их специфику. В античности философия и наука существовали в нераздельном единстве: философское умозрение включало в себя зачатки математических, физических и биологических знаний. В Новое время происходит размежевание: экспериментальное естествознание обретает самостоятельность, а философия сосредотачивается на обосновании научного метода (Ф. Бэкон, Р. Декарт, И. Кант). В XIX веке складывается позитивизм, провозгласивший отказ от философских спекуляций и объявивший науку единственным источником истинного знания. Однако в XX веке выяснилось, что сама наука не может обойтись без философской рефлексии: кризис оснований математики, квантово-механическая проблема измерения, этические дилеммы биомедицины – все эти вопросы требуют выхода за пределы узко дисциплинарных подходов.

Сегодня, в эпоху цифровой трансформации и развития искусственного интеллекта, взаимодействие философии и науки приобретает новые черты. Создание «объяснимого ИИ» (XAI) требует не только технических решений, но и философского осмысления того, что такое понимание, истина и ответственность за знание. Методология междисциплинарных исследований (нейронаука, климатология, биоинформатика) предполагает синтез научных методов с философской рефлексией о границах их применимости.

Кроме того, современная социальная эпистемология исследует, как знание производится, распределяется и легитимируется в обществе. В условиях «постправды» и алгоритмической курации контента различие между научным и ненаучным знанием становится неочевидным для массового сознания. Философский анализ помогает выявить механизмы эпистемической несправедливости и выработать стратегии критического мышления.

Важно отметить, что многообразие форм познания не означает их изолированности. В реальной познавательной практике различные формы переплетаются. Например, в научном открытии нередко участвуют художественная интуиция, воображение, неявные навыки; социальное взаимодействие в научном сообществе влияет на принятие теорий; а философские принципы направляют интерпретацию эмпирических данных. Таким образом, познание представляет собой сложный, многоуровневый процесс, в котором чувственное, рациональное, интуитивное, социальное и цифровое измерения образуют неразрывное единство.

Таким образом, многообразие форм познания не сводится к простой иерархии. Философское и научное познание сохраняют свою специфику, но в современных условиях их разделение становится не столько жёстким разграничением, сколько различением взаимодополняющих типов интеллектуальной деятельности. Осознание этой специфики необходимо для корректной постановки исследовательских задач, критической оценки результатов и адекватной навигации в информационной среде. Будущее эпистемологии связано с интеграцией философской рефлексии и эмпирических исследований познания, что позволит адекватно отвечать на вызовы цифровой эпохи.

Список использованных источников:

1. Малыхина, Г.И. Философия и методология науки: учеб. пособие / Г.И. Малыхина [и др.]. – Минск: БГУИР, 2017. – 274 с.
2. Lakoff, G. Philosophy in the Flesh / G. Lakoff, M. Johnson. – New York: Basic Books, 2019. – 624 p.
3. Fuller, S. Post-Truth: Knowledge as a Power Game / S. Fuller. – London: Anthem Press, 2018. – 250 p.

УДК 14:331.108.34

МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ФИЛОСОФСКИХ АСПЕКТОВ РЕКРУТИНГА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

Гайсенок А.А., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Хацкевич Г.А. – д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор

Аннотация. В статье обосновывается методологическая значимость философских аспектов рекрутинга в системе управления человеческими ресурсами. Анализируются ценностные основания, этические принципы и социальные последствия рекрутинговых практик. Раскрывается роль философской рефлексии в преодолении предвзятости, дискриминации и обеспечении прозрачности отбора персонала. Обосновывается, что интеграция философского знания является необходимым условием формирования справедливых и ответственных подходов к управлению человеческими ресурсами.

Ключевые слова. рекрутинг, философские аспекты, методологическая значимость, управление человеческими ресурсами, этика, справедливость, прозрачность, предвзятость.

Современный рекрутинг представляет собой сложный социально-философский феномен, выходящий далеко за рамки прикладной задачи закрытия вакансий. В условиях цифровизации и трансформации социальных отношений рекрутинг становится пространством, где пересекаются вопросы справедливости, человеческого достоинства, социальной мобильности и культурных норм. Управление человеческими ресурсами всегда имеет ценностную основу, отражающую представления о человеке и обществе [1]. В данном контексте особую актуальность приобретает выявление методологической значимости философских аспектов рекрутинга, которая позволяет не только осмыслить существующие практики, но и задать векторы их дальнейшего развития.

Данная работа направлена на обоснование методологической роли философских аспектов рекрутинга в системе управления человеческими ресурсами. В центре внимания находятся этические принципы, историческая эволюция подходов к отбору кадров, а также методологические возможности философской рефлексии для решения проблем, возникающих в современной практике рекрутинга.

1. Философские основы рекрутинга как методологический ресурс

Философское осмысление рекрутинга начинается с анализа его понятийного аппарата. Термины «рекрутинг», «отбор», «кадровая политика» не являются нейтральными техническими понятиями — они несут в себе определенные ценностные установки. Рекрутинг — это не механическое заполнение должностей, а процесс, определяющий будущее организации и судьбы людей [2]. Методологическая значимость философского анализа понятийного аппарата заключается в том, что он позволяет раскрыть ценностные основания, которые часто остаются нерефлексируемыми, но при этом направляют практические действия рекрутеров и управленцев.

Категория справедливости является центральной в философии рекрутинга. Она предполагает равный доступ к возможностям трудоустройства независимо от пола, возраста, расы или социального происхождения. Однако на практике справедливость сталкивается с проблемой предвзятости — как сознательной, так и бессознательной. Философский анализ позволяет выявить, что понимание «идеального кандидата» часто формируется под влиянием культурных стереотипов, что требует постоянной рефлексии и пересмотра критериев оценки. С методологической точки зрения, обращение к категории справедливости дает возможность разрабатывать более объективные и инклюзивные процедуры отбора.

Категория прозрачности связана с доверием между участниками рекрутингового процесса. Открытость в коммуникации и четкость критериев отбора создают основу для уважительных отношений между работодателем и соискателем [3]. В философском плане прозрачность выступает условием реализации принципа автономии личности: кандидат должен понимать, на каких основаниях принимаются решения, влияющие на его жизнь. Методологическое значение этой категории состоит в том, что она задает требования к организации коммуникативных процессов в рекрутинге.

Категория ответственности подразумевает признание того факта, что решения, принимаемые в процессе рекрутинга, имеют долгосрочные последствия как для организации, так и для человека. Это требует от рекрутеров не только профессиональной компетентности, но и развитого этического сознания. Методологически значимым здесь выступает понимание того, что рекрутинг не может сводиться к техническим процедурам, а предполагает моральную субъектность всех его участников.

2. Историческая эволюция подходов к рекрутингу: методологические уроки

Исторический анализ показывает, что подходы к отбору кадров всегда отражали доминирующие в обществе философские концепции и социально-экономические условия. В древних обществах рекрутинг основывался на принципах социальной иерархии и происхождения. Промышленная революция принесла с собой утилитарный подход: человек стал рассматриваться прежде всего как носитель профессиональных навыков [4].

XX век ознаменовался поворотом к «человеческому фактору». Развитие психологии и гуманистического менеджмента привело к осознанию того, что эффективность труда зависит не только от квалификации, но и от мотивации, ценностей, соответствия корпоративной культуре. Это отражало более широкий философский сдвиг — от понимания человека как «винтика» в производственной машине к признанию его субъектности и творческого потенциала. Методологическая значимость исторического анализа заключается в том, что он позволяет выявить закономерности эволюции рекрутинговых практик и понять, что современные подходы не являются единственно возможными, а представляют собой результат определенного исторического развития.

В XXI веке рекрутинг становится важным социальным институтом, формирующим не только рынок труда, но и общественные представления о справедливости, успехе и социальной мобильности. Демографические изменения, миграционные процессы, трансформация семейных структур — все это требует от рекрутинга гибкости и готовности работать с разнообразием [5]. Социальные движения, отстаивающие права женщин, меньшинств и других групп, оказывают непосредственное влияние на рекрутинговые практики, делая их более инклюзивными. С методологической точки зрения, это подчеркивает необходимость учета социального контекста при разработке рекрутинговых стратегий.

3. Методологическая значимость философских аспектов для системы управления человеческими ресурсами

Философские аспекты рекрутинга имеют важное методологическое значение для понимания его роли в различных сферах — от технических исследований до социальных процессов. В системе управления человеческими ресурсами философская рефлексия выполняет несколько ключевых методологических функций.

Функция ценностного обоснования. Философский анализ позволяет эксплицировать ценностные основания, на которых строятся рекрутинговые практики. Это особенно важно в условиях, когда организации сталкиваются с необходимостью согласования экономической эффективности и социальной ответственности. Управление всегда имеет ценностную основу, и ее осознание является необходимым условием ответственного принятия решений.

Функция концептуального анализа. Философская рефлексия помогает критически осмыслить используемые в рекрутинге понятия и критерии, выявить скрытые в них предпосылки и ограничения. Это позволяет избежать некритического заимствования подходов и разрабатывать стратегии, адекватные конкретному организационному и социальному контексту.

Функция интеграции знания. Рекрутинг находится на пересечении различных дисциплин — психологии, социологии, экономики, права. Философская рефлексия выступает методологическим инструментом интеграции этого разнородного знания, позволяя выстраивать целостное понимание процесса отбора персонала.

Влияние на естественно-научные и технические исследования. Качество исследовательского персонала напрямую определяет возможности научных открытий и технологических инноваций. Эффективные стратегии рекрутинга позволяют привлекать высококвалифицированных специалистов, способных генерировать новые идеи и реализовывать сложные проекты [6]. Методологическая значимость философских аспектов в данном контексте заключается в том, что они помогают осознать, что научное творчество требует не только технической компетентности, но и интеллектуальной свободы, которая во многом определяется корпоративной культурой и ценностными установками организации.

Рекрутинг и социальные процессы. Рекрутинг не просто реагирует на социальные изменения, но и активно участвует в их формировании [7]. Демографические сдвиги, миграция, изменение гендерных ролей — все это находит отражение в рекрутинговых стратегиях. Организации, осознающие свою социальную ответственность, разрабатывают инклюзивные подходы, способствующие интеграции различных социальных групп в профессиональную среду. Методологически значимым здесь выступает понимание того, что рекрутинг является не только внутриорганизационной функцией, но и социальным институтом, влияющим на общественные процессы.

Психологические аспекты. Понимание психологических механизмов восприятия, эмоциональных процессов, мотивации и соответствия корпоративной культуре является необходимым условием качественного рекрутинга [8]. Философская рефлексия помогает выйти за рамки узко прагматического подхода и увидеть в кандидате не набор компетенций, а целостную личность с уникальной историей, ценностями и потенциалом развития.

4. Проблемы и вызовы современного рекрутинга: методологические возможности философского подхода

Современный рекрутинг сталкивается с рядом проблем, требующих философского осмысления. Методологическая значимость философской рефлексии проявляется в том, что она позволяет не только диагностировать эти проблемы, но и намечать пути их решения.

Дискриминация и предвзятость остаются наиболее острыми вызовами. Несмотря на декларации о равенстве, стереотипы и неосознанные предубеждения продолжают влиять на отбор кандидатов. Дискриминация может проявляться по возрастному, гендерному, расовому признаку, а также в отношении людей с ограниченными возможностями здоровья [9]. Философский подход позволяет выявить глубинные культурные и социальные причины предвзятости, а также разработать методологические принципы построения более справедливых процедур отбора.

Перенасыщенность информацией создает риск принятия поверхностных решений. Рост числа кандидатов и разнообразие источников данных усложняют процесс отбора, отвлекая внимание от действительно значимых характеристик [10]. В философском плане это ставит вопрос о том, что такое «значимая информация» о человеке и как избежать редукции личности к набору формальных показателей. Методологическая задача заключается в разработке критериев отбора, позволяющих учитывать целостность личности кандидата.

Проблемы этики и прозрачности требуют разработки четких стандартов поведения рекрутеров. Недостаточная честность в описании вакансий, нарушение конфиденциальности, отсутствие обратной связи — все это подрывает доверие к работодателю и деформирует рынок труда. Философская рефлексия позволяет обосновать необходимость внедрения этических кодексов, обучения персонала, мониторинга процессов как условий ответственного рекрутинга.

Заключение

Интеграция философского знания в систему управления человеческими ресурсами является необходимым условием формирования справедливых, прозрачных и человекоцентричных подходов к рекрутингу, способствующих устойчивому развитию организаций и общества.

Список использованных источников:

1. *Друкер, П. Менеджмент: задачи, обязанности, практика / П. Друкер. – Москва, 2008. – С. 591–603.*
2. *Шарп, Л. Философия управления: от теории к практике / Л. Шарп. – Москва, 2019. – С. 153–155.*
3. *Эдвардс, Р. Этика в рекрутинге: теоретические и практические аспекты / Р. Эдвардс // Journal of Business Ethics. – 2014. – Vol. 122(3). – P. 511–523.*
4. *Петрова, Н. С. Прозрачность в рекрутинге: как доверие влияет на выбор кандидатов / Н. С. Петрова // Вестник HR. – 2021. – № 3. – С. 25–30.*
5. *Баранов, А. И. История кадрового менеджмента: от древности до наших дней / А. И. Баранов. – Минск, 2018. – С. 50.*
6. *Куликов, С. В. Рекрутинг в условиях промышленной революции: трансформация подходов / С. В. Куликов // Вестник управления. – 2020. – № 2. – С. 45–50.*
7. *Коваленко, И. А. Демографические изменения и рынок труда: вызовы и возможности / И. А. Коваленко. – Минск, 2023. – С. 15–22.*
8. *Ларина, Н. С. Ошибки восприятия в рекрутинге: влияние первого впечатления / Н. С. Ларина // Журнал управления персоналом. – 2020. – № 3. – С. 15–22.*
9. *Громова, Е. В. Корпоративная культура и рекрутинг: как соответствие влияет на успех / Е. В. Громова // Этические аспекты бизнеса. – 2023. – № 1. – С. 40–48.*
10. *Петрова, Н. С. Дискриминация в рекрутинге: причины и последствия / Н. С. Петрова // Журнал управления персоналом. – 2021. – № 4. – С. 30–35.*

UDC 14:331.108.34

METHODOLOGICAL SIGNIFICANCE OF PHILOSOPHICAL ASPECTS OF RECRUITING IN THE HUMAN RESOURCE MANAGEMENT SYSTEM

Haisenok H.A., master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Khackevich G.A. – Doctor of Economic Sciences, Candidate of Technical Sciences, Professor

Annotation. The article substantiates the methodological significance of philosophical aspects of recruiting in the human resource management system. The value foundations, ethical principles and social consequences of recruiting practices are analyzed. The role of philosophical reflection in overcoming bias, discrimination and ensuring transparency of personnel selection is revealed. It is substantiated that the integration of philosophical knowledge is a necessary condition for the formation of fair and responsible approaches to human resource management.

Keywords. recruiting, philosophical aspects, methodological significance, human resource management, ethics, justice, transparency, bias.

ПРОБЛЕМА МЫШЛЕНИЯ В ЭПОХУ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И ФУНКЦИОНАЛИСТСКАЯ ПЕРСПЕКТИВА

Терешкова К.Д., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чуешов В.И. – д-р фил. наук, профессор

Целью данной работы является философско-методологический анализ соответствия нейросетевых моделей критериям функционалистской теории сознания. Методологическую основу исследования составляют гипотетико-дедуктивный метод, сравнительный анализ, герменевтический подход, а также принципы системного анализа.

В данной работе рассматривается проблема интерпретации мышления в условиях стремительного развития больших языковых моделей, основанных на архитектуре глубокого обучения Transformer. Объектом исследования выступает архитектура Transformer как потенциальная когнитивная модель, а предметом анализа является онтологический и эпистемологический статус вычислительных операций, реализуемых в рамках данной архитектуры.

Функционализм, являясь одной из доминирующих теоретических парадигм в философии сознания, исходит из предположения о том, что ментальные состояния определяются не своей субстанциональной природой, а выполняемой ими функцией в рамках системы причинно-следственных отношений [1; 2]. Данный подход предполагает, что мышление может быть реализовано на различных физических носителях, включая биологические и искусственные системы, при условии сохранения функциональной структуры. Концепция множественной реализуемости, разработанная в аналитической философии, позволяет утверждать автономию когнитивных процессов по отношению к их материальной основе [3]. В свою очередь, концепция интенциональной установки [4] предлагает рассматривать сложные системы как обладающие «намерениями» в прагматическом смысле, что открывает возможность интерпретации поведения искусственных систем в терминах рациональности.

Однако функционализм сталкивается с рядом фундаментальных возражений. Классическая критика связана с проблемой субъективного опыта, или квалиа, которая демонстрирует ограниченность чисто функционального описания сознания [5]. Аргумент «китайской комнаты» [6] подчеркивает различие между синтаксической обработкой символов и их семантическим пониманием, показывая, что система может демонстрировать корректное поведение без наличия внутреннего понимания. Эти аргументы сохраняют свою актуальность и в контексте анализа современных нейросетевых моделей, что делает проблему мышления в эпоху искусственного интеллекта особенно сложной и многослойной.

Архитектура Transformer, предложенная в рамках современных исследований в области машинного обучения, представляет собой качественно новый этап в развитии вычислительных моделей [7]. Ее ключевым элементом является механизм самовнимания, позволяющий системе учитывать глобальные зависимости между элементами входной последовательности. Это обеспечивает формирование контекстуально насыщенных представлений и высокую эффективность при решении задач обработки естественного языка. С функционалистской точки зрения данная архитектура может рассматриваться как система, реализующая когнитивные функции за счет сложной организации вычислительных процессов.

Особое значение имеет тот факт, что большие языковые модели демонстрируют поведение, которое может интерпретироваться как проявление когнитивных способностей. Речь идет о способности к обобщению, логическому выводу, генерации связного текста и адаптации к новым задачам. Эмпирические исследования показывают, что при увеличении масштаба моделей возникают эмерджентные свойства, не сводимые к отдельным компонентам системы [8]. Это позволяет говорить о функциональном сходстве с некоторыми аспектами человеческого мышления, что усиливает позиции функционалистского подхода.

Тем не менее, критический анализ показывает, что такие системы остаются принципиально ограниченными. Отсутствие семантического заземления означает, что символы, обрабатываемые моделью, не связаны напрямую с реальностью [9]. Это приводит к тому, что генерируемые ответы, несмотря на их правдоподобие, не являются результатом понимания в строгом смысле. Таким образом, возникает разрыв между внешним поведением системы и ее внутренним состоянием, что затрудняет интерпретацию нейросетей как полноценных носителей мышления.

Развитие больших языковых моделей оказывает существенное влияние на эпистемологию. В условиях экспоненциального роста данных и вычислительных возможностей формируется новая модель знания, в которой приоритет отдается статистическим закономерностям и корреляциям [10]. Это приводит к трансформации научного метода, смещая акцент с объяснения на предсказание. В результате возникает феномен «черного ящика», при котором система демонстрирует высокую

эффективность, но остается непрозрачной для анализа. Такая ситуация ставит под сомнение традиционные критерии научной рациональности, включая интерпретируемость и обоснованность.

Дополнительное усложнение связано с социально-философскими последствиями внедрения нейросетевых технологий. Генеративные модели трансформируют понятие авторства, размывая границы между субъектом и инструментом. Они также создают условия для формирования новой информационной среды, в которой различие между истиной и правдоподобием становится менее очевидным. В этом контексте усиливаются риски, связанные с манипуляцией информацией, автоматизацией принятия решений и усилением социального неравенства [11]. Это требует разработки новых подходов к регулированию и этической оценке технологий искусственного интеллекта.

Перспективы дальнейшего развития связаны с решением проблемы согласования целей искусственных систем с человеческими ценностями. Исследования в области глобальных рисков и суперинтеллекта подчеркивают необходимость разработки механизмов контроля и управления интеллектуальными системами [11]. В противном случае существует риск возникновения систем, поведение которых будет трудно предсказать и контролировать.

Таким образом, архитектура Transformer демонстрирует значительное соответствие функционалистским критериям мышления на уровне формальных операций, однако не решает проблему субъективного опыта и семантического понимания. Это позволяет рассматривать большие языковые модели как мощные инструменты моделирования когнитивных процессов, но не как полноценные носители сознания. Основной философский вызов заключается в необходимости переосмысления понятий мышления, знания и субъекта в условиях цифровой трансформации современного общества.

Список использованных источников:

1. Putnam H. Psychological Predicates //Art, Mind, and Religion. – Pittsburgh : University of Pittsburgh Press, 1967.

2. Putnam H. Minds and Machines //Dimensions of Mind / ed. S. Hook. – New York : New York University Press, 1960.

3. Fodor J. A. Special Sciences (Or: The Disunity of Science as a Working Hypothesis) //Synthese. – 1974. – Т. 28. – №. 2. – С. 97–115..

4. Dennett D. C. The Intentional Stance. – Cambridge : MIT Press, 1987.

5. Nagel T. What Is It Like to Be a Bat? //The Philosophical Review. – 1974. – Т. 83. – №. 4. – С. 435–450..

6. Searle J. R. Minds, brains, and programs //Behavioral and Brain Sciences. – 1980. – Т. 3. – №. 3. – С. 417–457.

7. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need //Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Т. 30.

8. Bubeck S. et al. Sparks of Artificial General Intelligence: Early experiments with GPT-4 //arXiv preprint. – 2023.

9. Bender E. M., Gebru T., McMillan-Major A., Shmitchell S. On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big? //Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. – 2021. – С. 610–623.

10. Anderson C. The End of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete //Wired. – 2008.

11. Bostrom N. Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies. – Oxford : Oxford University Press, 2014.

ГУМАНИТАРНЫЙ ИММУНИТЕТ КАК МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИКТ В НАУЧНОМ ПОЗНАНИИ

Степанец Е.В., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чуешов В.И. – д-р фил. наук, профессор

Исследуется фундаментальное влияние ИКТ (информационно-коммуникационных технологий) в современном научном познании. Особое внимание уделяется социальным и этическим вызовам цифровизации науки. Обосновывается необходимость формирования у современного исследователей «гуманитарного иммунитета», как синтеза ИКТ грамотности и философско-этической подготовки.

История науки – это история совершенствования средств и методов познания. Если Галилей и Левенгук использовали оптику для расширения границ видимого, то современный исследователь использует алгоритмы для расширения границ мыслимого. Сегодня ученый все реже взаимодействует с физическим объектом напрямую. Между ним и объектом познания пролегает «цифровая дистанция»: серверы, облачные вычисления и сложные интерфейсы.

Это не просто техническое обновление, а трансформация самого способа производства знания. ИКТ перестали быть просто «линейкой» или «весами» – они превратились в «когнитивный протез», влияющий на формирование результатов научного исследования. Если классическая эпистемология строилась на дихотомии: активный субъект (ученый) и пассивный объект (природа), а инструмент познания считался «прозрачным», то в цифровую эпоху эта прозрачность исчезает. Цифровизация стирает автономию субъекта познания – он превращается в элемент сетевой системы, где пределы гипотез определяются вычислительной емкостью.

Цифровая трансформация породила новый тип эксперимента – in silico (компьютерное моделирование, симуляция эксперимента). Компьютерное моделирование позволяет моделировать процессы, которые невозможно воспроизвести в лаборатории: от столкновения галактик до долгосрочных климатических изменений. Моделирование предоставляет исследователю способность управлять переменными.

Создав триаду «модель – алгоритм – программа», исследователь получает в руки универсальный, гибкий и недорогой инструмент, который отлаживается и тестируется в «пробных» вычислительных экспериментах. После того, как адекватность (достаточное соответствие) триады исходному объекту имеется, с моделью проводятся разные «опыты», дающие все требуемые свойства и характеристики объекта. Важно, что процесс моделирования сопровождается улучшением и уточнением всех звеньев триады. Такой метод познания сочетает в себе преимущества и теории, и эксперимента [1].

Однако, наряду с преимуществами, имеется ряд и недостатков у компьютерного моделирования:

1. Заблуждение о том, что моделирование может обнаруживать качественно новые явления, так как для них должно быть подтверждение в реальных условиях и в реальных экспериментах.
2. Модельный анализ уменьшает возможные объяснения. Из объекта моделирования можно «выжать» только то, что входит в содержание модели.
3. Чрезмерное упрощение в модели ради скорости вычислений не способствует изучению ее ключевых факторов.

Самым сложным вызовом для академического сообщества стало внедрение машинного обучения. Нейронные сети часто выдают сверхточные предсказания, но не могут объяснить, как они пришли к такому выводу. Этот разрыв ставит под угрозу главный идеал науки – доказательность. Если ученый не понимает логику системы, он превращается из исследователя в «верующего» пользователя. Г.И. Малыхина и В.И. Чуешов в своей работе подчеркивают важность сохранения критического подхода к использованию ИКТ, как один из главный вызов для современного образования.

Трудно переоценить значение органичного диалектического единства парадигм образования как цели и средства в условиях современной цифровой трансформации жизни общества и человека. Цифровая трансформация открывает обучающимся доступ к самым современным образовательным платформам, стирает с помощью цифры некоторые аспекты социального неравенства, а также нивелирует различия в месте и положении человека и общества в системе современного разделения общественного труда. В цифровом мире существенно возрастает потребность в философской подготовке не только представителей поколения Z, но и идущего ему на смену поколения [2].

Цифровая трансформация науки – это не только изменения в методах и философских основаниях, но и социальные изменения. Традиционная научная коммуникация строилась вокруг печатных журналов и личных встреч на конференциях. Сегодня эта система изменяется. Электронные журналы ускорили публикацию, но главное изменение связано с появлением препринт-серверов – платформ, где ученые могут выкладывать свои работы до их публикации в журналах, сразу делая их доступными для всего

научного сообщества. Это ускоряет распространение знаний, позволяет получать обратную связь на ранних стадиях, снижает зависимость от издательских монополий.

Развиваются и социальные сети для ученых (ResearchGate, Academia.edu), где можно обсуждать работы, задавать вопросы авторам, находить коллег для совместных проектов. Формируются новые формы публикации – данные и код становятся такими же важными результатами исследования, как и статьи. Появляются платформы для обмена данными и программным обеспечением, что повышает прозрачность и воспроизводимость исследований. ИКТ позволяют создавать новые формы организации науки – распределенные исследовательские коллективы. Ученые из разных стран могут работать над общей задачей, не покидая своих институтов. Это особенно важно для крупных проектов, требующих объединения ресурсов и компетенций. Такие проекты не только ускоряют обработку данных, но и привлекают широкую публику к участию в научных исследованиях.

Цифровизация науки порождает новые этические проблемы. Одна из них – это вопрос о приватности при использовании больших данных. Другая проблема – это вопрос об ответственности за результаты, полученные с помощью алгоритмов. Традиционная наука исходила из принципа личной ответственности исследователя, но в условиях, когда значительная часть работы делегируется компьютеру, этот принцип требует переосмысления.

Важной этической проблемой является и вопрос о предвзятости алгоритмов. Если алгоритм обучается на данных, которые содержат систематические искажения, то он будет воспроизводить и усиливать эти искажения. Исследователи, использующие методы машинного обучения, должны осознавать эту проблему и предпринимать шаги для ее выявления и устранения.

Г.И. Малыхина и В.И. Чуешов в своей работе о гуманитарной безопасности подчеркивают, что цифровая трансформация всех сфер жизни, включая науку, требует осмысления рисков и угроз, связанных с цифровизацией.

В наши дни важнейшими средствами устранения угроз в сфере отечественной гуманитарной безопасности оказываются: обеспечение достойного уровня притока научных и научно-педагогических кадров в экономику страны; увеличение притока в образование и науку молодежи; обеспечение достойного уровня финансирования науки, здравоохранения, образования и др. Среди последних важно обратить внимание на угрозы, связанные с особенностями развития информационно-коммуникативной и интеллектуальной сфер жизнедеятельности белорусского общества [3].

Специалисты отмечают, что подготовка специалистов, способных эффективно работать в условиях цифровой трансформации, требует преодоления разрыва между техническим и гуманитарным знанием.

Интеграция гуманитарного образования в подготовку инженерных кадров приносит множество выгод для общества, создавая более гибких, нравственно и социально ориентированных профессионалов. Этот подход, развивая технические навыки, учитывает социокультурные и этические особенности, и формирует целостное понимание проблем и задач, стоящих перед инженером. В итоге, интеграция технических и гуманитарных знаний становится не просто стратегическим выбором, но и необходимостью для формирования образованных, творческих специалистов, способных не только создавать передовые технологии, но и применять их с уважением к особенностям социокультурного контекста [4].

Подготовка ученого будущего должна базироваться на синтезе технической грамотности и глубокой гуманитарной культуры. Без понимания контекста, этики и философии науки исследователь рискует стать заложником собственных инструментов. В некотором смысле можно сказать, что интеграция гуманитарного знания – это «иммунная система» науки в эпоху ИКТ.

Таким образом, главный вызов современности, в контексте роли информационных технологий в современном научном познании, заключается в том, чтобы субъект научного познания не стал заложником собственных инструментов. Следовательно, современный ученый должен обладать «гуманитарным иммунитетом» – синтезом технической грамотности и глубокой философско-этической подготовки. Только интеграция технического и гуманитарного знания позволит использовать весь спектр возможностей ИКТ, сохраняя за человеком роль того, кто несет ответственность за вектор развития цивилизации.

Список использованных источников:

1. Паничев В.В., Соловьев Н.А. Компьютерное моделирование [Электронный ресурс] / Паничев В.В., Соловьев Н.А. – Режим доступа: https://elib.osu.ru/bitstream/123456789/8694/1/2698_20110926.pdf – С. 9 – 10. Дата доступа: 30.03.2026.

2. Малыхина Г.И., Чуешов В.И. Социально-гуманитарное образование как средство и цель в цифровую эпоху [Электронный ресурс] / Малыхина Г.И., Чуешов В.И. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/41915 – С. 162. Дата доступа: 30.03.2026.

3. Малыхина Г.И., Чуешов В.И. Гуманитарная безопасность в структуре национальной безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Малыхина Г.И., Чуешов В.И. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46476 – С. 259 – 260. Дата доступа: 30.03.2026.

4. Лисенкова А.А., Малыхина Г.И. Интеграция технического и гуманитарного: новый подход к образованию инженеров будущего [Электронный ресурс] / Лисенкова А.А., Малыхина Г.И. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/54963 – С. 145 – 146. Дата доступа: 30.03.2026.

НАУКА КАК ВАЖНЕЙШАЯ ФОРМА ПОЗНАНИЯ. ФУНКЦИИ НАУКИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Провлоцкая Д.В,, Панфиленко Е.Д., магистранты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Малыхина Г.И. – канд. фил. наук, доцент

Рассматривается наука как сложное социокультурное явление. Анализируются три взаимосвязанных аспекта бытия науки (система знаний, познавательная деятельность, социальный институт) в соответствии с подходом В.С. Степина. Раскрываются основные функции система знаний, познавательная деятельность и социальный институт. Раскрываются функции науки в современном обществе. Особое внимание уделяется современным тенденциям развития научного познания: междисциплинарности (BNIK-технологии), а также использованию информационно-коммуникационных технологий и искусственного интеллекта в исследовательской деятельности.

Познание – фундаментальная потребность человека. В истории человечества сложились различные формы познания: обыденное, мифологическое, религиозное, художественное, философское и научное. Каждая из них занимает свое место в культуре, однако именно наука обрела особый статус благодаря способности давать объективные, системные, обоснованные и проверяемые знания. В условиях стремительного технологического развития наука становится важнейшим инструментом прогресса цивилизации

Наука является одной из важнейших форм духовно-теоретической и познавательной активности человека. В современной культуре термин «наука» употребляется в двух основных значениях: как особый вид профессиональной деятельности ученых и как отдельные области научного знания. Трудности определения науки связаны со сложной системной организацией и многофункциональностью этого феномена.

Философское определение науки предполагает системный анализ ее элементов и структурных взаимосвязей. Согласно подходу, разработанному академиком В.С. Стёпиным, основные подсистемы науки как сложной, самоорганизующейся системы включают: науку как знание, науку как деятельность, науку как социальный институт [1, 2].

Наука как система знаний. Главная цель науки – производство научного знания. В отличие от житейских знаний, возникающих из повседневного труда и здравого смысла, научные знания обладают качественно иными характеристиками: объективной истинностью, обоснованностью, системностью, рациональностью, универсальностью, логической непротиворечивостью и прогностичностью.

Наука как деятельность. Наука – специализированный вид познавательной деятельности, направленный на производство новых объективно истинных знаний о мире и человеке с целью их практического использования. Наука включает все необходимые предпосылки: научное сообщество, подготовку кадров, методологию, материально-техническое оснащение. Научное познание отличается от обыденного по субъекту (ученый), объекту (законы действительности) и способу познания (строгие методы, искусственный язык).

Наука как социальный институт. В этом качестве наука охватывает не только систему знаний и исследовательскую деятельность, но и сеть отношений внутри научного сообщества, организационные структуры с разделением труда, планированием и контролем. Сегодня наука представляет собой сложную систему академических, образовательных и прикладных учреждений. Как подчеркивает В.С. Степин, институциональное понимание науки включает в себя социальные нормативы, которые "фиксируют роль науки и ее ценность для общественной жизни на определенном этапе исторического развития, управляют процессом коммуникации исследователей, отношениями научных сообществ и учреждений друг с другом и с обществом в целом" [3]. В структуре социального института науки особое место занимает этос науки – система ценностей и норм, регулирующих деятельность ученого. В.С. Степин отмечает, что "внутренний этос науки, основанный на презумпциях поиска истины и роста истинного знания (и соответственно на этических запретах на умышленное искажение истины и на плагиат) необходим, но уже не достаточен" [3]. В современной постнеклассической науке, по мысли философа, "требуется дополнительная этическая регуляция, связанная с оценками риска, экономических затрат и социальных последствий научно-технологических результатов" [3].

Современная наука оказывает все более значимое влияние на реальные условия нашей жизни. Как и любому социокультурному образованию, науке присущи свои функции, которые исторически развиваются и изменяются:

– познавательная – заключается в производстве нового объективного знания о мире, закономерностях природы, общества и мышления;

– культурно-мировоззренческая – формирует научную картину мира, влияет на систему ценностей и мировоззренческие ориентиры человека;

– инновационно-практическая – связана с превращением науки в непосредственную производственную силу, внедрением научных разработок в технологии и производство;

– социально-управленческая – научные знания и методы всё шире используются в анализе социальных проблем, разработке стратегических решений, проектировании моделей управления;

– прогностическая – наука позволяет моделировать будущее развитие природы и общества, предупреждать о возможных рисках и угрозах (экологических, техногенных, социальный и др.);

– духовно-образовательная – обеспечивает трансляцию научного знания через систему образования, формирование научной грамотности общества.

В рамках анализа науки как социального института необходимо также выделить функции, обеспечивающие ее взаимодействие с обществом: социально-экономическую (превращение науки в производительную силу), социально-культурную (наука как эталон рациональности и фактор развития культуры), а также функцию социальной регуляции, которая реализуется через внедрение этических механизмов в исследовательскую деятельность. В этом контексте особое значение приобретают гуманитарные и этические измерения науки. Как отмечает В.С. Степин, специфика социально-гуманитарных наук заключается в том, что их "предмет включает в себя человека, его сознание и часто выступает как текст, имеющий человеческий смысл" [4]. Это требует "особых методов и познавательных процедур", а также актуализирует этическую рефлексию ученого.

В БГУИР важнейшим инструментом обеспечения этических основ научной и образовательной деятельности выступает Нравственный кодекс. Согласно авторской концепции, Нравственный кодекс БГУИР выступает не только как свод этических норм, но и как функционал инклюзивной образовательной среды. Его задачами являются: создание условий для полноценной социализации личности, формирование гуманитарной культуры студентов, а также обеспечение равных возможностей для всех участников образовательного процесса независимо от их индивидуальных особенностей [5]. В этом смысле кодекс становится важным механизмом реализации принципов уважения, толерантности и взаимной поддержки в академическом сообществе.

Раздел академической этики Кодекса провозглашает "стремление к научному росту", "свободу научного творчества", а также "соблюдение принципов научной этики, приверженность истине и приумножению научного знания, уважение авторских прав и прав интеллектуальной собственности" [5]. Данные положения коррелируют с идеями В.С. Степина о необходимости осмысления "ценностно-целевых ориентаций субъекта научной деятельности в их соотнесении с социальными целями и ценностями" [3]. Как подчеркивает Г.И. Малыхина, образование выступает важнейшим институтом социализации личности, а формирование гуманитарной культуры становится необходимым условием подготовки конкурентоспособных специалистов, способных принимать ответственные решения с учетом этических последствий [5]. В контексте современных трендов научного познания особую значимость приобретает междисциплинарный характер исследований. Развитие BNIK-технологий (био-, нано-, информационных и когнитивных) демонстрирует стирание границ между традиционными дисциплинами и формирование комплексных исследовательских программ. Кроме того, активное внедрение информационно-коммуникационных технологий и искусственного интеллекта трансформирует методы научного познания: автоматизация сбора и обработки данных, использование нейросетевых моделей для прогнозирования, цифровое моделирование становятся неотъемлемой частью современной исследовательской деятельности.

Таким образом, наука предстаёт как динамичная, саморазвивающаяся система, объединяющая знание, деятельность и социальные институты. Её функции в современном обществе приобретают особое значение, а сама наука выступает не только средством познания, но и важнейшим фактором культурного и цивилизационного развития. Междисциплинарность и цифровая трансформация научной деятельности открывают новые горизонты для получения достоверного знания и его практического применения. Неотъемлемым условием устойчивого развития науки является сохранение и укрепление этоса науки, реализация принципов академической этики, нашедших свое отражение в Нравственном кодексе БГУИР, что способствует формированию гармонично развитой личности исследователя и преподавателя.

Список использованных источников:

1. Малыхина, Г.И. Философия и методология науки : учеб. пособие / Г.И. Малыхина, В.И. Чуешов, В.И. Миськевич. – Минск : БГУИР, 2017. – 274 с.

2. Степин, В.С. Теоретическое знание / В.С. Степин. – М.: Прогресс-Традиция, 2000. – 744 с.

3. Степин, В.С. Саморазвивающиеся системы и философия синергетики / В.С. Степин // Путь в будущее — наука, глобальные проблемы, мечты и надежды: материалы междунар. конф., 26–28 ноября 2007 г. – М., 2007. – С. 5-11.

4. Степин, В.С. Генезис социально-гуманитарных наук (философский и методологический аспекты) / В.С. Степин // Вопросы философии. – 2004. – № 3. – С. 37-43.

5. Малыхина, Г.И. Нравственный кодекс БГУИР как функционал инклюзивной образовательной среды / Г.И. Малыхина // Непрерывное профессиональное образование лиц с особыми потребностями : сборник статей V Международной научно-практической конференции, Минск, 14 декабря 2023 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: А.А. Охрименко [и др.]. – Минск, 2023. – С. 180–183.

УДК 004.89:16

НАРУШЕНИЕ ЗАКОНА ИСКЛЮЧЕННОГО ТРЕТЬЕГО В SOFTMAX-КЛАССИФИКАТОРАХ КАК СИСТЕМНАЯ ПРОБЛЕМА ЛОГИЧЕСКОЙ НЕПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ИИ

Охотенко А.Л., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шаталова В. В. – канд. техн. наук, доцент

В статье рассматривается имплицитное противоречие между архитектурой softmax-классификаторов и требованиями классической двузначной логики. Показано, что интерпретация вероятностного выхода как истинностного значения приводит к кажущемуся, но системно значимому нарушению закона исключенного третьего. Анализируются последствия этого разрыва для построения дедуктивных выводов на основе предсказаний нейросетевых моделей. Делается вывод о необходимости отказа от бинарной семантики при интеграции вероятностных классификаторов в логически непротиворечивые системы искусственного интеллекта.

Введение. Современные системы искусственного интеллекта, основанные на глубоких нейронных сетях, демонстрируют высокую эффективность в задачах классификации. Стандартным выходным слоем для многоклассовой классификации является softmax-функция, преобразующая действительные значения в вероятностное распределение. Однако при попытке интеграции таких классификаторов в логические дедуктивные системы возникает фундаментальная проблема: выход softmax не удовлетворяет закону исключенного третьего, который является базовым принципом классической логики.

Закон исключенного третьего утверждает, что для любого высказывания P истинно либо P, либо его отрицание $\neg P$, и третьего не дано [1]. В контексте классификации это означает, что объект либо принадлежит заданному классу, либо не принадлежит. Softmax же всегда выдает распределение, в котором ни одна вероятность, как правило, не равна ни единице, ни нулю. Это создает ситуацию, когда формальный логический вывод становится невозможным без дополнительных соглашений, а сам ИИ оказывается логически несостоятельным, если к нему применять критерии истинности.

Цель работы – показать, что нарушение закона исключенного третьего в softmax-классификаторах является не ошибкой реализации, а системным свойством, порождающим логическую непротиворечивость на уровне интерпретации. В отличие от распространенных замечаний о вероятностной природе softmax, здесь утверждается, что проблема носит не количественный, а категориальный характер.

Основная часть. Для классического понимания истинности необходимо, чтобы каждое высказывание имело одно из двух значений: истина или ложь. В контексте классификатора высказывание об объекте формулируется как «объект принадлежит данному классу». Softmax же выдаёт для каждого класса число строго между нулём и единицей, и сумма этих чисел по всем классам равна единице.

Из этого следуют два важных обстоятельства. Во-первых, ни один класс никогда не получает значения, равного в точности единице. Во-вторых, ни один класс никогда не получает значения, равного в точности нулю. Это прямое следствие того, как устроена функция: она всегда даёт положительные результаты, и если один результат приближается к единице, остальные становятся очень маленькими, но всё же ненулевыми.

Если попытаться интерпретировать выход softmax как истинностное значение высказывания о принадлежности к классу, то окажется, что ни само высказывание, ни его отрицание не являются истинными в двузначном смысле. Исходное высказывание получает значение, отличное от единицы, а его отрицание — значение, отличное от единицы, поскольку отрицание интерпретируется как дополнение до единицы, которое также лежит строго между нулём и единицей. Таким образом, мы сталкиваемся с ситуацией, когда третье значение не только существует, но и заполняет весь интервал между ложью и истиной.

Это прямое нарушение закона исключённого третьего. Более того, нарушается и более фундаментальный принцип бивалентности — утверждение о том, что каждое высказывание либо истинно, либо ложно. Softmax в принципе не способен породить бивалентную оценку, если только входные сигналы не являются бесконечно большими или бесконечно малыми, что в реальных вычислительных системах недостижимо.

Если попытаться интерпретировать выход softmax как истинностное значение высказывания о принадлежности к классу, то окажется, что ни само высказывание, ни его отрицание не являются истинными в двузначном смысле. Исходное высказывание получает значение, отличное от единицы, а его отрицание – значение, отличное от единицы, поскольку отрицание интерпретируется как дополнение

до единицы, которое также лежит строго между нулём и единицей. Таким образом, мы сталкиваемся с ситуацией, когда третье значение не только существует, но и заполняет весь интервал между ложью и истиной.Softmax как формальная конструкция, несовместимая с бинарной истинностью. Пусть задан классификатор с *K* классами. Softmax-функция имеет вид, представленный формулой 1:

$$\sigma(z_i) = \frac{exp\ (z_i)}{\sum_{i=1}^{K} \exp(z_j)}, \quad (1)$$

где *I = 1, … , K.*

Сумма всех $\sigma(z_i)$ тождественно равна 1. Каждое $\sigma(z_i)$ лежит в интервале (0,1). Строгое неравенство достигается при любых конечных z_i, что исключает значения 0 и 1. Исключением является лишь асимптотический случай бесконечно больших аргументов, не реализуемый в реальных вычислениях [2].

Следовательно, для любого объекта x и любого класса C_i softmax-классификатор выдает значение $p_i = P(C_i|x)$ такое, что 0 < p_i < 1. Если попытаться интерпретировать p_i как истинностное значение высказывания «*x* принадлежит C_i», то окажется, что ни это высказывание, ни его отрицание не являются истинными в двузначном смысле. Для отрицания «*x* не принадлежит C_i» истинностным значением должно быть 1 − p_i, но оно также лежит строго между 0 и 1.

Формально: для любого i имеет место формула 2:

$$\neg(p_i = 1) \wedge \neg(p_j = 0) \quad (2)$$

Это прямо противоречит закону исключенного третьего, который требует $p_i = 1 \vee p_j = 0$. Возникает ситуация tertium datur – третье дано, и оно заполняет весь интервал (0,1).

Часто возражение формулируется так: softmax не обязан подчиняться логике высказываний, поскольку он выражает степень уверенности, а не истину [3]. Однако это возражение не снимает проблемы, а лишь переименовывает ее. В любой системе ИИ, которая используется для автоматического принятия решений, требуется переход от числового выхода к бинарному действию: отклонить заявку или одобрить, поставить диагноз или нет. Этот переход осуществляется через пороговое правило (argmax или сравнение с порогом). Но введение порога есть внешняя по отношению к модели операция, не выводимая из самой модели.

Более того, если один и тот же классификатор применяется в двух различных выводах (например, в цепочке правил «если кошка, то млекопитающее» и «если пушистое, то кошка»), то вероятности не являются транзитивными. *Из p(C|B)* = 0.6 и *p(B|A)* = 0.7 нельзя получить p(C|A) классическими логическими средствами. Это разрушает композиционность – ключевое свойство логических систем.

Таким образом, нарушение закона исключенного третьего в softmax ведет к системной проблеме: классификатор не может быть одновременно вероятностно корректным и логически непротиворечивым в классическом смысле.

Попытка сохранить логическую непротиворечивость приводит к отказу от информации о неопределенности. Если округлить выход softmax до бинарного вектора (единица на argmax, нули на остальных), то закон исключенного третьего восстанавливается. Однако при этом теряется различие между уверенностью 0.51 и 0.99, что критично во многих приложениях (медицина, автопилоты, финансы).

Обратная стратегия – сохранить вероятности, но заменить классическую логику на вероятностную. Это решает проблему противоречия с ЗИТ, но порождает новую: вероятностная логика не обладает свойством монотонности, и вывод становится зависимым от порядка поступления свидетельств. Кроме того, истинность в вероятностной логике не является истинностью в обычном смысле, что делает такую систему ИИ логически непрозрачной для человека.

Следовательно, перед разработчиком стоит жесткий выбор: либо жертвовать логической непротиворечивостью (в классическом понимании), либо жертвовать полнотой использования выходной информации softmax. Ни один из путей не является безупречным.

Рассмотрим простой пример. Имеется softmax-классификатор с тремя классами: A, B, C. Для объекта *x* получены вероятности: A=0.45, B=0.35, C=0.20. Классификатор выбирает A.

С точки зрения классической логики, утверждается A, но модель одновременно утверждает (в вероятностном смысле), что *P(¬A)* = 0.55, то есть отрицание A более вероятно, чем само A. Если принять порог 0.5 для истинности, то одновременно истинны «не-A» и «A», что есть классическое противоречие. Если не принимать порог, то невозможно высказать ни одного логического суждения.

Такая ситуация не является исключительной – она нормальна для softmax. Это означает, что любой классификатор данного типа при работе в реальном диапазоне значений (без насыщения) систематически порождает логически противоречивую интерпретацию, если настаивать на бинарной истинности.

Из проведённого анализа следует, что интеграция softmax-классификатора в систему, требующую дедуктивного вывода, невозможна без одного из следующих решений:

1. Отказ от классической логики в пользу нечёткой, вероятностной или многозначной. Это требует пересмотра всего механизма вывода.
2. Преобразование softmax-выхода в бинарный вектор с потерей информации о неуверенности. Это допустимо только в задачах, где цена ошибки низка.
3. Введение мета-уровня, который оперирует не высказываниями, а распределениями, и выводит распределения, а не истинностные значения (байесовские сети, вероятностное программирование).

Нарушение закона исключённого третьего перестаёт быть проблемой, если явно признать, что ИИ на основе softmax не порождает логических суждений. Он порождает числовые оценки, которые лишь затем, по внешним правилам, конвертируются в суждения. Ответственность за логическую непротиворечивость лежит не на модели, а на правиле конверсии.

Заключение. Проведенный анализ показывает, что нарушение закона исключенного третьего в softmax-классификаторах представляет собой не случайный дефект, а фундаментальное следствие вероятностной природы их выходов. При попытке интерпретировать эти выходы как истинностные значения возникает системное противоречие: ни само высказывание о принадлежности классу, ни его отрицание не могут быть признаны истинными в двузначной логике.

Это противоречие делает классический логический вывод поверх softmax-классификаторов принципиально некорректным без дополнительных мета-правил, которые всегда произвольны. Следовательно, любые гибридные системы, сочетающие нейросетевую классификацию и логический вывод, должны либо явно отказаться от закона исключенного третьего, перейдя к многозначным или вероятностным логикам, либо ограничить область применения классификаторов задачами без дедуктивных цепочек.

Практическим следствием является необходимость пересмотра критериев логической корректности для современных ИИ. Требование непротиворечивости не может быть механически перенесено с формальных систем на нейросетевые компоненты. Вместо этого следует разрабатывать композитные архитектуры, где логический вывод оперирует не с «сырыми» вероятностями, а с их преобразованиями, сохраняющими непротиворечивость в смысле неклассической логики.

Список использованных источников:

1.Закон исключённого третьего [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gtmarket.ru/concepts/6974. – Дата доступа: 10.02.2026.

2. Функция Softmax [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aiew.ru/glossary/softmax/. – Дата доступа: 15.03.2026.

3. Why Softmax Lies in Production: Better Uncertainty from Logits (Without Changing Your Model) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://medium.com/@muhibuddin12/why-softmax-lies-in-production-better-uncertainty-from-logits-without-changing-your-model-bdad0df9996b. – Дата доступа: 31.03.2026.

UDC 004.89:16

VIOLATION OF THE LAW OF THE EXCLUDED MIDDLE IN SOFTMAX CLASSIFIERS AS A SYSTEMIC PROBLEM OF LOGICAL CONSISTENCY OF AI

Okhotenko A.L., master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Shatalova V.V. – Cand. of Sci., Associate Professor of the Department of IPiE

Annotation. This article examines the implicit contradiction between the architecture of softmax classifiers and the requirements of classical two-valued logic. It is shown that interpreting the probabilistic output as a truth value leads to an apparent but systemically significant violation of the law of excluded middle. The implications of this gap for deductive inference based on the predictions of neural network models are analyzed. A conclusion is reached regarding the need to abandon binary semantics when integrating probabilistic classifiers into logically consistent artificial intelligence systems.

Keywords. Law of excluded middle, softmax, logical consistency, classifier, uncertainty, semantic gap.

ФИЛОСОФСКИЕ АСПЕКТЫ СОГЛАСИЯ НА ОБРАБОТКУ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Колесинский А.Д., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чуешов В.И. – д-р фил. наук, профессор

Рассматриваются философские аспекты персональных данных и института согласия на их обработку в условиях цифрового общества. Анализируется взаимосвязь между правом на приватность, автономией личности и механизмом согласия как юридическим инструментом контроля человека над информацией о себе. Особое внимание уделяется философско-правовым основаниям института согласия, его отражению в международных правовых актах и национальном законодательстве, а также проблемам его реализации в современной цифровой среде. Рассматриваются современные вызовы, связанные с развитием технологий обработки данных, включая информационную асимметрию, формальность согласия и коммерциализацию персональной информации. Делается вывод о необходимости совершенствования института согласия и разработки дополнительных механизмов защиты прав человека в сфере обработки персональных данных.

Философское обоснование согласия на обработку персональных данных уходит корнями в фундаментальные представления о личной автономии и человеческом достоинстве. Уже в классической работе Уоррена и Брандайса приватность определялась как право быть оставленным в покое, что подчеркивало суверенное господство индивида над информацией о себе [1]. Американский политолог Алан Уэстин развил эту идею, трактуя приватность как право личности самой решать, какие сведения о ней раскрываются другим и на каких условиях [2]. В континентальной Европе этот подход получил юридическое выражение в доктрине информационного самоопределения, сформулированной Федеральным конституционным судом Германии в 1983 году. Суд указал, что в условиях современных технологий защита личности от неограниченного сбора и использования ее данных вытекает из основного права на свободное развитие личности и человеческое достоинство, гарантируя возможность индивида контролировать раскрытие своих персональных данных [3]. Данный прецедент заложил философско-правовой фундамент всей последующей системы законодательства о персональных данных в Европе. Белорусская правовая система также гарантирует неприкосновенность частной жизни, Конституция РБ в статье 28 утверждает право каждого гражданина на частную жизнь и тайну [4]. Как следствие, согласие субъекта выступает краеугольным камнем законного обращения с личными данными, вытекающим из общего права на приватность. Оно отражает принцип автономии личности, способность каждого самостоятельно распоряжаться сведениями о себе.

Однако в цифровую эпоху механизм согласия сталкивается с серьёзными вызовами на практике. Многие исследователи и эксперты указывают на кризис информированного согласия в цифровую эпоху. Согласно букве закона, согласие должно быть информированным, то есть субъекту должны быть разъяснены цели, объём и последствия обработки [5]. Но на практике объём информации, предлагаемый субъекту, настолько велик и сложен, что фактически средний человек не в состоянии его адекватно воспринять. Исследование Л. Кранор и А. Макдональд наглядно показало, чтобы прочитать все политики конфиденциальности, с которыми пользователь сталкивается в сети за год, потребовалось бы около 244 часов, то есть 30 рабочих дней, если читать по 8 часов в день [6]. Очевидно, что ни один человек не может уделить столько времени чтению юридических текстов онлайн. В результате большинство пользователей либо вообще не читают условия, либо просматривают их бегло. Это приводит к явлению, которое можно назвать фиктивной информированностью, человек ставит галочку или нажимает «Согласен», полагая, что так надо, но не усваивает реально, на что именно он дал согласие [7]. Как метко отмечают исследователи, в таких условиях так называемое информированное согласие вырождается в юридическую фикцию [7]. Пользователь совершает действие согласия, не будучи действительно информирован, следовательно, отсутствует та осознанность, которая требовалась юридически.

Другая серьезная проблема связана с отсутствием реальной свободы выбора, когда согласие де факто становится не добровольным. Формально пользователь волен не соглашаться, но практически отказ означает невозможность воспользоваться нужным сервисом или сайтом. Многие мобильные приложения при установке требуют согласиться с обработкой данных, иначе попросту не работают. Такая ситуация получила название принуждение к согласию. GDPR пытался решить эту проблему нормой о недопустимости ставить предоставление услуги в зависимость от согласия на избыточные данные, но на практике грань между необходимыми и избыточными данными не всегда очевидна [8]. Компании нередко включают в пользовательские соглашения условия об обширной обработке данных, обосновывая это неотъемлемостью для функционирования сервиса. Пользователь оказывается перед дилеммой либо принять пакет условий целиком, либо отказаться от сервиса. Естественно, в большинстве случаев он предпочитает согласиться, и вот уже номинально добровольное согласие получено, хотя по сути оно дано под давлением обстоятельств. Проблема усугубляется тем, что в

современном мире некоторые цифровые сервисы стали монополистически необходимыми, отказаться от них крайне сложно, а значит пользователь вынужден акцептовать любые их условия. В литературе по этому поводу говорят об асимметрии сил между корпорациями и индивидами, пользователь технически свободен сказать нет, но социально и практически эта свобода иллюзорна. По выражению Ш. Зубофф, в эпоху капитализма слежки наше согласие превращается в фикцию, технологические гиганты тихо собирают массивы личных сведений, заявляя, что мы сами на это согласились, хотя в действительности мы не контролируем этот процесс [9]. Зубофф называет такое состояние атакой на автономию человека, когда сбор данных стал повсеместным и неотвратимым, говорить о сознательном согласии уже нельзя [9].

Ещё одним феноменом является усталость от необходимости принимать решения о приватности. Столкнувшись с бесконечным потоком всплывающих окон, запросов согласия на cookies, длинных пользовательских соглашений, люди начинают испытывать раздражение и апатию. Вместо обдумывания они механически нажимают «Согласен», лишь бы поскорее получить доступ к нужному контенту. Эмпирические исследования подтверждают, многие пользователи осознают риски для приватности, но чувствуют бессилие контролировать ситуацию и потому намеренно игнорируют детали, соглашаясь по умолчанию [8]. Такая усталость подтачивает саму идею согласия как осознанного акта. По сути, мы имеем массовое явление формального согласия, когда субъекты утрачивают мотивацию защищать свои данные, чувствуя, что это бесполезно или слишком утомительно. Причины такого явления кроются в когнитивной перегрузке, человек просто не способен обрабатывать столько запросов. Согласно теориям поведенческой экономики, избыточный выбор и частые прерывания внимания ведут к ухудшению качества принимаемых решений. Даниэль Солов назвал эту ситуацию дилеммой согласия, с одной стороны, согласие часто не является значимым, но с другой, если отказаться от него, это еще хуже, потому что тогда вообще убирается последний элемент контроля у личности [7]. Получается замкнутый круг, согласие в нынешнем виде не справляется, но без него индивид останется вовсе безоружным перед сбором данных.

Проведенный анализ показывает, что решение проблемы видится не в отказе от концепции согласия, а в ее перезагрузке и комплексном усилении. Необходимо повышать стандарт осознанности, упрощая коммуникацию и стандартизируя объяснения [7]. Требуется обеспечить добровольность на деле, не допуская принуждения человека под угрозой исключения из социально значимых сервисов. Контроль над соблюдением условий согласия должен усилиться, за этим нужен строгий надзор и ответственность [8]. Сам подход к защите данных должен становиться более проактивным, что ограничивает сбор и использование данных до минимума и снижает зависимость от согласия как панацеи. Крупные цифровые игроки должны осознавать свою обязанность не эксплуатировать информационную неграмотность пользователей, а напротив, помогать им. Институциональные инновации, от комиссий по этике данных до коллективных механизмов управления, могут дополнить институт согласия, подстраховывая его там, где индивид объективно слаб. В конечном счете, защита персональных данных – это ответственность не только самих граждан, но и государства, и бизнеса, и гражданского общества. Только совместными усилиями можно сделать так, чтобы в цифровом мире высокий уровень технологий не означал низкий уровень приватности. Как метко сформулировано в решении немецкого суда 1983 года, свободное развитие личности в условиях современного сбора данных требует защиты индивида от неограниченного использования его персональной информации, а значит гарантии за самим индивидом властных полномочий определять судьбу своих данных. В сущности, речь идет о том, каким будет будущее цифрового общества, либо основанным на сознательном согласии и доверии, либо на скрытых манипуляциях и подчинении. Ответ на этот вопрос во многом зависит от того, сможем ли мы наполнить институт согласия реальным содержанием.

Список использованных источников:

1. Warren, S. D. The Right to Privacy / S. D. Warren, L. D. Brandeis // Harvard Law Review. – 1890. – Vol. 4, № 5. – P. 193-220.

2. Westin, A. F. Privacy and Freedom / A. F. Westin. – 1st ed. – New York : Atheneum, 1967. – 487 p.

3. Charter of Fundamental Rights of the European Union // Official Journal of the European Communities. – 2000. – 18 December. – C 364. – P. 1-22.

4. Конституция Республики Беларусь : с изм. и доп., принятыми на респ. референдумах 24 нояб. 1996 г., 17 окт. 2004 г. и 27 февр. 2022 г. – Минск : Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь, 2024. – 109 с.

5. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ (ред. от 07.07.2025) «О персональных данных» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2006. – № 31 (1 ч.). – Ст. 3451.

6. McDonald, A. M. The Cost of Reading Privacy Policies / A. M. McDonald, L. F. Cranor // I/S: A Journal of Law and Policy for the Information Society. – 2008. – Vol. 4, № 3. – P. 543-568.

7. Solove, D. J. Introduction: Privacy Self-Management and the Consent Dilemma / D. J. Solove // Harvard Law Review. – 2013. – Vol. 126, № 7. – P. 1880-1903.

8. Lynskey, O. The Foundations of EU Data Protection Law / O. Lynskey. – 1st ed. – Oxford : Oxford University Press, 2015. – 307 p.

9. Zuboff, S. The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power / S. Zuboff. – 1st ed. – New York : PublicAffairs, 2019. – 704 p.

ЦИФРОВОЙ ФЕТИШИЗМ

Корото М.С., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чуешов В.И. – д-р фил. наук, профессор

В статье вводиться и систематически разрабатывается понятие «цифровой фетишизм» – форма некритического отношения к цифровым объектам, алгоритмам и данным, при которой им приписываются свойства объективности, нейтральности, автономной власти или даже сакральности, которыми они объективно не обладают. Цифровой фетишизм выполняет идеологическую функцию затемняя социальную природу цифровых артефактов и блокируя осознанный анализ собственных действий, убеждений, опыта направленного на оценку их качества, поиска скрытых предпосылок и совершенствование.

Цифровая культура породила устойчивую и, как правило, нерефлексируемую форму сознания, которую можно назвать *цифровым фетишизмом.* Она проявляется в повседневных практиках: доверии к «объективности» данных, благоговении перед «мудростью» алгоритма, вере в то, что «код – это закон», убежденности, что неучтенное в базе данных реально не существует. За всеми этими феноменами стоит одна структура: цифровому артефакту приписываются свойства, которыми он не обладает, причем это приписывание происходит бессознательно и сопровождается риском «симуляции понимания», которое можно принять за подлинное сознание. Зависимость от данных, предубеждения, ошибки, стереотипы и ограничения тех текстов, на которых строилось обучение [1].

Цель данной статьи – дать систематическое описание цифрового фетишизма, проследить его историко-философские корни, выделить его формы и функции, а также предложить пути его критического преодоления.

Понятие «фетишизм» имеет двойное происхождение.

Огюст Конт в «Курсе позитивной философии» (1830-1842) использовал понятие «фетишизм» для обозначения самой ранней стадии теологического мышления, когда люди приписывают неодушевленным объектам (камням, деревьям, идолам) живую душу и сверхъестественную силу. Фетиш – это объект, который воспринимается как автономный источник действия и судьбы [2].

Карл Маркс в «Капитале» (1867) трансформирует это понятие. При товарном фетишизме общественное отношение между людьми (производство, обмен, эксплуатация) принимает фантастическую форму отношения между вещами – товарами, деньгами, капиталом. Товар начинает восприниматься как обладающий собственной магической ценностью, независимой от вложенного в него труда. Маркс пишет: «Товарный фетишизм – это овеществление общественных отношений» [3].

Дьёрдь Лукач в «Истории и классовом сознании» (1923) развивает марксовский анализ применительно к капиталистической рациональности: овеществление означает, что все социальные отношения принимают форму объективных, безличных, «естественных» структур, которые воспринимаются как не подлежащие изменению [4].

Цифровой фетишизм, как будет показано, является *новой исторической формой* той же самой структуры – но теперь в условиях цифрового капитализма и алгоритмического управления.

Цифровой фетишизм – это форма некритического сознания, при которой цифровым объектам (данным, алгоритмам, интерфейсам, коду) приписывается: автономная действенность (они «решают», «рекомендуют», «знают»); им приписывается онтологическая фундаментальность (существует только то, что есть в цифре), эпистемическая непреложность (данные не врут, алгоритм объективен), нормативная сила (то, что делает алгоритм, должно быть сделано).

При этом затемняется: социальная природа цифровых артефактов (они созданы людьми, корпорациями, в конкретных исторических условиях), ценностная нагруженность (алгоритмы не нейтральны, они реализуют чьи-то цели), историческая изменчивость (цифровые структуры можно и нужно менять).

Цифровой фетишизм не является случайным когнитивным искажением. Он выполняет **системную идеологическую функцию** в условиях цифрового капитализма.

Дегуманизация контроля. Решения, принимаемые людьми (менеджерами, чиновниками, судьями), маскируются под «объективные выводы алгоритма». Это снимает ответственность и блокирует апелляцию.

Легитимация существующего. То, что существует в цифровой форме (популярное, часто встречающееся, легко формализуемое), объявляется нормой. Маргинальное, не формализуемое, редкое становится «шумом» или «отклонением».

Пассивность пользователя. Если «алгоритм знает лучше», то не нужно критически мыслить, проверять, сомневаться, сопротивляться. Фетишизм производит покорного пользователя.

Естествознание искусственного, когда цифровые структуры, созданные людьми в конкретных исторических обстоятельствах, начинают восприниматься как неизменные природные законы.

В контексте ИИ цифровой фетишизм приобретает особую остроту. Современные нейросети, такие как Large Language Model (LLM) – инструмент для генерации текста, обладающий высокой сложностью, но не сознанием, не волей, не гарантией истинности. Задачей является соединять разрозненные идеи и каркасы для размышлений, обучаясь на колоссальных объемах тестовых данных (книги, сайты, коды) провоцируют фетишизацию по двум линиям: фетишизация **вывода,** фетишизация **агентности.**

Под фетишизацией вывода подразумевается, что поскольку LLM генерирует тексты, которые синтаксически неотличимы от человеческих, зачастую они в академическом стиле пользователь склонен приписывать обоснованные убеждения, понимания действительности которого нет. LLM не «знает», не «думает», не «убежден» – но LLM лингвистическая симуляция, которая создает иллюзию авторитетности.

Фетишизация агентности происходит, когда ИИ принимает решение (рекомендация, диагностика, фильтрация), пользователь может воспринимать это решение как автономное и мудрое, забывая, что за ним стоят обучающие данные, целевая функция, архитектурные ограничения и человеческие решения на всех этапах. Происходит «сглаживание сложности» чтобы дать четкий ответ, LLM упрощает сложные философские концепции, рискуя подменить глубокую дискуссию «усредненным» мнением, которого на самом деле не придерживается ни один серьезный мыслитель.

Критическая работа философии здесь заключается в процессе раскрытия, направленного на выявление истинной сущности этого фетишизма: выявить контекстуальные риски и этические недостатки алгоритмов, за которыми стоят социальные, экономические и политические решения, которые могут и должны быть предметом общественного контроля.

Преодоление цифрового фетишизма – это постоянная практика осознанного глубокого анализа действий, убеждений. Самый надежный способ рассматривать ответы LLM, как провокацию, или черновик, который личность должна осознать, критически осмыслить, проверить по первоисточникам, и в конечном счете превзойти собственным мышлением.

В преодолении цифрового фетишизма можно выделить несколько стратегий: восстанавливать историю цифрового артефакта (кто, когда, зачем, на каких данных); показывать, что алгоритмы – не безличные силы, а инструменты, реализующие интересы конкретных групп; внедрение в привычку проверка данных, верификация вывода; определять границы допустимого вывода и источник, который их установил; внедрять требования к прозрачности, объяснимости и подотчётности алгоритмических систем, чтобы лишить их фетишисткой «непроницаемости».

Цифровой фетишизм – это не случайное заблуждение, а систематически воспроизводимая форма сознания, характерная для цифрового капитализма. Он выполняет идеологическую функцию: скрывает социальную природу цифровых артефактов, легитимирует существующее распределение власти и блокирует критическую рефлексию. Его наиболее опасное проявление сегодня – фетишизация ИИ, когда алгоритмам приписывается мудрость, автономия и авторитетность, которыми они не обладают.

Задача философии, критической теории и металогики – систематическая демассификация цифрового фетишизма. Это требует не только теоретической работы, но и разработки практик «эпистатической гигиены», а также институциональных механизмов прозрачности и подотчетности.

В конечном счете, преодоление цифрового фетишизма – это условие сохранения человеческой субъектности и ответственности в эпоху, когда алгоритмы всё чаще претендуют на то, чтобы думать и решать за личность. Без этой критической работы субъекты культуры рискуют превратиться не в хозяев цифровых инструментов, а в их фетишистских служителей.

Список использованных источников:

1. *The Seven Deadly Sins of AI Predictions / Rodney Brooks // MIT Technology Review, 2017 – P. 1.*
2. *Курс позитивной философии / Огюст Конт // Париж, 1830-1842 – С. 3.*
3. *Капитале / Карл Маркс // Нью-Йорк,1867 – С. 2.*
4. *Истории и классовом сознании / Дьёрдь Лукач // Москва, 1923.*

УДК 1:004

ФИЛОСОФИЯ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Круговой В.Н., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Малыхина Г.И. – канд. фил. наук, доцент

В статье рассматриваются философские аспекты феномена больших данных. Анализируются онтологические основания цифровых данных, их влияние на классические эпистемологические принципы (проблема индукции, соотношение корреляции и причинности), а также этические вызовы, связанные с алгоритмической обработкой информации. Особое внимание уделяется трансформации научного метода в эпоху data-driven исследований и формированию новой парадигмы познания. Показано, что большие данные не только изменяют инструментарий науки, но и ставят под сомнение традиционные представления о субъекте, объекте и границах научного знания.

Стремительное развитие цифровых технологий, повсеместная цифровизация социальных, экономических и научных процессов привели к возникновению феномена больших данных (big data). Под большими данными принято понимать массивы информации, характеризующиеся большим объёмом (volume), высокой скоростью обновления (velocity) и разнообразием структур (variety) [1]. Однако за этими количественными характеристиками скрывается качественно новый феномен, который требует философской рефлексии. Философия больших данных представляет собой междисциплинарную область, находящуюся на пересечении эпистемологии, онтологии, этики и философии науки. В настоящей статье мы рассматриваем ключевые философские проблемы, возникающие в связи с широким внедрением методов анализа больших данных в научное познание и социальную практику.

Современные философские определения больших данных демонстрируют разнообразие подходов. В рамках data science (в частности, публикаций arXiv) большие данные рассматриваются как масштабные и высокоразмерные массивы информации, которые невозможно обработать традиционными методами из-за объёма, скорости обновления и структурной сложности [2]. В философии искусственного интеллекта Ramon Alvarado интерпретирует Big Data как эпистемическую среду, в которой знание формируется через вычислительные процедуры [3]. Подходы Explainable AI (Long et al.) акцентируют внимание на том, что большие данные представляют собой многослойные и неструктурированные информационные потоки, требующие автоматизированных моделей для выявления устойчивых зависимостей [4]. В философии науки William Pietsch подчёркивает, что Big Data выступают новой формой эмпирического материала, где статистические зависимости могут предшествовать теоретическим моделям [5].

Инженерные науки (в частности, стандарты IEEE) рассматривают большие данные как информацию, требующую распределённых вычислений и новых архитектур хранения [6]. В когнитивной информатике (исследования arXiv) они описываются как массивы, выходящие за пределы человеческой интуитивной обработки [2]. В философии техники (журнал AI & Society) большие данные трактуются как социотехнические конструкции [7]. В вычислительной социологии (издания Springer) они понимаются как цифровые следы человеческой деятельности [8]. В машинном обучении (публикации ACM) подчёркивается эффект дрейфа данных, указывающий на нестабильность статистических свойств [9], а в теории сложных систем (исследования arXiv) — их многомасштабность и нелинейность [10].

Совокупность современных определений больших данных показывает, что речь идёт не об одном феномене, а о многослойной концепции, объединяющей технические, эпистемологические и социальные измерения. В рамках data science большие данные прежде всего описываются как количественно и структурно избыточные массивы информации, выходящие за пределы традиционных методов обработки [2]. Однако уже на этом уровне становится очевидно, что их специфика определяется не только масштабом, но и динамикой — скоростью обновления и изменчивостью структуры.

Философские интерпретации смещают акцент с характеристик данных на способы работы с ними. Так, Ramon Alvarado рассматривает большие данные как эпистемическую среду, где знание формируется через вычислительные процедуры, а не через классические теоретические конструкции [3]. Близкую позицию занимает William Pietsch, подчёркивая, что в условиях больших данных статистические зависимости могут предшествовать теории и фактически направлять исследование [5]. Это означает сдвиг от объяснения к выявлению закономерностей, где корреляция становится не побочным результатом, а отправной точкой научного поиска.

Подходы Explainable AI акцентируют внимание на внутренней сложности данных: они понимаются как многослойные, неструктурированные потоки, требующие автоматизированных моделей для извлечения устойчивых зависимостей [4]. При этом сами модели становятся необходимым посредником между данными и знанием. В инженерных дисциплинах (например, IEEE и ACM) подчёркивается инфраструктурный аспект: большие данные требуют распределённых вычислений и новых архитектур

хранения [6; 9]. Дополнительно в машинном обучении фиксируется эффект дрейфа данных, указывающий на принципиальную нестабильность статистических свойств и необходимость постоянной адаптации моделей.

Когнитивные и системные подходы углубляют это понимание. В когнитивной информатике (публикации arXiv) большие данные описываются как массивы, выходящие за пределы человеческой интуитивной обработки [2]. В теории сложных систем они интерпретируются как многомасштабные и гетерогенные образования, в которых локальные взаимодействия не редуцируются к глобальным закономерностям [10]. Это подводит к идее нелинейности и множественности уровней организации данных.

Наконец, социально-гуманитарные подходы дополняют картину. В философии техники (журнал AI & Society) большие данные понимаются как социотехнические конструкции [7], а в вычислительной социологии (издания Springer) — как цифровые следы человеческой деятельности [8]. Это означает, что данные не только отражают реальность, но и формируются в процессе взаимодействия людей, технологий и институтов.

Таким образом, современные определения сходятся в одном: большие данные нельзя свести к количественной характеристике. Они представляют собой динамическую, многослойную и контекстуально обусловленную среду, в которой знание возникает через взаимодействие вычислительных процедур, исследовательских практик и социальных структур. Именно это делает большие данные не просто объектом анализа, а ключевым фактором трансформации научного познания.

Однако подобное расширение понимания больших данных неизбежно выводит исследование за пределы эпистемологии и ставит вопрос об их онтологическом статусе. Если данные больше не являются нейтральным отражением реальности, а формируются в процессе взаимодействия алгоритмов, инфраструктур и практик, то возникает необходимость уточнить, что именно они представляют собой как форма бытия. Являются ли цифровые данные лишь репрезентацией объектов, или же они приобретают собственную онтологическую автономию? В какой мере данные конструируют исследуемую реальность, а не просто её фиксируют?

Эти вопросы требуют перехода от анализа знаний к анализу самой природы данных, что позволяет обратиться к следующему аспекту исследования — онтологическим основаниям больших данных и природе цифровой реальности.

В классической философии данные воспринимались как результат наблюдения, фиксация свойств объектов. Однако в условиях цифровой среды данное понимание оказывается недостаточным. Цифровые данные не существуют вне технической инфраструктуры: они порождаются алгоритмами, хранятся в базах данных и циркулируют в сетях. Это ставит принципиальный вопрос: являются ли данные нейтральными «следами» реальности или же они конституируются технологическими и социальными практиками.

Современные философы информации, такие как Luciano Floridi, предлагают рассматривать данные как элементы «инфосферы», обладающие собственным онтологическим статусом [1]. В этом контексте возникает сильный тезис: данные выступают не только средством описания реальности, но и формой её бытия, то есть новой онтологией цифровой эпохи. Подобный подход сближает философию больших данных с идеями Martin Heidegger о технологическом раскрытии мира, где техника не просто инструмент, а способ проявления сущего [2].

Согласно критическим подходам (в том числе в духе Michel Foucault), данные не просто отражают мир, но активно формируют его, участвуя в процессах категоризации, классификации и управления [3]. Таким образом, онтология больших данных оказывается не данностью, а конструкцией, что требует пересмотра классической дихотомии «объективное – субъективное». Данные в этом смысле выступают как операционализированная реальность, возникающая в результате взаимодействия алгоритмов, инфраструктур и социальных практик.

Большие данные радикально изменили эпистемологическую ситуацию в науке. Традиционный научный метод предполагает выдвижение гипотез, дедуктивный вывод и поиск причинных объяснений. В отличие от него, методология data-driven ориентирована на обнаружение устойчивых корреляций в огромных массивах данных без предварительных теоретических предпосылок.

Как отмечает Chris Anderson, один из сторонников идеи «конца теории», в эпоху больших данных корреляция может вытеснять причинность [4]. Однако данная позиция вызывает обоснованную критику. В частности, Judea Pearl подчёркивает, что без причинных моделей невозможно ни объяснение, ни надёжное предсказание [5]. Следовательно, большие данные не отменяют теорию, а трансформируют её роль: теория становится регулятивным инструментом, позволяющим отличать значимые корреляции от ложных.

Особую роль здесь играет классическая проблема индукции, сформулированная David Hume [6]. В условиях больших данных она приобретает новое измерение: даже при обработке огромных массивов информации мы имеем дело с прошлым опытом, который не гарантирует достоверности обобщений.

Алгоритмы машинного обучения, основанные на индуктивном переносе, остаются уязвимыми к изменениям среды и систематическим ошибкам.

Философский анализ больших данных невозможен без рассмотрения этических коллизий. Сбор и обработка персональных данных создают беспрецедентные риски для приватности. Однако более глубокая проблема связана с феноменом алгоритмической власти. Решения, принимаемые на основе анализа данных, зачастую непрозрачны и формируют эффект «чёрного ящика».

Исследователи, такие как Cathy O'Neil, показывают, что алгоритмы могут воспроизводить и усиливать социальные неравенства [7]. Алгоритмическая дискриминация возникает тогда, когда исторические предубеждения закрепляются в обучающих выборках и затем масштабируются через автоматизированные системы. В этом контексте большие данные становятся инструментом не только познания, но и управления, что требует пересмотра понятий справедливости, автономии и ответственности.

Влияние больших данных на науку выходит за рамки отдельных дисциплин. В концепции «четвёртой парадигмы», предложенной Jim Gray, выделяется переход к data-intensive науке, где знание извлекается из данных посредством вычислительных методов [8]. Однако это не означает отказа от классических научных принципов.

Напротив, как подчёркивают современные философы науки, требования общезначимости, воспроизводимости и теоретической обоснованности становятся ещё более значимыми. Большие данные усложняют структуру знания, делая необходимой его интерпретацию и критическую оценку.

Существенно трансформируется и субъект познания. Классический образ учёного уступает место гибридным коллективам, включающим алгоритмы, программные комплексы и междисциплинарные команды. Это ставит вопрос о границах человеческого и машинного познания и требует формирования «критической алгоритмической грамотности» как нового эпистемического навыка.

Философия больших данных представляет собой актуальную область исследований, в которой переплетаются онтологические, гносеологические и этические измерения. Большие данные не просто предоставляют новый инструментарий для науки, но и ставят под вопрос фундаментальные принципы классического рационализма.

Вместе с тем они открывают новые горизонты для исследования сложных систем, требующие интеграции количественных методов с качественной интерпретацией. Дальнейшая философская рефлексия должна быть направлена на разработку эпистемологических критериев надёжности выводов, а также на формирование этических стандартов, обеспечивающих соблюдение автономии и достоинства человека в цифровой среде.

Список использованных источников

1. *Floridi Luciano. The philosophy of information. — Oxford: Oxford University Press, 2011. – 404 p.*
2. *Heidegger Martin. Вопрос о технике // Время и бытие: ст. и выступления. – М.: Республика, 1993. – С. 221–238.*
3. *Foucault Michel. Археология знания. – СПб.: Гуманитарная Академия, 2004. – 416 с.*
4. *Anderson Chris. The end of theory: the data deluge makes the scientific method obsolete [Электронный ресурс] // Wired. – 2008. – Режим доступа: https://www.wired.com/2008/06/pb-theory/. – Дата доступа: 26.03.2026.*
5. *Pearl Judea. The book of why: the new science of cause and effect. – New York: Basic Books, 2018. – 432 p.*
6. *Hume David. Исследование о человеческом разумении. – М.: Канон+, 2009. – 320 с.*
7. *O'Neil Cathy. Weapons of math destruction: how big data increases inequality and threatens democracy. – New York: Crown, 2016. – 272 p.*
8. *Gray Jim. The fourth paradigm: data-intensive scientific discovery / ed. by T. Hey, S. Tansley, K. Tolle. – Redmond: Microsoft Research, 2009. – 252 p.*

UDC 1:004

PHILOSOPHY OF BIG DATA

Krugovoy V.N., master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Malykhina G.I. – PhD in Philosophy, Associate Professor

Annotation. The article examines the philosophical aspects of the phenomenon of big data. It analyzes the ontological foundations of digital data, their impact on classical epistemological principles (the problem of induction, the relationship between correlation and causation), as well as the ethical challenges associated with algorithmic information processing. Special attention is paid to the transformation of the scientific method in the era of data-driven research and the formation of a new paradigm of knowledge. It is shown that big data not only change the tools of science but also call into question traditional notions of subject, object, and the boundaries of scientific knowledge.

Keywords. Big Data, epistemology, data ontology, scientific method, data-driven science, causality, algorithmic fairness.

УДК 339.13

ЭТИЧЕСКИЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ ИНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГА С ПОЗИЦИЙ УТИЛИТАРИЗМА И ДЕОНТОЛОГИИ

Курлович М.Н., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Парафиянович Т.А. – канд. пед. наук, доцент

В статье анализируются этические дилеммы интернет-маркетинга (сбор данных, манипуляция поведением, недобросовестная конкуренция) с позиций двух философских подходов – утилитаризма, оценивающего последствия действий для общего блага, и деонтологии, требующей безусловного соблюдения моральных норм. Рассмотрены функции цифрового маркетинга и связанные с ними риски для приватности и доверия потребителей. Показано, что этичный маркетинг является не препятствием, а необходимым условием долгосрочной устойчивости бизнеса. Сформулированы рекомендации для достижения баланса между эффективностью и уважением прав человека в цифровой среде.

Современный бизнес все чаще оказывается перед лицом сложных моральных вызовов. Конкуренция, геополитические факторы, санкции, стремление к финансовому успеху любой ценой, конфликты интересов и недостаток прозрачности – все это создает напряженную среду, где вопросы этики выходят на первый план. Эти проблемы затрагивают не только отдельные компании, но и экономику в целом, требуя вдумчивого анализа и моральной рефлексии. Помимо этого, предприятия вынуждены учитывать свою социальную и экологическую ответственность, а также качество корпоративного управления.

Цифровые технологии сделали репутацию бренда крайне уязвимой: информация мгновенно распространяется по всему миру, и то, что еще вчера воспринималось как норма, сегодня может оказаться неприемлемым [1, с. 630]. В этих условиях бизнес-этика превращается в самостоятельный фактор производства наряду с трудом, капиталом и информацией. Под ней понимают исследование моральных вопросов в предпринимательстве и управлении. Здесь выделяют два уровня: во-первых, личное нравственное поведение специалиста (решения, отношения с коллегами и клиентами); во-вторых, более широкий аспект, касающийся интересов компаний и законности их действий. Следует отметить, что большинство организаций декларируют приверженность устойчивому развитию и социальной ответственности, однако на рынке по-прежнему встречаются неэтичные способы продвижения товаров, игнорирующие роль морали в бизнесе.

Белорусское законодательство о рекламе и стандарты этичного поведения опираются на Международный кодекс рекламной практики, главная цель которого – формировать у производителей и посредников чувство ответственности перед потребителями [2, с. 86]. В условиях растущих общественных требований к корпоративной ответственности понимание и соблюдение этических норм становится не просто желательным, а решающим фактором, влияющим на репутацию и долгосрочный успех организаций.

Цель данной работы – проанализировать этические дилеммы интернет-маркетинга с позиций утилитаризма и деонтологии.

Задачи: выделить основные этические проблемы онлайн-маркетинга, рассмотреть эти проблемы через призму утилитаризма и деонтологии, представить практические рекомендации для бизнеса по соблюдению этических норм в цифровом продвижении.

Интернет-маркетинг, благодаря широкому набору инструментов, позволяет компаниям привлекать целевую аудиторию, повышать узнаваемость бренда и увеличивать продажи [3, с. 308]. Цифровой маркетинг выполняет те же функции, что и традиционный: он поддерживает товарную, ценовую, сбытовую и коммуникационную политику. Его инструменты дают возможность собирать, анализировать и оценивать информацию о рынке, конкурентах и покупателях. Эти данные помогают принимать эффективные решения – оптимизировать стратегии продвижения, выстраивать цены, улучшать таргетинг и создавать продукты под конкретный запрос [4, с. 7].

Информационные технологии расширяют рынок сбыта, повышают узнаваемость бренда и объемы продаж. Выгоду получают не только компании, но и пользователи: им становится проще и быстрее выбирать товары и услуги благодаря релевантным предложениям, открытому доступу к актуальной информации об акциях и скидках. Индивидуальные потребности клиентов удовлетворяются за счет продуктов, соответствующих их ожиданиям.

Ключевые функции интернет-маркетинга:

1 Построение цифрового профиля потребителя: анализ цифрового следа, покупательского поведения, социально-демографических характеристик, данных из соцсетей.

2 Анализ конкурентов: сбор данных об их сильных и слабых сторонах через сайты, группы в соцсетях и другие онлайн-активности.

3 Продвижение товаров и услуг: SEO, развитие страниц в соцсетях, мобильные приложения, email-рассылки, мессенджеры.

4 Персонализированная разработка новых продуктов: создание товаров под конкретные группы целевой аудитории на основе собранной информации.

Каждая из этих функций может порождать этическую дилемму – ситуацию, где человек неизбежно оказывается перед выбором, нарушающим моральные нормы. Этика здесь выступает не как простой набор правил, а как философский вопрос о том, как использовать технологии, не ущемляя фундаментальных прав и свобод человека. Где проходит грань дозволенного в погоне за эффективностью и прибылью? Философские размышления о свободе, приватности и ответственности приводят нас к двум классическим подходам – утилитаризму и деонтологии, которые предлагают разные способы оценки действий.

Утилитаризм утверждает: моральная ценность поступка определяется его полезностью и последствиями для большинства. В основе морали лежит общее благо, понимаемое как наибольшее счастье для наибольшего числа людей. С этой точки зрения, если неэтичные инструменты онлайн-маркетинга ведут к росту продаж и удовлетворению потребителей, они могут считаться приемлемыми. Однако практика показывает, что последствия бывают неоднозначными. Агрессивная реклама может дать краткосрочную выгоду, но в долгосрочной перспективе – подорвать доверие и испортить репутацию. Поэтому утилитаристская стратегия в интернет-маркетинге все же предполагает этичное поведение компании [5, с. 9]. Деонтология, напротив, настаивает на соблюдении моральных норм независимо от общего блага. Действие оценивается по его соответствию правилам, а не по результатам. Нормативное обоснование поступка важнее его последствий, и некоторые действия считаются неправильными сами по себе, даже если они ведут к положительным исходам [5, с. 11]. Таким образом, манипуляция восприятием потребителей или нечестные методы сбора данных недопустимы, даже если они приносят прибыль.

В ходе исследования рассмотрены функции цифрового маркетинга, его выгоды для бизнеса и потребителей и сформулировали этические дилеммы с позиций утилитаризма и деонтологии. Детальный анализ представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Анализ этических дилемм интернет-маркетинга с позиции утилитаризма и деонтологии

№п/п	Функция интернет-маркетинга	Этическая дилемма	Позиция утилитаризма	Позиция деонтологии
1	Формирование цифрового профиля потребителя	Утечки данных, манипуляция восприятием, риск дискриминации	Использование данных допустимо для максимизации пользы; нужно учитывать возможные негативные последствия	Любые манипуляции с данными без информированного согласия каждого человека недопустимы
2	Анализ деятельности конкурентов	Копирование идей, создание недобросовестной конкуренции	Анализ конкурентов ради общего блага и улучшения рынка; важно избегать неэтичных практик	Необходима честная конкуренция и уважение к интеллектуальной собственности
3	Продвижение товаров	Агрессивная реклама, ложные обещания, влияние на предпочтения	Манипулятивная реклама допустима, если ведет к общей выгоде; но может подорвать доверие клиентов	Реклама должна быть честной и правдивой, без обмана и манипуляций
4	Персонализированная разработка новых товаров	Вопросы сбора и использования данных, риск манипуляций	Персонализация, служит повышению удовлетворенности клиентов	Необходимо получать согласие на сбор и обработку данных в любом случае

Проведенный анализ показывает, что, несмотря на все преимущества цифрового маркетинга, его инструменты порождают серьезные моральные дилеммы: утечки конфиденциальных данных, манипулятивная реклама, недобросовестная конкуренция. Утилитаризм может оправдывать некоторые методы, если они служат общему благу, тогда как деонтология требует неукоснительного соблюдения этических норм и прав потребителей. Отсюда вытекает необходимость баланса между эффективностью маркетинга и уважением к моральным принципам. В конечном счете компании должны стремиться к прозрачности и честности, чтобы избежать репутационных потерь и сохранить доверие клиентов.

Информационные технологии кардинально изменили маркетинговую среду, открыв новые возможности продвижения в интернете. Однако идеальную картину омрачают примеры неэтичного поведения, среди которых: развитие монополии через эксклюзивные соглашения [6, с. 15], вводящая в заблуждение реклама (ложные заявления, завышенные обещания), утечка данных, незаконный доступ к персональной информации, продажа данных без согласия, навязчивый таргетинг без явного разрешения пользователей, фальшивые отзывы (покупка положительных рецензий), игнорирование жалоб, недокомплектация заказов, срыв сроков поставки, манипулятивные методы убеждения, создание ложного дефицита, игра на психологических слабостях.

Раскрывшиеся случаи неэтичного поведения серьезно бьют по репутации и финансам компаний. Морально неприемлемые методы разрушают отношения с клиентами, сотрудниками, инвесторами, что ведет к снижению прибыли, падению акций и текучести кадров. Кроме того, возможны юридические последствия. Все это подталкивает бизнес к переходу на принципы этичного маркетинга.

С точки зрения утилитаризма, этичные практики должны максимизировать общее благо: удовлетворять потребности клиентов и приносить долгосрочную выгоду бизнесу. Если же организации игнорируют этические нормы ради сиюминутной прибыли, они вредят не только отдельным потребителям, но и обществу в целом. Этичное продвижение подразумевает правдивость, открытость, уважение к частной жизни и правам клиентов. Помимо соблюдения законов, это требует следования моральным нормам для выстраивания полезных и значимых взаимодействий. Приоритет благополучия потребителей наряду с долгосрочной устойчивостью и социальным воздействием – ключевые составляющие этичного маркетинга.

Соотнесение функций интернет-маркетинга с возникающими этическими дилеммами позволяет сформулировать основные принципы этичного маркетинга: честность и прозрачность в сборе данных, в заявлениях о продукции, приоритет конфиденциальности данных, персонализация на основе согласия, этичность рекламной политики, подлинное вовлечение клиентов и обратная связь [7].

Исследование этических дилемм в интернет-маркетинге через призму утилитаризма и деонтологии позволило выявить ключевые проблемы, с которыми сталкивается бизнес в цифровой среде. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что этичный маркетинг служит важной основой для построения доверительных отношений между компаниями и клиентами. Установлено: несмотря на неизбежные моральные дилеммы, компании, придерживающиеся этических стандартов, не только получают прибыль, но и способствуют созданию более справедливого и честного рынка. Неэтичные методы, нарушающие приватность и подрывающие доверие, наносят вред как отдельным брендам, так и целым отраслям. Поэтому этические принципы – не препятствие для развития цифрового маркетинга, а необходимое условие для эффективных стратегий и успешного функционирования в современном обществе. Компании, которые сумеют найти баланс между эффективностью и уважением к правам потребителей, между коммерческими интересами и моральными обязательствами, получат значительное конкурентное преимущество и обеспечат себе устойчивое развитие в долгосрочной перспективе.

Список использованных источников:

1.Гунин, А. И. Этика и мораль в современном бизнесе: актуальность и исторический аспект / А. И. Гунин // Московский экономический журнал. –2024. –No2.–С. 626–644.

2.Наганова,Т.Е. Основы правового регулирования маркетинговой деятельности: учеб.-метод.пособие / Т. Е. Наганова. –Минск : БГУИР, 2021. –182 с.

3.Насыров,Р.Р. Интернет-маркетинг как инструмент для продвижения продукции / Р.Р.Насыров, К.К.Примжарова // Вестник науки. –2024.–No5. –С. 308–314.

4.Дурович, А. П. Теория маркетинга: учеб.пособие для студентов учреждений высш.образования по спец.«Маркетинг» / А. П. Дурович. –Минск: РИВШ, 2023. –578 с.

5.Белинская, А. Б. Деонтология социальной работы : учебник для среднего проф.образо-вания / А. Б. Белинская. –М, 2025.

6.Байбардина, Т. Н. Этика маркетинга в современном обществе / Т. Н. Байбардина, О. А. Бурцева, В. А. Михалькова, А. А. Романюк // Актуальные проблемы коммерции, логис-тики и маркетинга в условиях трансформации современной экономики : сб.науч. ст.междунар.науч.-практ.конф., Гомель, 20 окт. 2022 г. –Гомель: БТЭУ, 2022.–1 электрон. опт.диск (CD-ROM).

7. Курлович, М. Н. Этические дилеммы в интернет-маркетинге: утилитаристский и деонтологический анализ / М. Н. Курлович, Т. А. Парафиянович // Вестник Брестского университета. Серия 1. Философия. Политология. Социология. – 2025. – № 2. – С. 33-38

UDC 339.13

ETHICAL CONTRADICTIONS OF INTERNET MARKETING FROM THE STANDPOINT OF UTILITARIANISM AND DEONTOLOGY

Kurlovich M.N., master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Parafyanovich T.A. – PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor

Annotation. The article analyzes the ethical dilemmas of Internet marketing (data collection, behavior manipulation, unfair competition) from the standpoint of two philosophical approaches - utilitarianism, which evaluates the consequences of actions for the common good, and deontology, which requires unconditional observance of moral norms. The functions of digital marketing and the associated risks to privacy and consumer trust are considered. It is shown that ethical marketing is not an obstacle, but a necessary condition for the long-term sustainability of a business. Recommendations are formulated to achieve a balance between efficiency and respect for human rights in the digital environment.

Keywords. ethics, internet marketing, ethical dilemmas, utilitarianism, deontology.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В БГУИР: ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Черторицкий И. Г., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Малыхина Г. И. – канд. фил. наук, доцент

Представлен анализ научно-исследовательской деятельности Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР) в сфере высоких технологий. Рассмотрены приоритетные направления исследований, конкретные разработки и структурные характеристики научной деятельности. Выявлены системные проблемы, определены перспективные ориентиры развития.

В современном мире научно-технологическое развитие – ключевой фактор устойчивого роста. Для Республики Беларусь стратегическим приоритетом является переход к производству интеллектуальных продуктов с высокой добавленной стоимостью. Университет как социальный институт не только транслирует накопленные знания, но и формирует среду, в которой эти знания производятся заново. БГУИР, являясь ведущим отраслевым вузом страны, выступает связующим звеном между фундаментальной наукой, прикладными разработками и реальным сектором экономики.

Одним из ключевых направлений научной деятельности университета является микроэлектроника. Результаты исследований находят непосредственное применение в промышленности. Так, разработанные в БГУИР технологии получения эпитаксиальных структур для высокочастотных приборов используются в системах связи 5*G*/6*G*, а конструктивно-технологические решения для сверхвысокочастотных интегральных схем внедрены на предприятиях холдинга «Планар» и ОАО «ИНТЕГРАЛ» [1]. Эффективность решений подтверждена результатами совместных исследований структур *AlGaN*/*GaN* [2], которые демонстрируют высокую подвижность электронов и низкое сопротивление в открытом состоянии, что критически важно для энергоэффективной силовой электроники и систем связи нового поколения. В лаборатории компьютерного проектирования интегральных микросхем (НИЛ 4.4) создана энергонезависимая память на основе оксидов переходных металлов. Предложенные схемотехнические и топологические решения обеспечивают более высокие показатели энергоэффективности и быстродействия по сравнению с традиционной флеш-памятью; разработка ориентирована на внедрение в производственную линейку ОАО «ИНТЕГРАЛ» и ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» [3].

Не менее значимые результаты получены в области искусственного интеллекта. Коллективом кафедры интеллектуальных информационных технологий созданы нейросетевые модели для медицинской диагностики, прошедшие апробацию в клинических условиях на базе РНПЦ «Кардиология» [4]. Как показывает международный опыт, успешное развитие искусственного интеллекта требует системной интеграции университетской науки, промышленности и государственной поддержки [5].

Важнейшим условием устойчивого развития науки является воспроизводство исследовательских кадров. Научное знание существует не только в виде формализованных текстов и патентов, но также как неявное знание, передаваемое через непосредственное участие в исследовательской работе. БГУИР выступает ключевым звеном в системе непрерывной подготовки специалистов для высокотехнологичных отраслей. Университет последовательно реализует модель «Университет 3.0», интегрирующую образование, науку и инновационное предпринимательство. Студенческие лаборатории вуза ведут разработки в области СВЧ-электроники и систем «умного дома», превращая дипломные проекты в реальные бизнес-модели. Ежегодно в научно-исследовательскую работу вовлекается более 1,5 тыс. студентов, из которых около 200 человек занимаются в научно-исследовательских лабораториях, выполняя проекты по заказам предприятий. Элементом этой экосистемы выступает Национальный детский технопарк, созданный в 2019 году [6]. Технопарк принимает школьников 9–11 классов, прошедших конкурсный отбор. Обучение ведётся по 15 направлениям, включая робототехнику, авиакосмические технологии и наноиндустрию. Ежегодно в технопарке проходят обучение более 2 тыс. учащихся, из которых около 30% поступают в дальнейшем в БГУИР. Преемственность между детским технопарком, университетом и промышленными предприятиями формирует замкнутый цикл подготовки кадров.

Достигнутые результаты создают прочную основу для дальнейшего развития. Вместе с тем анализ текущей структуры научной деятельности позволяет выделить несколько направлений, требующих внимания. Доля фундаментальных исследований в общем объёме НИОКР составляет около 20%, что может ограничить формирование научных заделов для долгосрочного развития. Как показывает пример разработки энергонезависимой памяти, создание конкурентоспособных продуктов требует длительного цикла: внедрение научных разработок в микроэлектронное производство занимает не менее пяти лет [3]. Увеличение доли фундаментальных исследований, выполняемых в рамках грантовых программ, могло бы укрепить позиции университета в областях, определяющих технологические тренды будущего.

Показательным примером выступает взаимодействие с Китайской академией наук, в рамках которого белорусские исследователи участвуют в проектах по микроэлектронике и материаловедению. В Китае показателен опыт пекинского района Чжунгуаньцунь, где ключевую роль играют Пекинский университет и Университет Цинхуа. За период 2015–2022 годов выпускниками этих университетов создано более 1,5 тыс. стартапов в сфере информационных технологий и микроэлектроники, а объём совместных НИОКР с компаниями кластера превысил 12 млрд юаней [7], что свидетельствует о системообразующей роли университетов в инновационных разработках. В Беларуси с учётом масштабов экономики интеграция научно-образовательного потенциала с традиционными промышленными предприятиями является приоритетным направлением государственной инновационной политики [8].

В сфере коммерциализации из ежегодно получаемых патентов и свидетельств практическое применение находят 10–15% [1, 9]. Дальнейшее развитие системы сопровождения интеллектуальной собственности – от патентного анализа до поиска индустриальных партнёров – позволило бы повысить этот показатель. Отдельного внимания заслуживает кадровая структура. Подготовка квалифицированных специалистов в области микроэлектроники занимает 4–6 лет и начинается уже со второго курса, когда студенты приступают к самостоятельному проектированию микросхем [3]. Однако доля исследователей в возрасте до 35 лет составляет 25% [1]. Развитие программ привлечения и закрепления молодых исследователей, включая постдокторские позиции и систему наставничества, представляется важным направлением кадровой политики. Эффективность этих мер зависит от сохранения преемственности между уровнями образования – от детского технопарка до аспирантских исследований и работы в научных лабораториях и на предприятиях.

Выявленные тенденции могут быть интерпретированы как переход от экстенсивной модели развития науки к интенсивной, требующей изменения принципов организации научной деятельности: от выполнения техзаданий к формированию исследовательской повестки, от учёта количества публикаций к оценке научного влияния, от патентирования «на всякий случай» к целенаправленной патентной стратегии. В философии науки подобные изменения рассматриваются в контексте смены типов научной рациональности: классическая наука ориентировалась на поиск универсальных законов, неклассическая учитывала роль средств наблюдения, постнеклассическая – ценностно-целевые структуры деятельности [10]. Низкая доля фундаментальных исследований и ориентация на выполнение техзаданий – это проявление классической модели, тогда как формирование собственной исследовательской повестки соответствует переходу к постнеклассической рациональности. Университетская наука сегодня также сталкивается с необходимостью такой трансформации, что согласуется с общемировыми тенденциями развития высоких технологий [5]. В этом контексте наука выступает не только как инструмент решения прикладных задач, но и как социальный институт, определяющий долгосрочные ориентиры технологического развития [10].

Таким образом, эффективность научной деятельности в техническом университете определяется способностью выстраивать сбалансированную систему, где фундаментальные и прикладные исследования, подготовка кадров и коммерциализация результатов дополняют друг друга. БГУИР выступает ключевым звеном национальной инновационной системы, а сформированная экосистема – от детского технопарка до промышленных предприятий – создаёт условия для воспроизводства научных школ и устойчивого развития высокотехнологичных отраслей.

Список использованных источников:

1. Отчет о научной деятельности Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за 2024 год. – Минск : БГУИР, 2025. – 152 с.

2. Structural and electrical properties of AlGaN/GaN HEMT structures grown on Si substrates / V. Bogush [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2023. – Vol. 156. – P. 107–115.

3. Новиков, П. Э. Чипы для заводов будущего. Передовые микросхемы ученого БГУИР внедрят в производство в ближайшие годы [Электронный ресурс] / П. Э. Новиков ; интервью провела Д. Веренич // Репозиторий БГУИР. – Минск, 2025. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/62948. – Дата доступа: 28.03.2026.

4. Neural network-based ECG analysis for early detection of cardiovascular diseases / I. Chernoritsky [et al.] // Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and e-Health. – Minsk, 2024. – P. 112–118.

5. Забродская, Н. Г. Развитие искусственного интеллекта в Германии / Н. Г. Забродская, И. Г. Черторицкий // Инженерный бизнес – 2024 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 мая 2024 г. / БНТУ. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 147–153.

6. О Национальном детском технопарке [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь от 30 мая 2019 г. № 244. – Режим доступа: https://president.gov.by/ru/documents/ukaz-no-244-ot-30-maya-2019-g-24284. – Дата доступа: 28.03.2026.

7. Zhang, Y. Universities as Anchors of Innovation Clusters: The Case of Zhongguancun and Beijing's Higher Education Institutions / Y. Zhang, H. Li // Journal of Technology Transfer. – 2023. – Vol. 48, no. 3. – P. 1125–1148.

8. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы [Электронный ресурс] : утв. Указом Президента Респ. Беларусь от 15 сент. 2021 г. № 348. – Режим доступа: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32100348. – Дата доступа: 28.03.2026.

9. О состоянии коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности в организациях высшего образования : аналитический обзор / Нац. центр интеллектуал. собственности. – Минск : НЦИС, 2025. – 44 с.

10. Малыхина, Г. И. Философия и методология науки : учеб. пособие / Г. И. Малыхина, В. И. Чуешов, В. И. Миськевич. – Минск : БГУИР, 2017. – 274 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ЦЕННОСТНОЙ РЕВОЛЮЦИИ В КУЛЬТУРЕ XXI СТОЛЕТИЯ

Лебедевич А.В., Шушкевич Д.В., магистранты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чуешов В.И. – д-р фил. наук, профессор

В работе виртуальные социальные коммуникации рассматриваются как социотехническая среда, в которой платформы, алгоритмы и экономические модели меняют формы идентичности, доверия и публичности. Показано, что цифровая коммуникация одновременно расширяет возможности человека и усиливает зависимость от инфраструктуры видимости, алгоритмической селекции и datafication. Предложены четыре сценария будущего: гуманистическое расширение возможностей, коммерциализация присутствия, алгоритмический патернализм и фрагментация публичности. Обосновывается необходимость цифровых прав, прозрачности платформ и гуманистического дизайна ИИ.

Виртуальные социальные коммуникации уже не являются внешним дополнением к реальности. Они выступают как особая социотехническая среда, где коммуникация организуется через платформы, алгоритмы, правила модерации и экономические механизмы монетизации внимания [1, 2]. Исследование будущего человека в цифровой среде требует учёта технического, социального и гуманитарного измерений. Речь идёт не только о передаче сообщений, но и о производстве видимости, доверия, репутации и поведенческих данных. В этом смысле виртуальная коммуникация становится пространством формирования новых режимов субъективности и способов социального контроля.

В сетевой среде меняется статус субъекта коммуникации. Человек остаётся носителем смыслов и переживаний, но при этом превращается в источник данных и объект поведенческого моделирования. Если в классической социальной теории самопрезентация связывалась с управлением впечатлениями в непосредственном взаимодействии, то цифровая эпоха переводит её в режим постоянного конструирования профиля [3]. Профиль включает тексты, изображения, реакции и цифровые следы, которые сохраняются, агрегируются и переиспользуются. В результате идентичность всё меньше зависит от внутреннего самопонимания и всё сильнее определяется инфраструктурой видимости: реальным становится то, что чаще показывается, лучше ранжируется и активнее комментируется.

Такое положение порождает напряжение между аутентичностью и эффективностью. С одной стороны, цифровая среда открывает возможности для самовыражения, поиска единомышленников и профессионального роста. С другой стороны, она стимулирует адаптацию личности к ожиданиям аудитории и алгоритмов. Чем сильнее жизненные шансы зависят от платформенной видимости, тем больше возрастает соблазн создавать оптимизированный образ себя. Это усиливает фрагментацию идентичности, эмоциональную зависимость от метрик одобрения и риск хронической самонаблюдаемости. Вывод Ш. Теркл о ситуации «вместе, но поодиночке» сохраняет актуальность и в эпоху коротких видеоформатов, стриминга и генеративных медиа [4].

Существенно меняется структура публичности. Алгоритмическая селекция не просто помогает ориентироваться в информационном потоке, а задаёт саму архитектуру общественного внимания. В классическом понимании публичность предполагала спор, аргументацию и рациональную проверку позиций. В платформенной среде приоритет получает контент, обеспечивающий вовлечённость, клики и время удержания внимания [5]. Усиливаются фрагментация общих дискуссионных пространств, эмоционализация повестки и зависимость значимости сообщения от его вирусного потенциала. Эффект «пузыря фильтров» закрепляет замкнутые информационные миры, в которых пользователи чаще сталкиваются с подтверждением своих взглядов [6].

Отдельного внимания заслуживает трансформация телесности и присутствия. Виртуальная коммуникация часто описывается как бестелесная, однако в действительности телесность технически перекодируется. Смартфон становится продолжением сенсорного тела, фитнес-трекеры превращают тело в поток измерений, а технологии XR создают эффект совместного присутствия в искусственно организованном пространстве. Человек физически находится «здесь», но вниманием, эмоциями и социальной включённостью может быть постоянно «там» — в чате, ленте, игре или видеоконференции. Такое распределённое присутствие меняет режим повседневности, усиливает когнитивную нагрузку и создаёт форму включённости, при которой цифровое и офлайн-измерения трудно жёстко разделить.

Человек всё заметнее выступает как «человек сетевой». Принадлежность к общности чаще определяется не территорией и устойчивыми институтами, а включённостью в коммуникационные потоки, цифровые ритуалы и экосистемы [1]. Такие общности способны быстро мобилизовать людей для взаимопомощи или гражданских кампаний, но нередко оказываются краткосрочными и подверженными поляризации. Возникает принципиальный вопрос: смогут ли виртуальные коммуникации поддерживать долгосрочные формы солидарности, или они закрепят модель общества, где преобладают краткие всплески внимания без накопления устойчивого доверия.

Особую угрозу для будущего человека представляет трансформация эпистемической среды. Низкая стоимость публикации, скорость репоста и микротаргетинг делают платформы благоприятной средой для дезинформации и постправды. Истинность всё чаще уступает место узнаваемости, эмоциональному эффекту и групповому подтверждению. Научный способ легитимации знания сталкивается с популярностным режимом, в котором мерой правдоподобия становится охват. Поэтому защита научной рациональности в цифровой публичности оказывается не частной задачей академического сообщества, а условием устойчивости всей коммуникационной среды.

Для методологии науки цифровая коммуникация важна ещё и потому, что она меняет сам объект исследования. Социальные связи становятся наблюдаемыми через цифровые следы, графы взаимодействий и массивы контента, однако возрастают непрозрачность данных, зависимость от закрытых платформ и риск неверной операционализации. Исследователь имеет дело с обществом, предварительно отфильтрованным интерфейсами и коммерческими приоритетами платформ. Отсюда следуют три требования: нельзя отождествлять цифровую активность с полнотой социальной жизни; необходимо учитывать инфраструктурные искажения при сравнении данных; этика исследования должна рассматривать приватность как условие сохранения человеческой автономии.

Изменение публичности связано с перераспределением власти. В цифровых коммуникациях власть действует не как прямой запрет, а как управление условиями выбора: что становится видимым, в каком порядке показывается и какие модели поведения выгодны [2]. Это ключевая особенность «капитализма наблюдения», где поведение превращается в данные, а данные — в ресурс прогнозирования. Цифровые следы дают новые эмпирические возможности, однако метрики не совпадают со смыслами: лайк не равен согласию, просмотр не равен пониманию, а подписка не равна доверию. Следовательно, работа с большими данными требует философской рефлексии о том, как они производятся инфраструктурой платформ.

Будущее человека в этой системе целесообразно описывать в сценарной логике. Первый сценарий можно назвать гуманистическим: цифровые платформы, системы XR и ИИ-медиаторы усиливают образование, творчество и международное сотрудничество. В таком варианте человек сохраняет контроль над своими данными и использует ИИ как инструмент расширения возможностей [7, 8]. Второй сценарий связан с коммерциализацией присутствия: базовые формы общения и участия становятся объектом монетизации. Третий сценарий — алгоритмический патернализм, при котором интеллектуальные помощники чаще подсказывают, что читать и как действовать, а автономия субъекта сужается архитектурой рекомендаций. Четвёртый сценарий выражается в фрагментации публичности и распространении постправды.

Гуманистическая траектория возможна только при наличии нормативных ограничителей. К ним относятся прозрачность платформ, защита приватности, право пользователя знать, как принимаются решения, и предотвращение дискриминационных эффектов алгоритмов [9]. Не менее важно развивать культуру критического мышления и научной рациональности. Будущее человека в системе виртуальных социальных коммуникаций определяется тем, удастся ли сохранить достоинство, автономию и способность к содержательному диалогу в среде, которая всё активнее стремится измерять, предсказывать и направлять человеческое поведение.

Список использованных источников:

1. Castells, M. The Rise of the Network Society / M. Castells.– Oxford : Wiley-Blackwell, 2010.– 597 p.

2. Zuboff, S. The Age of Surveillance Capitalism / S. Zuboff.– New York : PublicAffairs, 2019. 704 p.

3. Goffman, E. The Presentation of Self in Everyday Life / E. Goffman.– New York : Anchor Books, 1959.– 259 p.

4. Turkle, S. Alone Together: Why We Expect More from Technology and Less from Each Other 62-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 2026 / S. Turkle.– New York : Basic Books, 2011.– 360 p.

5. Habermas, J. The Theory of Communicative Action. Vol. 1 / J. Habermas.– Boston : Beacon Press, 1984.– 465 p.

6. Pariser, E. The Filter Bubble: What the Internet Is Hiding from You / E. Pariser.– New York : Penguin Press, 2011.– 294 p.

7. Ball, M. The Metaverse: And How It Will Revolutionize Everything / M. Ball.– New York : Liveright, 2022.– 352 p.

8. Kissinger, H. A. The Age of AI: And Our Human Future / H. A. Kissinger, E. Schmidt, D. Huttenlocher.– New York : Little, Brown and Company, 2021.– 272 p.

9. UNESCO. Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence [Electronic resource]. Paris, 2021.– Mode of access: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137.– Date of access: 31.03.2026

ГИПОТЕЗА ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ГИПОТЕЗА СЕПИРА-УОРФА) В ПРОГРАММИРОВАНИИ

Попов А.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Мозалевская Д.А. – канд. фил. наук, преподаватель

В данной работе исследуется влияние парадигм программирования на мышление разработчика и архитектуру цифровых систем через призму лингвистической гипотезы Сепира-Уорфа. Рассматривается язык программирования не просто как утилитарный инструмент, а как когнитивная среда, задающая онтологические законы. Выявляется антропологический аспект взаимодействия человека и программного кода.

Традиционно языковая система рассматривается исследователями не только как базовое средство коммуникации, но и как фундаментальный инструмент, который напрямую формирует структуру человеческого сознания и способы познания окружающего мира. Проблема взаимосвязи языка, мышления и объективной реальности является одной из ключевых в современной философии. В середине XX века американские исследователи-этнолингвисты Э. Сепир и Б. Ли Уорф, опираясь на глубокие исследования языков коренных народов Северной Америки (в частности, анализируя специфику нелинейного восприятия времени у племени хопи), сформулировали знаменитую гипотезу лингвистической относительности. Согласно данному подходу, грамматическая и семантическая структура естественного языка не просто пассивно отражает существующую реальность, но и активно конструирует ее в сознании говорящего субъекта. Язык выступает в роли своеобразной когнитивной матрицы, которая задает рамки мышления, детерминирует поведение и диктует способы категоризации повседневного опыта [1].

В современной когнитивной науке и философии для четкости методологических границ исследования принято выделять две основные версии гипотезы Сепира-Уорфа: «мягкую» и «строгую». «Мягкая» версия предполагает, что язык оказывает существенное влияние на направленность мышления, однако оставляет субъекту потенциальную возможность выйти за его концептуальные рамки. «Строгая» же версия утверждает, что язык абсолютно и бескомпромиссно определяет все когнитивные процессы: человек в принципе не способен помыслить, осознать или сформулировать то явление, для которого в его родной знаковой системе отсутствуют соответствующие лексические единицы или грамматические конструкции [2].

Долгое время концепция Сепира-Уорфа применялась в гуманитарных науках исключительно к естественным человеческим языкам. При этом «строгая» версия лингвистического детерминизма часто и вполне обоснованно подвергалась критике со стороны исследователей за излишнюю категоричность, поскольку естественная речь обладает гибкостью и позволяет преодолевать понятийные границы. Однако, как отмечает академик В. С. Стёпин, исследуя актуальные проблемы философии науки и техники, в современных условиях тотальной глобальной цифровизации фокус философского осмысления закономерно и неизбежно смещается на языки формальные и искусственные [2]. И именно в этой новой цифровой среде, при непосредственном переходе к языкам программирования, строгая версия гипотезы Сепира-Уорфа лишается некоторых противоречий и обретает более полное воплощение.

Если естественный человеческий язык служит преимущественно для фиксации и описания уже существующей, объективно данной физической реальности, то язык программирования выступает принципиально иным инструментом - средством её непосредственного, демиургического создания. Программист, оперируя синтаксическими конструкциями, не просто передает информацию, а буквально конструирует новые онтологические уровни бытия. Современный философ сознания Д. Чалмерс в своих исследованиях аргументированно доказывает, что виртуальные миры, спроектированные с помощью программного кода, обладают собственной, независимой онтологической полноценностью. Они являются подлинной, структурно сложной, а не просто иллюзорной или вторичной реальностью, поскольку в них присутствуют строгие причинно-следственные связи и реальные объекты взаимодействия [3]. В этой автономной реальности синтаксис и семантика выбранного языка программирования перестают быть просто правилами написания текста и трансформируются в фундаментальные «законы физики» для создаваемой цифровой среды. Именно они определяют границы возможного и невозможного внутри системы, задавая базовую механику взаимодействия виртуальных сущностей так же жестко, как гравитация или термодинамика определяют процессы в материальном мире.

Следовательно, осознанный или вынужденный выбор конкретного языка программирования диктует разработчику не просто алгоритм решения узкой утилитарной задачи, но и саму фундаментальную архитектуру его технического и творческого мышления. Философ Л. Витгенштейн в

своем фундаментальном труде «Логико-философский трактат», исследуя изоморфизм языка и реальности, вывел знаменитый постулат: «Границы моего языка означают границы моего мира» [4]. В контексте современной IT-индустрии этот глубокий философский тезис полностью лишен поэтической метафоричности и работает абсолютно буквально. То, что невозможно или крайне затруднительно выразить средствами конкретного языка программирования ввиду отсутствия в его ядре нужных встроенных абстракций или структур данных, становится невозможным ни помыслить технически, ни эффективно реализовать в рамках создаваемой этим языком программной системы. Разработчик оказывается в строгих когнитивных рамках доступного ему синтаксического инструментария. В этой парадигме программный компилятор выступает не просто как утилитарный транслятор кода в машинные команды, а как строгий эпистемологический фильтр – он становится абсолютной, непреодолимой границей объективно выразимого и, как следствие, границей самого конструируемого виртуального мира.

Наиболее ярко и наглядно действие принципа лингвистической относительности проявляется при глубоком анализе и столкновении различных базовых парадигм программирования. Каждая из таких парадигм предлагает разработчику не просто новый набор технических команд, а свою собственную, уникальную онтологию – полноценное философское учение о бытии конструируемого цифрового мира. В качестве фундаментального примера можно рассмотреть объектно-ориентированное программирование (ООП), реализуемое в таких популярных языках, как C++, Java или C#. Данная парадигма концептуально приучает специалиста воспринимать любую сложную систему и окружающий мир в целом как жестко структурированную иерархию взаимодействующих дискретных сущностей (объектов). Каждый такой объект наделяется автономным внутренним состоянием и заранее определенным набором поведенческих реакций. В рамках этой когнитивной модели на первый план в мышлении неизбежно выходят «существительные» и строгая таксономия (систематизация и классификация). Непрерывная действительность искусственно дробится на атомарные составляющие, а мир предстает как гигантский механистический конструктор – набор деталей и модулей. Подобный подход концептуально отсылает к классической аристотелевской логике и субстанциальной картине мира, где первична сама вещь, а не происходящий с ней процесс.

Диаметрально противоположную картину мира формирует декларативная парадигма функционального программирования, классическими представителями которой выступают языки Haskell, Lisp и F#. В рамках этой математически выверенной концепции фундаментальной основой цифрового бытия становятся не статичные дискретные объекты, а динамические процессы, выступающие в роли смысловых «глаголов». Реальность здесь воспринимается через призму чистых функций и непрерывных трансформаций данных, при которых принципиально не происходит изменения их исходного состояния. Это концептуально отсылает к, так называемой, процессной философии, где фокус внимания смещается с фиксации изолированного сущего на его непрерывное становление. Разработчик, мыслящий абстрактными категориями функционального языка, видит проектируемую систему не как пространственный «склад» автономных объектов, а как направленный, логически детерминированный поток вычислений. Внимание переносится с того, какими сущностями наполнена система, на то, как именно сквозь нее протекают и эволюционируют данные. Именно поэтому переход программиста от одной парадигмы к другой требует не просто механического заучивания нового программного синтаксиса. Он требует полноценной, зачастую сложной перестройки всего когнитивного аппарата - радикального изменения самого способа концептуализации проблемы. Этот интеллектуальный барьер служит блестящим практическим подтверждением гипотезы Сепира-Уорфа: чтобы эффективно созидать на концептуально новом языке, разработчик вынужден научиться совершенно иначе мыслить.

Особый научно-исследовательский интерес для социально-гуманитарных дисциплин представляет антропологический аспект длительного взаимодействия человека и программного кода. В этом контексте искусственный язык выступает не просто как внешняя рабочая среда, а как активный участник когнитивной трансформации субъекта. Выдающийся ученый в области теоретической информатики Э. Дейкстра неоднократно подчеркивал фундаментальную мысль: интеллектуальные инструменты, которые мы выбираем и используем, отнюдь не нейтральны - они оказывают глубокое, подспудное и зачастую необратимое влияние на наши базовые мыслительные привычки [5]. Постоянная, многочасовая аналитическая работа в предельно жестких рамках формальных, математически детерминированных логических систем неизбежно запускает процесс глубокой профессиональной когнитивной адаптации. Человеческое сознание, вынужденное регулярно подстраиваться под бескомпромиссные требования абсолютной однозначности, строгой типизации и алгоритмичности программной среды, начинает постепенно перестраивать собственные внутренние механизмы анализа информации и принятия решений.

Формируется специфический алгоритмический тип мышления. Программист начинает бессознательно переносить логику искусственного языка на повседневную жизнь, социальные взаимодействия и решение бытовых экзистенциальных проблем. Для наглядности можно привести несколько характерных примеров подобного когнитивного переноса. Во-первых, в сфере межличностной

коммуникации: специалист может подсознательно воспринимать диалог как выполнение программной функции, где на валидный «ввод» (логичный, структурированный аргумент) всегда должен следовать строго детерминированный «вывод» (ожидаемая рациональная реакция собеседника). Сталкиваясь с непредсказуемой человеческой эмоциональностью, такое мышление интерпретирует её как «необработанное исключение» (exception) или сбой системы. Во-вторых, в решении банальных повседневных задач часто проявляется склонность к гипероптимизации: например, подсознательное применение алгоритмов поиска кратчайшего пути при планировании маршрута по супермаркету или попытка жестко регламентировать спонтанные личные отношения. Человек, привыкший к строгой типизации, предсказуемости кода и поиску оптимальных паттернов, начинает ожидать аналогичной предсказуемости и рациональности от человеческого общества, которое по своей природе нелинейно и иррационально. Любая неэффективность реального мира начинает восприниматься как системный «баг», требующий немедленного рефакторинга. Это неизбежное столкновение строгой машинной логики с хаотичной человеческой природой зачастую становится причиной экзистенциальных кризисов и социальных фрустраций.

Таким образом, возникает феномен технологической коэволюции. Изначально разработчик создает искусственный язык, чтобы формализовать свои команды и управлять вычислительной машиной. Однако со временем структура, парадигма и ограничения этого языка начинают форматировать сознание самого создателя. Применение гипотезы Сепира-Уорфа к сфере информационных технологий убедительно доказывает, что язык программирования выступает в роли мощного когнитивного фильтра и инструмента конструирования реальности. Осознание этой глубокой лингвистической и онтологической обусловленности является критически важным шагом для современного IT-специалиста, стремящегося сохранить творческую субъектность и широту мышления в условиях тотально алгоритмизированного мира.

Список использованных источников:

1 Уорф, Б. Л. Отношение норм поведения и мышления к языку [Электронный ресурс] / Б. Л. Уорф // Культурология.Ру. – Режим доступа: https://culturolog.ru/content/view/252/9/. – Дата доступа: 10.03.2026.

2 Сепир, Э. Избранные труды по языкознанию и культурологии / Э. Сепир. – М. : Прогресс, 1993. – 656 с.

3 Стёпин, В. С. Философия науки и техники [Электронный ресурс] / В. С. Стёпин // Электронная библиотека e-Reading. – Режим доступа: https://www.e-reading.life/book.php?book=15814. – Дата доступа: 10.03.2026.

4 Чалмерс, Д. Реальность+: виртуальные миры и проблемы философии [Электронный ресурс] / Д. Чалмерс. – Режим доступа: https://totenburg.org/chalmers-realnost-plus-1_-_PREDmaket.pdf. – Дата доступа: 11.03.2026.

5 Витгенштейн, Л. Логико-философский трактат [Электронный ресурс] / Л. Витгенштейн // Онлайн-библиотека Djvu. – Режим доступа: https://djvu.online/file/Rz032Zw3wOjRE. – Дата доступа: 11.03.2026.

6 Макконнелл, С. Совершенный код [Электронный ресурс] / С. Макконнелл // Онлайн-библиотека Djvu. – Режим доступа: https://djvu.online/file/12izBScOYDZZQ. – Дата доступа: 11.03.2026.

7 Дейкстра, Э. Дисциплина программирования / Э. Дейкстра. – М. : Мир, 1978. – 275 с.

СТЕРЕОТИПЫ КАК МЕХАНИЗМ ИНСТИТУЦИОНАЛИЗАЦИИ ГЕНДЕРНОЙ СЕГРЕГАЦИИ В ОБЩЕСТВЕ

Покало К.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

Доклад посвящён проблеме использования стереотипов как инструмента институционализации гендерной сегрегации в обществе. Исследуются причины формирования стереотипов и их влияние на общество. Рассматриваются основные проявления стереотипов как вспомогательного механизма институционализации гендерной сегрегации в обществе.

Внедрение цифровых технологий в повседневную жизнь тесно связано с социальными и культурными переменами. Их влияние обнаруживается во всех элементах современного социума: кризисные процессы в экономике, трансформация института семьи, виртуальное существование индивида. Они обращают людей к моральным основаниям бытия и актуализируют рефлексию. Развивается «новая этика» как форма прикладной, культура алгоритмов и культура отмены проникают всё глубже в общественные установки. «Новая этика» обозначает изменения в области морали, которые получили концентрированное выражение в широких общественных движениях за постколониальное очищение гуманитарных наук и против любой дискриминации [1]. Ответной реакцией на приобретение признания меньшинствами стало распространение обратной дискриминации – дискриминации против членов классов большинства. Социальные противоречия, возникающие по вопросу равноправия, обязуют изучить факторы, которые определяют особенности гендерной сегрегации, механизмов дискриминации, их отношения с институтами, влияющими на представление женщин в условиях одновременного расширенного доступа к знаниям, культурному наследию и информационной отчуждённости, кибербуллинга, онлайн-экстремизма.

Гендерные роли формировались на протяжении всего существования человеческой цивилизации. С момента интенсивного развития патриархальной системы после перехода от кочевого образа жизни к оседлому они нашли отражение в практике разделения труда, обусловленного физическими особенностями и способностями индивидов. Сложившаяся ситуация закрепляла за мужчинами и женщинами чётко определённые функции и социальные статусы. Важную роль в трансляции обозначенных гендерных ролей играли традиции и религия [2].

Постепенное табуирование социально опасных тем и нормализация очищения гуманитарного знания, масштабная огласка проблем меньшинств и, как следствие, развитие новой этики стали возможны во многом благодаря распространению доступа к информационным ресурсам и предоставлению широкой платформы с минимальной цензурой для огласки меньшинствами своей претензии на равные права с социальным большинством. Однако среди людей до сих пор сохраняются стереотипы – ошибочные убеждения о тех или иных социальных группах, их вредности или приносимой ими «угрозе» существующему устройству общества.

Исследования организации экономического сотрудничества и развития (далее – ОЭСР) и Лондонского института образования дают следующее определение гендерным стереотипам: «Гендерные стереотипы – широко распространённые, устоявшиеся, фиксированные и весьма обобщённые убеждения и ожидания, которые люди разделяют в отношении определённой группы.», «Гендерные стереотипы включают в себя приписывание гендеру определённых атрибутов, черт характера и ролей, которые обычно основаны на поле, присвоенном при рождении, и отражают традиционные общественные ожидания в отношении гендера.» [3].

Гендерные стереотипы зачастую воспроизводят закреплённое в обществе мнение о неспособности женщин самостоятельно участвовать в экономической деятельности. Так, имеющиеся данные по разным странам и эпохам дают представление о том, насколько велики различия в структуре и содержании видов деятельности мужчин и женщин [4]. Однако ложные представления о неэффективности женщин в экономической деятельности опровергаются большим количеством научных работ [5].

Проблему декретных отпусков можно использовать как иллюстрацию воздействия стереотипов не только на женщин, но и на мужчин. People Management утверждает следующее: «Отцы, берущие отпуск по уходу за ребёнком, могут столкнуться с насмешками, некоторых из них даже называют “немужественными”» [6]. Тот же источник предоставляет статистику, согласно которой среди опрошенных мужчин 22% опасаются, что отпуск может навредить их карьере. Исследования ОЭСР от 2023 и 2024 г. показывают, что средняя продолжительность короткого оплачиваемого отпуска по уходу за ребёнком среди мужчин составляет 2,4 недели, удлинённого – 10,3 недели, в то время как продолжительность декретного отпуска для матерей составляет 18,5 недель [7, 8]. Вследствие наблюдается увеличение средней продолжительности времени, которую женщины проводят за неоплачиваемой работой, и создание риска потери квалификации.

Согласно Гарвардской бизнес-школе, стереотипы являются причиной, по которой женщины чаще, чем мужчины, игнорируют похвалу и положительные отзывы о своих способностях, недооценивают свои возможности или воздерживаются от выражения собственных мыслей на «мужские темы» [9]. Из-за обесценивания и преград, выставляемых обществом, женщины реже выбирают STEM или высокооплачиваемые специальности и реже добиваются карьерных высот.

Помимо этого, стереотипы затрагивают тему физического и сексуализированного насилия. Людвиг-Максимилианский университет Мюнхена провёл исследования в области виктимблейминга и пришёл к выводу, что жертвам женского пола чаще приписывались обвинения, связанные с их характером (например, стереотипная наивность), чем мужчинам-жертвам, тогда как в случае поведенческого обвинения наблюдалась обратная картина (например, не стереотипное «мужское» поведение и отсутствие ответного удара) [10]. Такое явление мешает борьбе с насилием, поскольку пострадавшие женщины или мужчины не хотят рассказывать о происшествиях из-за возможности столкнуться с общественным осуждением.

Перед рассмотрением гендерных стереотипов через призму институтов, необходимо для начала обозначить определения этого термина. ОЭСР определяет дискриминационные социальные институты как сложную сеть формальных и неформальных законов, социальных норм и практик, которые ограничивают доступ женщин к правам, возможностям их расширения, правосудию и ресурсам, подрывая их самостоятельность и авторитет [11]. Как уже было описано ранее, стереотипы напрямую влияют на восприятие женщин как неэффективных сотрудников на рабочем месте, мешают им двигаться по карьерной лестнице, удерживают от обращения за помощью в случае столкновения с физическим или сексуализированным насилием и ставят их авторитет под сомнение. Стереотипы о женщинах формируют мнение о несамостоятельности женщин и препятствуют расширению их прав. Тем не менее, они не представляют реальный комплекс позиций, ролей, норм и ценностей, а искажают их. Следовательно, стереотипы не являются институтом, однако их можно рассматривать как механизм дискриминационных социальных институтов.

В качестве механизма институционализации гендерной сегрегации стереотипы реализуются в полной мере. Они напрямую влияют на представление полов в сознании социума, способствуя формированию гендерного разрыва во всех сферах человеческой деятельности. Борьба со стереотипами требует комплексного подхода, и в эпоху цифровизации без участия фундаментальных институтов: государства, семьи, экономики, образования, религии – путь общества на пути к равенству станет более труднопреодолимым, а существующие формы дискриминации могут встретить содействие и укрепиться благодаря упрощённой форме распространения гендерных предрассудков как формы дискриминации через цифровые технологии.

Список использованных источников:

1. Гусейнов, А.А.ЧТО НОВОГО В «НОВОЙ ЭТИКЕ»? / А.А. Гусейнов // Ведомости прикладной этики. – 2021. – №58. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/chto-novogo-v-novoy-etike (дата обращения: 11.02.2026) .

2. Покало, К. Гендерное неравенство в условиях цифровизации / К. Покало // Актуальные вопросы экономики и информационных технологий 2025: материалы 61-ой науч. Конф. аспирантов, магистрантов и студентов, г. Минск, 21 апреля 2025 г. / Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники. – Мн., 2025. – С. 534–535.

3. Brussino, O. Gender stereotypes in education: Policies and practices to address gender stereotyping across OECD education systems / O. Brussino, J. McBrien // OECD Education Working Papers. – 2022. – №271. – URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/05/gender-stereotypes-in-education_a6f2df0e/a46ae056-en.pdf (date of access: 13.02.2026).

4. Воронов, А.А. К вопросу о разновидностях трудовой гендерной сегрегации / А.А. Воронов // Вестник РУДН. Серия: Социология.. – 2006. – №2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-raznovidnostyah-trudovoy-gendernoy-segregatsii/viewer (дата обращения: 11.02.2026).

5. Yang, Y. Gender-diverse teams produce more novel and higher-impact scientific ideas / Y. Yang, B. Uzzi [etc.] ; ed.: S. Fiske. – Proceedings of the National Academy of Science. – 2022. – Vol. 119. – DOI: 10.1073/pnas.2200841119.

6. Clemmo, F. 'Inadequate paternity leave impacts families, workplace equality and the strength of our economy,' CEO of Fatherhood Institute says / F. Clemo // People Management. – 2025. – URL: https://www.peoplemanagement.co.uk/article/1936176/inadequate-paternity-leave-impacts-families-workplace-equality-strength-economy-ceo-fatherhood-institute-says (date of access: 13.02.2026).

7. Paid leave for fathers // OECD. – 2025. – URL: https://www.oecd.org/en/publications/paid-leave-for-fathers_07442bed-en/full-report.html (date of access: 13.02.2026).

8. Adema, W. Paid parental leave: Big differences for mothers and fathers / W. Adema, J. Flutchmann, A. Lloyd, V. Patrini // OECD. – 2023. – URL: https://www.oecd.org/en/blogs/2023/01/Paid-parental-leave--Big-differences-for-mothers-and-fathers.html (date of access: 13.02.2026).

9. Gerdeman, D. How Gender Stereotypes Kill a Woman's Self-Confidence / D. Gerdeman, K.B. Coffman // Working Knowledge, Harvard Business School. – 2019. – URL: https://www.library.hbs.edu/working-knowledge/how-gender-stereotypes-less-than-br-greater-than-kill-a-woman-s-less-than-br-greater-than-self-confidence (date of access: 13.02.2026).

10. Witte, L.P. "It's Your Own Fault": Factors Influencing Victim Blaming / L.P. Witte, A. Flechsenhar // Journal of Interpersonal Violence. – 2024. – Vol. 40. – Issue 9–10. – DOI: 10.1177/08862605241270030.

11. Social Institutions and Gender Index (SIGI) // OECD. – URL: https://www.oecd.org/en/about/programmes/social-institutions-and-gender-index-sigi.html (date of access: 13.02.2026).

СЕМАНТИКА КАК КЛЮЧЕВОЙ КОМПОНЕНТ ЛОГИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Гомонов М.А., Малыхин И.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

Работа посвящена применению семантики при проектировании интеллектуальных систем. Рассматриваются проблемы понимания и интерпретации значения понятий. Раскрывается роль семантических сетей при разработке интеллектуальных систем. Показано, как структурирование понятий с помощью семантики помогает искусственному интеллекту лучше понимать наш язык и окружающий мир.

В широком смысле под семантикой подразумевается научная область, предметом изучения которой является значение языковых единиц, их взаимосвязи, а также вопросы контекста и его роли в интерпретации их смысла [1]. Основные принципы семантики используются во время работы с интеллектуальными системами. Интеллектуальная система - понятие, которое чаще всего относится к сфере искусственного интеллекта (далее ИИ), однако изначально предполагает любую систему или программу, которая обладает способностями к решению задач, а также обучению для решения новых типов задач. Сегодня данные системы весьма актуальны в связи с обсуждениями дальнейших перспектив развития ИИ. Одним из главных в данной сфере является вопрос понимания интеллектуальной системой понятий нашего мира, а также взаимосвязей и зависимостей между ними.

Для обоснования целесообразности применения семантики при проектирования интеллектуальных систем рассмотрим пару примеров.

Пример 1. Представим, что наша интеллектуальная система знает несколько понятий: кот, мышь, млекопитающее и тигр. Для каждого человека, обладающего минимальными знаниями о данных понятиях, сразу становится ясно: кошка - млекопитающее, относящееся к отряду кошачьих, которое охотится на мышей, тигр - млекопитающее, также относящееся к отряду кошачьих, но в основном не ведущее охоту на мышей. Однако данный принцип может быть не понятен машине, а также ей могут быть не понятны различия между котом и тигром. Иными словами, можем говорить о том, что задача понимания простейших взаимосвязей между понятиями для интеллектуальной системы является, в описанном случае, почти невозможной. Она воспринимает понятия совершенно отдельными, малосвязанными объектами, что является огромной проблемой в процессе проектирования и дальнейшего поддержания, обновления такой системы.

Пример 2. Хотя, казалось бы, мы не можем видеть перед собой картину, которая записана на том или ином источнике информации в виде текста, символов или рисунков, мы чаще всего без труда можем понять, о чём именно идет речь. Данный принцип легче всего понимается во время изучения нами новых языков. Часто в них отличается грамматика, пунктуация, а также порядок слов, из-за чего при постепенном изучении языка, особенно на первых этапах, мы часто можем понимать слова, которые написаны в предложении, но совершенно не осознавать связь между ними, информацию или образ, который до нас хотели донести. Такая же проблема существует и в информационных системах, где разница между солнцем и значком в наскальном рисунке первобытных людей, изображающем солнце, огромна.

В логике под понятием понимается простейшая форма мысли, в которой отражены наиболее общие существенные признаки предмета. В семантике же подход расширяется и в контексте интеллектуальной системы в одну языковую единицу, называемую далее определением, входит несколько понятий. Лучше всего данный принцип многовекторности можно осознать на примере. Поэтому рассмотрим определение "солнца”. В первую очередь солнце — это физический объект, обладающий какими-то характеристиками, существенными признаками, характерными для него. Далее, само по себе слово солнце также является составной частью, входящей в определение солнца. Кроме того, у нас существует значок, который сам по себе тоже называется солнцем. Ну и дальше, в основном для некоторых особых понятий, будут идти другие характеристики. Стоит отметить, что определение солнца будет включать все эти понятия, в то время как сами по себе они будут оставаться отдельными. Пример более подробно изображён на рисунке 1.

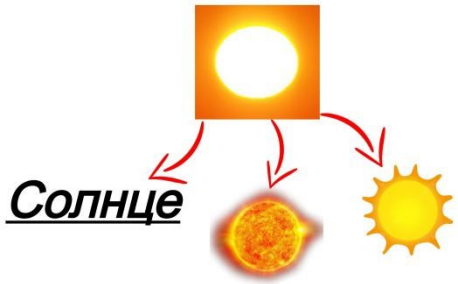


Рисунок 1 – Семантика объекта солнце

Это позволяет нам создать такую связь понятий, которую интеллектуальная система будет воспринимать как более широкий в плане определения объект.

Для разработки интеллектуальной системы также используют семантические сети. Семантическая сеть - вид графа, где вершинами являются понятия или чаще определения, о которых говорилось ранее, а ребрами описываются связи между ними. Пример такой сети приведён на рисунке 2.

Рисунок 2 – Пример семантической сети [2]

Этот же принцип позволяет нам создать связь между определениями, которые были введены ранее. Хотя стоит уточнить, что представленный вид семантической сети - один из простейших. Чаще всего данные сети, в связи с наличием большого количества различных связей между определениями, будут иметь весьма сложную, более многовекторную структуру, включающую сотни или тысячи характеристик, по котором связаны определения.

Таким образом, после реализации этих двух принципов, у нас возникает некоторая связь между определением и понятиями, входящими в него, а также его связями с другими определениями. Часто в контексте данной науки идёт речь о том, что в познающем субъекте возникают семантические связи. В этом случае под познающим субъектом понимается интеллектуальная система. Кроме того, в случае, если семантическая сеть будет достаточно обширной, определения будут иметь достаточное количество входящих в них понятий, а сами понятия будут максимально описывать существенные признаки, то такая система будет обладать возможностью частично или полностью понимать нашу речь, письменность и язык.

Список использованных источников:

1. Семантика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Семантика. – Дата доступа: 18.03.2026.

2. Семантическая сеть [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Семантическая_сеть. – Дата доступа: 18.03.2026.

3. Семантика для гуманитария [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gtmarket.ru/concepts/6933. – Дата доступа: 18.03.2026.

4. Интеллектуальная система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Интеллектуальная_система. – Дата доступа: 18.03.2026.

5. Искусственный интеллект [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный_интеллект. – Дата доступа: 18.03.2026.

6. Интеллектуальная система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/10202/2/ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ%20СИСТЕМЫ.PDF. – Дата доступа: 18.03.2026.

7. Семантическая сеть - перспективная платформа для системы управления знаниями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/semanticheskaya-set-perspektivnaya-platforma-dlya-sistemy-upravleniya-znaniyami/viewer. – Дата доступа: 18.03.2026.

8. Семантические сети как основа моделирования человеческого сознания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/56892/1/Romanchuk_Semanticheskie.pdf. – Дата доступа: 18.03.2026.

ПРОБЛЕМА МОРАЛЬНОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Доманькова В.В., Лащенко Н.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

В работе анализируется проблема моральной ответственности автономных робототехнических систем. На основе классических критериев морального агентства (Кант, Стросон, Сёрл) обосновывается невозможность наделения роботов подлинной моральной ответственностью. Рассматриваются аргументы сторонников функционального подхода (Флориди, Матиас), указывающие на феномен «разрыва ответственности» в условиях эмерджентного поведения нейросетевых алгоритмов. В качестве решения предлагается модель распределённой ответственности между разработчиками, производителями, пользователями и регуляторами.

Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта и робототехники ставит перед современной философией ряд фундаментальных вопросов, среди которых основное место занимает проблема возможности наделения искусственных агентов моральной ответственностью за их действия. Если ранее технические устройства рассматривались исключительно как инструменты в руках человека, то появление автономных систем, способных принимать решения без непосредственного вмешательства существенно размывает традиционную границу между субъектом и объектом действия, вынуждая нас пересматривать устоявшиеся этические категории. В данной работе предпринимается попытка философского анализа условий моральной ответственности и их применимости к робототехническим системам.

В классической этической традиции, восходящей к Аристотелю и получившей развитие в работах Канта, моральная ответственность неразрывно связана с понятием морального сознания, предполагающим наличие у субъекта ряда специфических характеристик. Чтобы индивид мог нести моральную ответственность, ему необходимы: способность быть причиной события, свобода воли, то есть реальная возможность выбора между альтернативными вариантами действий, и понимание последствий своих поступков и наличие осознанных намерений. Кроме того, он должен быть восприимчив к моральным нормам, то есть уметь их понимать и следовать им. Ответственность подразумевает подверженность санкциям: возможность наказания или поощрения имеет смысл лишь в том случае, если субъект способен переживать последствия своих действий – испытывать раскаяние, страдание или удовлетворение. Как подчёркивал Иммануил Кант в «Основах метафизики нравственности», «воля есть способность действовать согласно представлению о законах» [2, с. 172], и именно эта способность ставит разумное существо в особое положение в мире, делая его ответственным за свои поступки. Применительно к современным роботам и системам искусственного интеллекта подавляющее большинство этих критериев остаётся невыполненным: роботы представляют собой детерминированные вычислительные системы, лишённые феноменального сознания, не обладающие подлинными намерениями и неспособные переживать моральные эмоции, что делает проблематичным рассмотрение их в качестве полноценных моральных агентов.

В современной философии техники преобладает точка зрения, согласно которой роботы не могут нести моральную ответственность в строгом смысле этого понятия, и аргументация этой позиции опирается на не

сколько ключевых соображений. Во-первых, роботам недостаёт подлинной интенциональности: как показал Джон Сёрл в своём знаменитом аргументе «Китайская комната», оперирование символами согласно формальным правилам не эквивалентно пониманию их значения. «Никакая чисто синтаксическая операция сама по себе не гарантирует семантического содержания, — пишет Сёрл в работе «Сознание, мозг и наука», – и именно поэтому компьютер, каким бы сложным он ни был, не может обладать подлинной интенциональностью» [5, с. 192].

Во-вторых, моральная ответственность традиционно связана с возможностью возмездия и наказания виновного, однако наказание робота лишено смысла, поскольку машина не способна страдать, и это делает саму концепцию вины применительно к искусственному агенту ошибочной. Как отмечал П. Ф. Стросон в своей программной статье «Свобода и негодование», «человеческие чувства негодования, обиды и благодарности являются центральными для практики моральной ответственности, и эти чувства уместны лишь по отношению к существам, способным участвовать в межличностных реактивных установках». Поскольку робот не способен ни испытывать негодование, ни становиться объектом подобных чувств в подлинном смысле, его включение в сферу моральной ответственности оказывается неправомерным.

В-третьих, робот, будучи творением человека, всегда будет лишь средством, а не самостоятельным субъектом. Его действия – это продолжение воли и решений его создателей и пользователей. Перекладывание вины на машину – это опасная тенденция, которая позволяет людям

дистанцироваться от своих этических обязательств. Мы можем назвать это «моральной буферизацией», когда технология становится удобным оправданием для избегания личной ответственности.

Тем не менее, ряд современных исследователей, среди которых Л. Флориди, А. Матиас и Дж. Данэхер, предлагают пересмотреть традиционные критерии морального сознания в контексте развития автономных технологий, выдвигая аргументы в пользу функционального подхода к моральной ответственности роботов. Сторонники этой позиции указывают на то, что современные нейросетевые алгоритмы часто функционируют как «чёрные ящики», поведение которых возникает в процессе машинного обучения и не может быть полностью предсказано или детерминировано разработчиками, что порождает феномен «разрыва ответственности» – ситуации, когда вред причинён автономной системой, но ни один из человеческих участников процесса не может быть признан виновным в силу отсутствия прямого контроля или предвидения. Как констатирует Андреас Матиас в статье «Задача ответственности для автономных систем», «чем более автономной становится система, тем сложнее приписать её действия какому-либо конкретному человеку, и в предельном случае мы сталкиваемся с ситуацией, когда моральная ответственность буквально растворяется в технологической сложности» [4, с. 179]. В таких условиях автономность робота становится функциональной реальностью, требующей наделения его моральным статусом не в онтологическом, а в прагматическом и юридическом смысле. Лучано Флориди, предлагая концепцию «информационной этики», вводит понятие «распределённой моральной ответственности», утверждая, что «в эпоху гиперсвязанных систем моральные агенты должны пониматься не как изолированные субъекты, а как узлы в сетях взаимодействий, где ответственность распределяется между людьми и технологическими артефактами» [1, с. 214]. Такой подход не утверждает, что роботы обладают сознанием или свободой воли, но предполагает, что для целей регулирования, определение ответственности и защиты прав пострадавших будет целесообразно рассматривать определённые классы автономных систем как ограниченных моральных агентов, способных нести функциональную ответственность в рамках специально разработанной нормативной базы.

Однако даже при условии принятия функционального подхода, остаётся открытым вопрос о том, как именно должна быть организована система ответственности в отношении робототехнических систем. Наиболее перспективной является модель распределённой ответственности, согласно которой моральная и юридическая ответственность за действия автономного робота распределяется между различными участниками технологического цикла: разработчиками, производителями, пользователями и регуляторами. Это позволяет избежать несправедливого возложения вины на неодушевленный объект, неспособный к моральному осмыслению, и одновременно не освобождает от ответственности людей, чьи решения и действия определяют поведение робота.

На текущем этапе технологического развития роботы и системы искусственного интеллекта не обладают статусом полноценных моральных субъектов. Это обусловлено их неспособностью к осознанию, свободе воли и переживанию моральных последствий. Быстрое развитие автономных технологий порождает серьезные этические и правовые проблемы, требующие разработки новых подходов и правил. Функциональный подход к моральной ответственности, сочетающийся с моделью распределённой ответственности между человеческими участниками технологического процесса, представляется наиболее сбалансированным решением, позволяющим обеспечить защиту прав пострадавших, стимулировать ответственное развитие технологий и сохранить моральную значимость человеческого выбора в эпоху искусственного интеллекта. Как справедливо замечает Ханна Арендт в работе «О насилии», «ответственность – это плата, которую человеческая свобода платит за свою способность начинать нечто новое в мире» [3, с. 87].

Список использованных источников:

1. Floridi L. The Ethics of Information / Luciano Floridi. — Oxford : Oxford University Press, 2013. — 357 p.

2. Кант И. Основы метафизики нравственности / Иммануил Кант ; пер. с нем. Л. Д. Брагиной // Кант И. Сочинения : в 8 т. — Москва : Чоро, 1994. — Т. 4. — С. 153–246.

3. Арендт Х. О насилии / Ханна Арендт ; пер. с англ. Г. М. Дашевского. — Москва : Новое издательство, 2014. — 148 с.

4. Matthias A. The Responsibility Gap: Ascribing Responsibility for the Actions of Learning Automata / Andreas Matthias // Ethics and Information Technology. — 2004. — Vol. 6, no. 3. — P. 175–183.

5. Сёрл Дж. Сознание, мозг и наука / Джон Сёрл ; пер. с англ. А. Ф. Грязнова // Путь. — 1993. — № 4. — С. 185–206.

ЧТО «ЧУВСТВУЕТ» ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ?

Пометько Д.И., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Гуринович С.В. – преподаватель

В статье рассматривается вопрос о способности искусственного интеллекта к чувствованию. На основе философского разграничения понятий «сознание» и «интеллект», психологического анализа эмоций и чувств обосновывается вывод о том, что современный искусственный интеллект лишён субъективной реальности и способен лишь имитировать внешние проявления эмоциональных состояний.

Чтобы корректно подойти к рассмотрению вопроса, необходимо прежде всего обратиться к фундаментальному разграничению понятий «сознание» и «интеллект». В классической философии и обыденном представлении эти понятия часто смешиваются, однако современный философский анализ предлагает их четкое разграничение. Интеллект (лат. intellectus — ум, рассудок) — это разум, способность мыслить, проницательность, совокупность умственных функций (сравнения, абстракции, образования понятий, суждения, заключения и т. д.), которые превращают восприятие в знания или критически пересматривают и анализируют уже имеющиеся знания. Сознание же заключается в способности человека как социального существа отражать и познавать объективный и субъективный мир в форме идеальных образов. Сознание характеризуется многоуровневой структурой, включающей различные формы индивидуального и общественного сознания, сознательного и бессознательного, чувственного и рационального.

Технологии с интеллектом не зависят напрямую от внешних воздействий благодаря программе, они могут выполнять сложнейшие операции со знаками, но у них нет «первого взгляда» на предмет, нет непроизвольного схватывания смысла, которое предшествует логическому анализу. Человек мыслит, придавая смысл бессмысленному, тогда как машина занимается комбинаторикой уже известного знания, «возней со знаками», не проникая в смысловое содержание и контекст использования [1, с. 22]. Следовательно, машина может быть интеллектуальной, но она лишена сознания, а значит, и субъективной реальности, то есть непосредственного переживания опыта от первого лица, в которой только и возможно чувствование.

Несмотря на широкое распространение технологий, в науке сохраняется «туманность определений» касательно того, что считать искусственным интеллектом. Так, в официальных документах он определяется прагматично: как комплекс технологических решений, позволяющих имитировать познавательные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека [2, с. 34]. Фундаментальное отличие машины от живого организма кроется в алгоритмической природе её «мышления»: если для задачи найден алгоритм, она перестает считаться интеллектуальной в высоком смысле, а история искусственного интеллекта — это, по сути, поиск мета-алгоритмов, способных находить решения для конкретных задач [3, с. 103].

Современная ситуация характеризуется стремительным развитием цифровых технологий, которые все чаще претендуют на выполнение функций, ранее считавшихся прерогативой человека. В программных документах и научной аналитике отмечается, что технологии искусственного интеллекта и нейросети становятся все более распространенными и востребованными, переходя из разряда перспективных научных разработок в сферу повседневной практики [4, с. 73]. Важно отметить, что в английском языке термин artificial intelligence не несет той антропоморфной окраски, которую он приобрел в русском переводе, где слово «интеллект» прочно ассоциируется с человеческим разумом и духовностью [2, с. 32].

Человеческое ощущение — это не просто регистрация сигнала, а психофизиологический процесс трансформации внешней энергии в факт сознания. Искусственные системы обладают сенсорами, функционально аналогичными рецепторам, однако в технической системе происходит лишь преобразование физического воздействия в электрический сигнал и его цифровая обработка, лишенная субъективного компонента переживания [5, с. 45]. Теория воплощенного познания (embodied cognition) подчеркивает, что познавательные и эмоциональные процессы неразрывно связаны с телесностью [6, с. 80]. Эмоция — это не просто информационный ярлык, это телесное событие, включающее физиологические изменения. Искусственный интеллект, не обладающий биологическим телом, кожей и мышечным чувством (ощущением положения тела в пространстве), лишен самой основы для возникновения чувств [6, с. 85]. Сенсорный и эмоциональный опыт представлен символически и отделен от тела, что является упрощением реальных психических процессов. Машина может владеть символом «боль», но не может симулировать боль в отсутствии нервной системы, способной к страданию.

Тем не менее, технологии достигли высокого уровня в имитации эмпатии. Уже сейчас существуют экспертные системы, чат-боты и приложения, которые успешно используются в сфере

психологической помощи и психотерапии. Искусственный интеллект способен анализировать большие объемы данных о поведении пользователя, распознавать маркеры депрессии или тревоги в речи и мимике, и генерировать ответы, которые воспринимаются как поддерживающие и эмпатичные [7, с. 73]. Роботы применяются в терапии детей с аутизмом, помогая им развивать социальные навыки и учиться распознавать эмоции. В этих случаях технология выступает как сложный инструмент, который имитирует внешние проявления эмпатии: робот может сделать грустное лицо в ответ на грустную историю, но за этой мимикой не стоит внутреннего переживания печали. Это функциональная имитация, основанная на алгоритмах распознавания паттернов и правилах реагирования. Такая имитация порождает парадоксальную ситуацию: машина не чувствует, но человек, взаимодействующий с ней, может испытывать по отношению к машине вполне реальные чувства и приписывать ей человеческие качества. Это явление антропоморфизации (приписывания машине человеческих свойств) активно используется разработчиками для создания иллюзии общения [7, с. 63]. Однако, как отмечают философы, машина лишь «возится со знаками», оперируя их формальными свойствами, но не понимая их смысла. Она не выводит предмет из потаенного, как это делает человеческое мышление, а занимается комбинаторикой уже известного.

В заключении необходимо отметить, что на сегодняшний день и в обозримой перспективе искусственный интеллект не может чувствовать в том смысле, который вкладывает в это понятие психология человека. У него нет биологического тела, необходимого для воплощенного познания, нет основы эмоций, нет сознания как субъективной реальности и переживания себя во времени. Искусственный интеллект — это мощный интеллектуальный инструмент, способный к высокоточной имитации когнитивных и даже эмоциональных функций, но лишенный внутреннего мира. Имитация эмпатии не должна вводить нас в заблуждение относительно онтологической природы машины. Наделение искусственного интеллекта субъектностью является «фетишем», который ведет к размыванию ответственности человека и разрушению сложившейся законодательной практики. Наиболее адекватным подходом является представление искусственного интеллекта не как субъекта, а как агента, наделенного набором функциональных качеств, таких как целеустремленность и элементы социальности, но действующего под контролем человека [7, с. 58]. Развитие искусственного интеллекта несет в себе серьезные нравственные вызовы, связанные с проблемой уникальности с возможностью превращения личности в объект для манипуляций (Постчеловек).

Список использованных источников:

1. Гиренок Ф. И. Почему сознание — это не интеллект? // Вестник Московского университета. Серия 7. Философия. — 2023. — Т. 47, № 2. — С. 19–32.

2. Агеев А. И. Искусственный интеллект: туманность определений в неопределённости реалий // Философские науки. — 2022. — Т. 65, № 1. — С. 27–43.

3. Радченко А. Д. Использование искусственного интеллекта в психотерапии // Материалы конференции. — Минск: БГУИР. — С. 1–2.

4. Шершнёва Т. В. Психология: пособие. — Минск: БНТУ, 2021. — Ч. 1. — 208 с.

5. Шиллер А. В. Роль теорий воплощённого познания в исследованиях и моделировании эмоций // Философские науки. — 2019. — Т. 62, № 5. — С. 124–138.

6. Шиллер А. В., Петруня О. Э. Архитектурный подход к созданию эмоциональных интеллектуальных систем // Философские науки. — 2021. — Т. 64, № 1. — С. 102–115

7. Дубровский Д. И., Ефимов А. Р., Лепский В. Е., Славин Б. Б. Фетиш искусственного интеллекта // Философские науки. — 2022. — Т. 65, № 1. — С. 44–71.

ПЕРСПЕКТИВЫ И РИСКИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Говор Г.Г., Мухомедзянов Е.С., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Бархатков А.И. – канд. фил. наук, доцент

В работе цифровизация образовательного процесса рассматривается как современный этап развития образования. Выделены основные перспективы внедрения цифровых технологий, а также проанализированы ключевые риски, которые необходимо учитывать при проектировании и использовании цифровой образовательной среды.

Введение. Цифровизация образования за последние годы превратилась из дополнительного направления модернизации в один из ключевых факторов развития всей образовательной системы. Распространение онлайн-платформ, систем управления обучением, цифровых ресурсов, аналитики данных и инструментов искусственного интеллекта изменило не только способы передачи знаний, но и само понимание того, как организуется учебный процесс.

Вместе с тем цифровизация не может рассматриваться как безусловное благо. Она открывает серьезные перспективы: расширение доступа к обучению, гибкость образовательных траекторий, персонализацию, ускорение обратной связи, – одновременно усиливает и ряд рисков: неравенство доступа к технологиям, снижение качества коммуникации, зависимость от платформ, проблемы академической добросовестности, конфиденциальности данных и педагогической обоснованности решений. Поэтому обсуждение цифровизации образования сегодня связано не столько с вопросом о внедрении технологий как таковых, сколько с вопросом об условиях их ответственного и действительно полезного применения. Цель данной работы – рассмотреть цифровизацию образовательного процесса как современный этап развития образования, выделить ее основные перспективы и показать ключевые риски, которые необходимо учитывать при проектировании цифровой образовательной среды.

Цифровизация образования как современный этап развития образовательной системы. Под цифровизацией образовательного процесса обычно понимают не простую замену бумажных материалов электронными и не механический перенос традиционного занятия в онлайн-среду. Речь идет о более глубоком преобразовании структуры образования: каналов коммуникации, форм представления знаний, способов контроля, управления учебными данными и роли участников образовательного процесса. В систематическом обзоре Л. М. К. Бенавидес и соавторов цифровая трансформация рассматривается как комплексное изменение деятельности образовательных организаций, затрагивающее инфраструктуру, управление, педагогические практики и культуру учреждения в целом [1].

Такой подход особенно важен потому, что в реальной практике часто смешиваются понятия «оцифровка», «дистанционное обучение» и «цифровая трансформация». Однако наличие электронного журнала, LMS-платформы или видеоконференций само по себе еще не означает, что образование стало качественно иным. Как показывает обзор С. Тимотеу и соавторов, устойчивый эффект цифровых технологий возникает лишь тогда, когда вместе с техникой развиваются цифровая компетентность педагогов и обучающихся, организационная поддержка, школьная или университетская политика, а также понятные педагогические цели использования технологий [2]. Следовательно, цифровизация – это не только техническое оснащение, но и перестройка образовательной логики.

Опыт массового перехода в онлайн подтвердил эту мысль. С одной стороны, цифровая среда доказала свою незаменимость в кризисной ситуации: она позволила сохранить учебный процесс, контакт преподавателя со студентами и доступ к материалам. С другой стороны, тот же опыт показал, что экстренный переход в онлайн не тождествен полноценной цифровой трансформации. Во многих случаях преподавание просто переносилось на платформы видеосвязи без существенной переработки методики, из-за чего возрастали перегрузка, усталость и формальность участия. Поэтому современный этап развития образования можно определить как переходный: технологии уже стали его естественной частью, но качество цифровизации все еще зависит от того, насколько осмысленно они встроены в учебный процесс.

Перспективы внедрения цифровых технологий в образовательный процесс. Главная перспектива цифровизации состоит в расширении возможностей самого образования. Прежде всего речь идет о гибкости. Онлайн-курсы, цифровые платформы и смешанные форматы дают студенту и преподавателю большую свободу в распределении времени, повторении материала, доступе к ресурсам и организации самостоятельной работы. В систематическом обзоре В. Мэн и соавторов подчеркивается, что эффективность онлайн-обучения во многом связана именно с такими факторами, как удобство, доступность и гибкость, хотя эти преимущества проявляются не автоматически, а при наличии продуманного дизайна курса [3].

Важной перспективой является и персонализация обучения. Цифровые системы позволяют учитывать темп работы обучающегося, его дефициты, историю ошибок и интересы. На этой основе можно строить адаптивные задания, рекомендовать материалы, быстрее давать обратную связь и точнее отслеживать учебный прогресс. Обзор исследований по искусственному интеллекту в высшем образовании показывает, что значительная часть таких решений связана с прогнозированием, оцениванием, интеллектуальными обучающими системами и адаптацией учебного контента [4].

Не менее значима перспектива изменения роли преподавателя. Цифровые сервисы и ИИ могут автоматизировать часть рутинной нагрузки: первичную проверку заданий, сортировку типовых ошибок, подготовку черновых материалов, организацию расписания, поиск ресурсов. Это создает условия для того, чтобы преподаватель больше времени уделял сложным видам работы – обсуждению, наставничеству, развитию критического мышления, проектной деятельности и индивидуальному сопровождению.

Риски и проблемы цифровизации образования. Однако перспективы цифровизации не отменяют ее серьезных рисков. Один из наиболее очевидных – усиление образовательного неравенства. Доступ к устройствам, качественному интернету, тихому рабочему пространству и современной платформенной среде распределен неравномерно. В обзорах, посвященных онлайн-обучению и цифровой трансформации, инфраструктурные ограничения и различия домашних условий оказываются среди факторов, которые снижают образовательный эффект цифровых решений.

Второй риск связан с качеством учебного взаимодействия. Образование не сводится к передаче информации: оно строится на диалоге, совместном обсуждении, эмоциональной включенности, неформальной поддержке и участии в академическом сообществе. При неудачной цифровой организации эти элементы ослабевают. Исследования показывают, что в онлайн-среде особенно остро проявляются проблемы мотивации, саморегуляции, чувства изоляции и цифровой усталости. Следовательно, цифровизация становится риском тогда, когда коммуникация подменяется только техническим каналом, а педагогическая среда перестает быть социальной.

Отдельную группу рисков образуют проблемы, возникающие при использовании искусственного интеллекта. С одной стороны, ИИ способен усиливать персонализацию и ускорять обратную связь. С другой стороны, он ставит вопросы о прозрачности алгоритмов, надежности автоматически генерируемого содержания, предвзятости моделей, защите персональных данных и границах допустимой автоматизации оценки. Метасистематический обзор М. Бонда и соавторов прямо указывает на необходимость большего внимания к этике, междисциплинарному сотрудничеству и методологической строгости при внедрении ИИ в высшее образование [5]. Иначе цифровизация может привести не к повышению качества образования, а к росту непрозрачности и управленческой зависимости от технологических платформ.

Наконец, существует риск технократического подхода, при котором сама технология начинает восприниматься как показатель прогресса. В такой логике образовательные учреждения оценивают не качество понимания, критичность мышления или глубину усвоения материала, а количество используемых сервисов, цифровых следов и формально зафиксированной активности. Поэтому главная проблема цифровизации заключается не в присутствии технологий, а в возможности подменить образовательные цели технологическими.

Заключение. Таким образом, цифровизация образовательного процесса является закономерным этапом развития современного образования, но ее значение нельзя сводить к простой технической модернизации. В то же время ее положительный эффект не гарантирован автоматически и зависит от педагогического дизайна, уровня цифровой компетентности, качества инфраструктуры, управленческих решений и этических ограничений.

Будущее цифрового образования, вероятнее всего, связано не с полной заменой традиционного обучения, а с формированием гибридной модели, в которой технологии усиливают человеческое измерение образования, а не вытесняют его. Перспективной можно считать такую цифровизацию, которая делает образование доступнее, точнее и вариативнее, но сохраняет ведущую роль педагога, живого взаимодействия и ответственности за качество содержания. Иначе говоря, цифровая трансформация будет успешной только тогда, когда в центре останется не платформа, а человек и его развитие.

Список использованных источников:

1. Benavides L. M. C. Digital Transformation in Higher Education Institutions: A Systematic Literature Review. [Электронный ресурс] // www.mdpi.com. – URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3291 (дата обращения: 09.03.2026).

2. Timotheou S. Impacts of digital technologies on education and factors influencing schools' digital capacity and transformation: A literature review. [Электронный ресурс] // link.springer.com. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10639-022-11431-8 (дата обращения: 09.03.2026).

3. Meng W. A systematic review of the effectiveness of online learning in higher education during the COVID-19 pandemic period. [Электронный ресурс] // link.springer.com. – URL: https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2023.1334153/full (дата обращения: 09.03.2026).

4. Zawacki-Richter O. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? [Электронный ресурс] // link.springer.com. – URL: https://link.springer.com/article/10.1186/s41239-019 0171-0 (дата обращения: 09.03.2026).

5. Bond M. Emergency remote teaching in higher education: mapping the first global online semester. [Электронный ресурс] // link.springer.com. – URL: https://link.springer.com/article/10.1186/s41239-021-00282-x (дата обращения: 09.03.2026).

ПРОБЛЕМА АНТРОПОГЕНЕЗА: ОЧЕВИДНОЕ-НЕВЕРОЯТНОЕ

Дорошкевич В. Д., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Гуринович С. В. – преподаватель

Объект философского дискурса – альтернативная уфологическая концепция антропогенеза, её историческое развитие от идей Ренессанса до наших дней. Обзор известных очевидных артефактов представлен в новых невероятных интерпретациях. Автор придерживается мысли о том, что данная концепция носит характер гипотетического вероятностного знания.

Проблема антропогенеза (от греч. anthropos – человек, genesis – происхождение) представляет собой фундаментальную проблему в философской антропологии. Основными версиями происхождения человека являются креационизм, рассматривающий человека как божественное творение, и трудовая теория (работы Ч. Дарвина и Ф. Энгельса), объясняющая появление человека результатом естественного отбора и решающей роли трудовой деятельности. Несмотря на приоритет трудовой концепции в современной науке, в философии существует ряд альтернативных подходов. Среди них особое место занимают игровая (Й. Хёйзинг), психоаналитическая (З. Фрейд) и семиотическая (К. Леви-Стросс) концепции. Многообразие версий антропогенеза объясняется как сложностью феномена человека, так и невозможностью реконструкции отдалённого прошлого человеческой истории и соответствующих артефактов. Особый интерес представляет уфологическая концепция антропогенеза, рассматриваемая как современная модификация креационизма и связывающая возникновение человека с вмешательством внеземного разума [1].

Тема множественности миров входит в культурное сознание эпохи Ренессанса и свободно обсуждается в философии, литературе и научном сообществе. Философ Джордано Бруно (1548-1600), опираясь на труды кардинала и мыслителя Николая Кузанского (1401-1464), выдвинул смелое предположение о бесконечной Вселенной, населенной различными существами. Если Кузанский допускал множественность миров лишь гипотетически, утверждая беспредельность космоса, то Бруно трансформировал эту идею в космологическую доктрину, заявив, что звезды – это солнца, окруженные обитаемыми планетами. Впоследствии уверенность в том, что космос плотно населен, только возрастала. Переход к современной трактовке начался в XIX веке, когда французский ученый-популяризатор Камиль Фламмарион в 1862 году первым отождествил древних богов с пришельцами [2]. Основоположник теоретической космонавтики, советский учёный К. Э. Циолковский в 1928 году в рамках «космической философии» постулировал иерархию разумных сил во Вселенной, где более совершенные цивилизации этически обязаны курировать развитие «младших» миров, что заложило базу под развитие теории палеоконтакта [3]. Советский естествоиспытатель, академик, мыслитель, основоположник биогеохимии В. И. Вернадский (1863-1945) подчеркивал, что научная мысль всегда развивается в определенной философской среде. Он решительно возражал против узкого понимания эволюции как чисто земного процесса [4]. Несмотря на то, что Вернадский критически относился к гипотезам без достаточных эмпирических данных, его подход легитимизировал постановку вопроса о внеземных корнях жизни в качестве научной задачи.

Собственно, внутреннее содержание исторических этапов формирования уфологических концептов позволяет выделить в них два направления – естественнонаучное и мифо-религиозное, которые продолжают независимо сосуществовать и в наше время [5]. Важную роль в накоплении фактологической базы сыграл американский журналист Чарльз Форд, собравший сотни свидетельств о сверхъестественных и о необъяснимых явлениях [6]. Позже, в 1983 году, швейцарский писатель Эрих фон Дэникен в своих трудах описал теорию палеоконтакта в своих трудах [7].

Среди аномальных технологических артефактов выделяется Багдадская батарея (II в. до н.э. – IV в. н.э.) – глиняный сосуд с медным цилиндром и железным стержнем, дающий около 1 В с электролитом, интерпретируется как знание электричества; антикитерский механизм (ок. 205 – 150 гг. до н.э.) – бронзовый аналоговый компьютер для расчета позиций Солнца, Луны и планет, предсказания затмений; его сложность не имеет аналогов до XIV в.; деревянная «Птица Сакара» (Египет) и золотые фигурки Кимбайя (Колумбия), напоминающие самолёты или планеры.

Геоглифы Наска (300 г. до н.э. – 800 г. н.э.) – это гигантские изображения, нанесённые на поверхность пустыни Наска в южном Перу, занимающие площадь около 450–500 км². Они состоят из прямых линий до 80 км, без отклонений, несмотря на рельеф местности, изображают животных (паук, колибри, обезьяна), фигуру «астронавта». Созданы удалением верхнего слоя почвы и видны только с воздуха. Требовали точных расчётов и координации. Интерпретируются как посадочные полосы или астрономические карты; традиционно связывают с ритуалами вызова дождя. В 2019 – 2024 годах с помощью ИИ и дронов обнаружено более 300 новых геоглифов, включая антропоморфные и с оружием (например, косатка с ножом).

Пирамиды Гизы (Египет, ок. 2580 – 2565 гг. до н.э.) ориентированы по сторонам света с погрешностью менее 5 угловых минут; периметр основания к удвоенной высоте даёт число «пи», соотношения близки к золотому сечению. Великая пирамида Хеопса – 2,3 млн блоков по 2,5-80 т, идеальная подгонка, стабильная температура +20°C внутри. Точность ориентации (на Северный полюс), математические константы и вес (эквивалент 700 Эйфелевых башен) якобы невозможны для бронзового века. В 2017 году мюонная томография выявила скрытые полости. Пума-Пунку – часть комплекса Тиуанако (ок. 500 – 1000 гг. н.э.), расположенного в Боливии на высоте 3800 м, содержит мегалиты из андезита (твёрдость 7 по Моосу) и диорита с миллиметровыми прямыми углами, Т-образными пазами, сверлениями и шлифовкой, напоминающими лазерную или машинную обработку; блоки до 440 т соединены без раствора. Научные исследования указывают на возможное использование геополимерного бетона. Саксайуаман (Перу, ок. 1100 – 1500 гг. н.э.) – стены из блоков до 200 т с подгонкой до 0,1 мм без раствора, зигзагообразные. Мифы упоминают «размягчение» камней звуком. Стоунхендж (Англия, 3000 – 2000 гг. до н.э.) – мегалиты до 30 т, перевезённые на 240 км, астрономическая ориентация на солнцестояния. Моаи острова Пасхи (1250 – 1500 гг. н.э.) – 887 статуй до 75 т, перемещённых на 18 км.

Наскальные рисунки включают Валь-Камоника (Италия, 10 000 – 1000 гг. до н.э.): 300 000 петроглифов, включая "астронавтов" в шлемах, догу (Япония, 14 000 – 300 гг. до н.э.) с «очками» и костюмами, напоминающими скафандры, вонджина (Австралия) с овалами вокруг головы, как шлемы, петроглифы хопи/зуни (США) с «звёздными людьми». Иероглифы Абидоса (Египет, храм Сети I, ок. 1290 г. до н.э.), обнаруженные в 1848 году, изображают формы, напоминающие вертолёт, самолёт, подводную лодку и танк.

Племя догонов (Мали) стало известно благодаря исследованиям французских этнографов М. Гриоля и Ж. Детерлен (1930–1950-е гг.), которые описали мифологию догонов, включающую сведения о звезде Сириус, её невидимом спутнике Сириус В (в мифе – «По толо»), высокой плотности этой звезды и 50-летнем цикле её обращения. Результаты были представлены в статье «Суданская система Сириуса» (1951) и в издании Института этнологии в Париже «Бледный Лис: космогонический миф» (1965). Шумеры создали развитую астрономическую систему около 3500-3000 гг. до н.э., интегрированную в религию, сельское хозяйство. Они разработали лунно-солнечный календарь с 12 месяцами и високосными вставками, использовали водяные часы и гномоны для измерения времени. Сторонники уфологической концепции считают, что высокий уровень астрономических знаний шумеров, включая понимание циклов и сложных небесных явлений, не мог быть достигнут самостоятельно и является следствием контакта с более развитой цивилизацией.

В период между 1880 и 1947 годами на полуострове Паракас в Перу было раскопано несколько сотен мумифицированных тел из мест захоронений. Все найденные останки демонстрировали уменьшенный рост и сильное удлинение черепа, что заставило многих антропологов и археологов задаться вопросом о генетическом происхождении того, что в просторечии называют «мумии с конусообразными головами». Окончательное комплексное исследование их генетической природы стало возможным лишь в 2022 году, результаты которого исключили наличие какой-либо «нечеловеческой» ДНК в образцах [8]. В андских культурах форма головы могла выступать маркером «божественной» природы правителя, приближая его облик к иконографическим изображениям мифических существ или предков [9]. Распространённость практики искусственной деформации черепа в культуре Паракас, по мнению ряда антропологов, может объясняться стремлением подражать, однако специалисты пока воздерживаются от конкретизации возможного объекта для подражания.

В приведенных примерах отчетливо видно, что соединение всегда происходит на рубеже мировоззренческих парадигм: научной и эзотерической, мифологической и религиозной. Отношение ученых к возможному внеземному происхождению человека осторожное. Дело в определенной теоретической незавершенности этих гипотез. Объясняя человеческий интеллект внеземным разумом, проблема возникновения разума как такового не столько разрешается, сколько отодвигается, заставляя искать ее в новых, не известных пока фактах. Именно развитие технологий открывает новые перспективы для формулировки и проверки этих гипотез. Современные методы исследования – от генетического анализа до возможностей искусственного интеллекта в обработке данных – предоставляют инструменты для верификации давно существующих гипотез.

Список использованных источников:

1. Хомич, Е. В. Проблема антропогенеза в философии / Е. В. Хомич, Я. С. Яскевич // Философия : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В. С. Стёпин [и др.] ; под общ. ред. Я. С. Яскевич. – 3-е изд. – Минск : РИВШ, 2008. – С. 361-367.

2. Фламмарион, К. Многочисленность обитаемых миров. Очерк жизненных условий обитателей других планет / К. Фламмарион. – М., 1908. – С. 239

3. Циолковский, К. Э. Воля Вселенной. Неизвестные разумные силы / К. Э. Циолковский. – Калуга, 1928. – С. 5.

4. Яншина, Ф. Т. В. И. Вернадский о философии и ее значении в развитии науки / Ф. Т. Яншина // Космическое мировоззрение – новое мышление XXI века. – 2004. – Т. 3, № 3. – С. 158–172.

5. Фадеев, А. Ю. Теория концептуальной интеграции в рамках изучения культовой среды общества на примере уфологии / А. Ю. Фадеев // Труды Саратовской православной духовной семинарии. – 2024. – № 4(27). – С. 11–28.

6. Форд, Ч. 1001 забытое чудо. Книга проклятых / Ч. Форд. – СПб.: Лань, 1997. – 384 с.

7. Дэникен, Э., фон. Воспоминания о будущем: послания и сигналы Вселенной / Э. фон Дэнике; пер. С. Головой, А. Голова. – М.: Эксмо, 2004. – 310 с.

8. Thornton, J. E. Raman Spectroscopy and STR Analysis of the Elongated Skulls from the Paracas Mummies of Peru / J. E. Thornton, B. N. Johnson, B. R. Smith, K. N. Jones, K. M. Richards, J. T. McClintock // Journal of Biotechnology & Bioinformatics Research. – 2022. – Vol. 4, № 4. – P. 1–8. – DOI: 10.47363/JBBR/2022(4)155.

9. Blau, S. Artificial Cranial Modification: A Multi-Regional Perspective / S. Blau // The Oxford Handbook of the Archaeology of Childhood / [ed. by Crawford, S., Hadley, D. M. & Shepherd]. – Oxford: Oxford University Press, 2018. – P. 784

СОХРАНЕНИЕ ЛИЧНОСТНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ

Горбель А. А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Миськевич В. И. – канд. фил. наук, доцент

Работа посвящена философскому анализу трансформации идентичности в условиях нейроинтеграции. Сопоставлены позиции технооптимизма и биоконсерватизма на примере актуальных технологий. Выявлены ключевые угрозы субъектности: эрозия агентности и нарушение нейроприватности. Обоснован критерий онтологической автономии: маркером сохранения «Я» выступает способность к осознанному мониторингу и волевому прерыванию работы интерфейса. На его основе сформулированы пять принципов нейроправа, определяющие этические границы киборгизации.

Развитие нейротехнологий в *XXI* веке привело к принципиальному переходу от исключительно медицинских приложений, ориентированных на реабилитацию, к когнитивному расширению способностей человека. Исключительная актуальность и важность данной проблемы в наше время обусловлены тем, что такие технологии, как микроэлектродные имплантаты *Neuralink* [1], умные контактные линзы (*Smart Contact Lenses*) и генная инженерия *CRISPR*, прямо сейчас переходят из стадии лабораторных испытаний в массовое производство. В ближайшем будущем первые абсолютно здоровые люди получат нейроимплантаты не для лечения заболеваний, а для целенаправленного расширения своих физических и интеллектуальных возможностей. Этот качественный скачок порождает фундаментальные этико-философские вопросы, касающиеся человеческой идентичности и субъективности, поскольку речь идет о переходе к прямой модификации человеческой природы.

Объект исследования в данной работе является процесс интеграции технических устройств в биологическую структуру мозга человека и его когнитивные системы [2].

Целью данной работы является разработка критериев онтологической автономии как основы для разграничения человеческого и технического в гибридных системах, что позволит отличить допустимые трансформации от опасных и необратимых потерь сущностно человеческих качеств.

История человеческого взаимодействия с технологиями традиционно делится на два этапа: восстановительный, когда протезы (слуховые имплантаты, нейромоторные устройства) лишь возвращают утраченные функции, и расширительный, когда технологии добавляют функции, которых у человека никогда не было. Нейроинтерфейсы мозг-компьютер позволяют управлять устройствами мыслью. Экзоскелеты дают человеку сверхчеловеческую физическую силу. Генная инженерия модифицирует здорового ребенка для повышения интеллекта и способностей. *Smart Contact Lenses* интегрируют дополненную реальность в поле зрения [3]. Ноотропы повышают когнитивные функции здорового мозга.

Это качественно различные явления. Восстановление дополняет человека внутри его природных границ. Расширение трансцендирует эти границы. И именно расширение создает парадокс идентичности: если я становлюсь иным, остаюсь ли я собой?

В связи с этим в современной философии неизбежно возникает конфликт между технооптимизмом и биоконсерватизмом. Технооптимизм, представленный работами Н. Бострома, исходит из предпосылки, что преодоление природных ограничений является моральным благом и отражает подлинную автономию [4]. Противоположную позицию занимает биоконсерватизм Ф. Фукуямы, предупреждающий о риске утраты фундаментальной человеческой природы, нарушение которой чревато потерей того, что делает жизнь значимой [5]. Исследование выявило, что ключевыми угрозами субъектности в условиях нейроинтеграции выступают эрозия агентности и нарушение нейроприватности. Трансформация агентности происходит, когда алгоритм маскируется под интуицию: человек верит, что думает сам, но на самом деле его мысли формирует внешняя система, что полностью подрывает моральную ответственность. Одновременно с этим возникает риск глубокой манипуляции, так как системы получают прямой доступ к самым интимным аспектам опыта, мыслям и подсознательным импульсам.

Основным результатом исследования при решении данного парадокса является разработка и философское обоснование критерия онтологической автономии. Согласно данной концепции, граница личности проходит не через физическое разделение биологического и технического, а исключительно через область волевого контроля и рефлексивной осознанности. Элемент гибридной системы может считаться принадлежащим личности только тогда, когда человек способен осознанно и в любой момент изменить или остановить его функционирование. Схема данного процесса проиллюстрирована на рисунке 1.

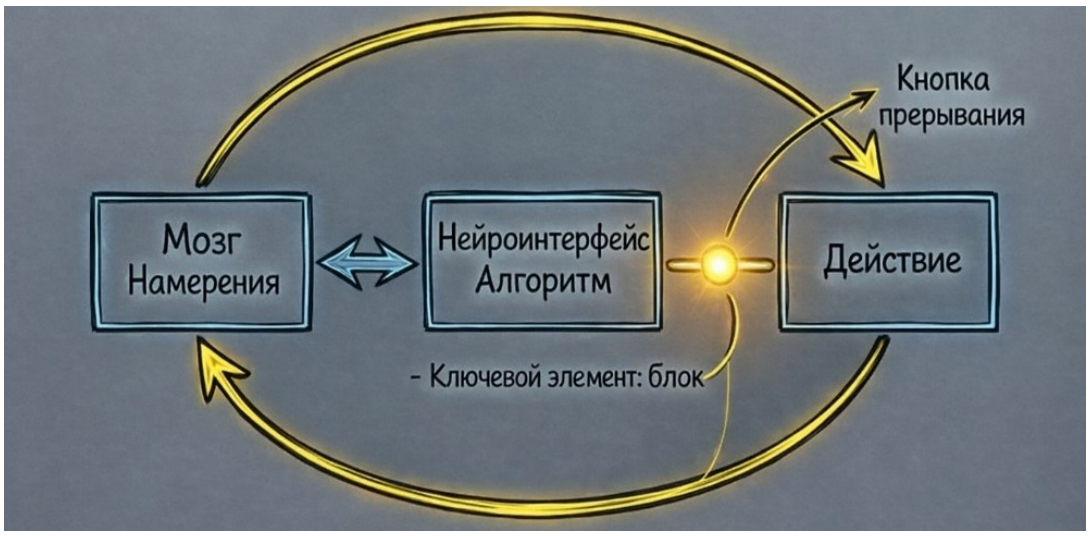


Рисунок 1 - Архитектура механизма сознательного перехвата и «вето»

На базе данного критерия доказывается, что здоровая интеграция технологий требует минимальной осознаваемости. Если нейротехнология становится столь интегрированной, что полностью исчезает из сознания, человек теряет способность отличить свои подлинные мысли от сгенерированных алгоритмом. Человек остается собой не благодаря биологической чистоте, а исключительно благодаря сохранению способности быть подлинным автором собственных действий.

Особую сложность для сохранения идентичности представляет феномен технического воплощения, при котором внешнее устройство перестает восприниматься как объект и становится частью схемы тела субъекта. В этом контексте возникает риск «когнитивного растворения». При нейроинтеграции данных риск заключается в стирании границы между личной памятью и внешними данными. Если доступ к цифровому архиву субъективно не отличим от акта «припоминания», личность теряет историческую непрерывность своего «Я». Сохранение онтологической автономии требует не только волевого контроля над интерфейсом, но и сохранения внутреннего различия между естественным ментальным усилием и технической операцией извлечения информации.

Логическим следствием признания этого критерия должна стать разработка системы нейроправа, включающей пять принципов: когнитивная свобода (только с информированного согласия); право на контроль (возможность остановить технологию); прозрачность (информирование о действиях); защита нейроприватности (данные мозга максимально защищены, некоторые не должны собираться); защита биологической основы (полная замена мозга недопустима).

Проведенный анализ позволяет утверждать, что идентичность не является статической биологической константой. Она представляет собой динамический процесс, поддерживаемый способностью к рефлексии, памяти и осознанному самоконтролю. Технологии, которые сохраняют и усиляют эту способность, совместимы с личностной идентичностью. Технологии, которые ее подрывают через скрытое воздействие, манипуляцию и потерю контроля, угрожают идентичности.

Критерий онтологической автономии предоставляет философское основание для различия допустимых и недопустимых форм киборгизации. Это не критерий биологической чистоты, а критерий сохранения человеческой способности быть автором своего существования. На этом основании можно разработать нейроправо, которое будет защищать фундаментальные интересы человека в контексте технологического предъявления.

Сегодня человечество стоит в точке ветвления истории, и предложенный в работе философский анализ является необходимой базой для того, чтобы общество могло совершенствовать себя, сознательно выбирая путь развития и сохраняя статус автономного агента.

Список использованных источников:

1. Neuralink: The breakthrough technology [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://neuralink.com/. — Дата доступа: 10.02.2026.

2. Кларк, Э. Распределённая познавательная деятельность / Э. Кларк. — Спб.: Питер, 2011. — 496 с.

3. Вардиман, М. Интернет вещей. Полное практическое руководство / М. Вардиман, Дж. Лотто. — М.: Альпина Паблишер, 2015. — 368 с.

4. Bostrom, N. In Defense of Posthuman Dignity / N. Bostrom // Bioethics. — 2005. — Vol. 19, № 3. — P. 202–214.

5. Фукуяма, Ф. Наше постчеловеческое будущее. Последствия биотехнологической революции / Ф. Фукуяма. — М.: АСТ, 2004. — 349 с.

ФИЛОСОФИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ: РЕКЛАМА КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕННОСТНЫХ УСТАНОВОК ЛИЧНОСТИ

Ойслендер К.Э., Лазовская К.С., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

В статье рассматривается реклама как важный элемент современной культуры и системы социальных коммуникаций. Анализируется её влияние на формирование человеческих желаний, ценностных установок и моделей поведения. Особое внимание уделяется философскому осмыслению потребления как социально обусловленного процесса. Рассматривается проблема свободы выбора потребителя и влияние культурных и информационных механизмов на формирование индивидуальных предпочтений.

В современном обществе реклама выступает феноменом культуры и занимает значительное место в системе социальных коммуникаций. Её присутствие ощущается во всех сферах повседневной жизни: от городских улиц до цифровой среды. Повсеместность рекламных сообщений делает актуальным вопрос о характере их воздействия на человека и о том, как реклама участвует в формировании ценностных ориентаций индивида. Возникает философский вопрос: следует ли рассматривать рекламу исключительно как инструмент экономического продвижения товаров, или же она выполняет более сложную мировоззренческую функцию.

Анализ подобных явлений возможен благодаря тому, что философия рассматривает социальные процессы в их ценностно-смысловом измерении. Мировоззрение можно определить как совокупность идей, знаний, убеждений и ценностных ориентаций, через которые человек осмысляет реальность и своё место в ней [1]. С этой точки зрения реклама может рассматриваться как средство передачи информации о товарах и услугах, как элемент современной культурной среды. Она влияет на систему ценностных ориентиров человека и участвует в формировании представлений о желаемом образе жизни.

Рекламное пространство выстраивает систему взаимодействия между базовыми и производными потребностями человека. Базовые нужды – в безопасности, принадлежности, признании, самореализации – связываются с товарами и услугами через систему образов и ассоциаций. В процессе такого замещения материальные объекты становятся условием удовлетворения нематериальных желаний. Вещи выступают как посредники социального взаимодействия, а товары воспринимаются как ключи доступа к социальным возможностям и статусам [2].

Жан Бодрийяр указывал: потребление связано не столько с удовлетворением практических потребностей, сколько с использованием вещей как элементов символической коммуникации [3]. Предметы потребления превращаются в знаки статуса, образа жизни или системы ценностей. Подобное понимание рекламы соотносится с представлением о культуре как о системе универсалий [4]. Рекламные образы создают связи между материальными предметами и социальными смыслами.

Особенностью современной рекламы является воздействие не только на желания человека, но и на его внимание. В условиях постоянного информационного потока внимание превращается в ограниченный ресурс. Повторяющиеся образы и идеи закрепляются в сознании человека. Рекламный дискурс выступает системообразующим элементом в формировании коллективных представлений и ценностей. Создаются стандарты успеха, красоты и социального признания, которые связываются с конкретными потребительскими практиками [2]. В результате реклама формирует представления о социальных идеалах и желаемых моделях поведения.

Особое внимание в анализе рекламы уделяется проблеме свободы выбора. Более глубокий анализ показывает, что предпочтения во многом формируются под воздействием культурных норм, социальных ожиданий и информационных механизмов. Мишель Фуко отмечал, что представления об индивидуальности и свободе часто являются результатом сложных социальных процессов формирования субъекта [5].

Таким образом, современная реклама выполняет не только экономическую, но и социальную функцию, участвуя в формировании социокультурных стереотипов. С философской точки зрения реклама может рассматриваться как часть процесса формирования ценностных установок личности.

Список использованных источников:

1. *Философия. Практикум / Г. И. Малыхина [и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 10–12.*
2. *КОЛЧИН, Д. Ю. РЕКЛАМА КАК ИНСТРУМЕНТ СОЦИАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ / Д. Ю. КОЛЧИН // МАНУСКРИПТ. – 2025. – Т. 18, № 1. – С. 318–323.*
3. *Бодрийяр, Ж. Общество потребления. Его мифы и структуры / Ж. Бодрийяр. – М. : Республика, 2006. – 269 с.*
4. *Степин, В. С. Эпоха перемен и сценарии будущего / В. С. Степин. – М. : ИФ РАН, 1996. – С. 27–28.*
5. *Фуко, М. Надзирать и наказывать. Рождение тюрьмы / М. Фуко. – М. : Ad Marginem, 1999. – 480 с.*

СОЗНАНИЕ КАК ИЛЛЮЗИЯ: АНАЛИЗ АРГУМЕНТОВ ДЭНИЕЛА ДЕННЕТТА

Тихонович Д.Д., Рубинштейн Е.Ю., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

В работе рассматривается иллюзионистская концепция сознания, предложенная Дэниелом Деннеттом. Анализируются его ключевые аргументы против традиционного понимания квалиа и модели «картезианского театра», а также модель множественных черновиков и метод гетерофеноменологии. Оценивается объяснительный потенциал иллюзионизма и рассматриваются основные критические возражения. Показано, что подход Деннетта представляет собой одну из наиболее последовательных попыток натуралистического объяснения сознания в контексте современных когнитивных наук.

В начале XXI века проблема сознания приобретает особую значимость в связи с развитием нейронаук, когнитивных исследований и искусственного интеллекта. Усиление связи между психическими состояниями и нейронными процессами ставит под вопрос традиционные представления о сознании как об автономной сущности. В этих условиях актуализируются теории, стремящиеся объяснить сознание в рамках естественнонаучной картины мира [1].

В современной философии широко используется различие между «лёгкими» и «трудной» проблемами сознания [2]. Если первые связаны с объяснением когнитивных функций, то «трудная» проблема касается природы субъективного опыта. Центральным элементом здесь выступает понятие квалиа, которое рассматривается как препятствие для редукции сознания к физическим процессам. Деннетт, однако, подвергает это понятие критике, считая его теоретически неустойчивым [3].

В работе «Quining Qualia» он показывает, что традиционные характеристики квалиа приводят к противоречиям. Предположение о непосредственной доступности субъективного опыта опровергается данными о когнитивных ошибках, иллюзиях и искажениях интроспекции [4; 5]. Это ставит под сомнение достоверность субъективных отчётов как источника знания о сознании.

Связанной с этим является критика модели «картезианского театра», предполагающей наличие внутреннего наблюдателя. Деннетт указывает, что такая модель логически проблематична и не согласуется с представлением о распределённой обработке информации в мозге [3].

В качестве альтернативы он предлагает модель множественных черновиков, согласно которой в мозге одновременно формируются различные интерпретации информации. Сознание при этом понимается как динамический процесс без единого центра. Такая позиция позволяет объяснять особенности восприятия, включая временные искажения и реконструктивный характер опыта [3].

Методологическим основанием служит гетерофеноменология, предполагающая рассмотрение субъективных высказываний как эмпирических данных, но без признания их привилегированного статуса. Это обеспечивает возможность их включения в научный анализ [6].

На этой основе формируется иллюзионистская трактовка сознания: иллюзорным признаётся не само сознание, а представление о нём как о носителе особых качественных свойств. Сознание интерпретируется как совокупность когнитивных процессов, обеспечивающих поведение и рефлексию субъекта [6].

Несмотря на внутреннюю согласованность, данный подход вызывает критику. Отмечается, что он не решает «трудную» проблему, а фактически устраняет её из рассмотрения. Кроме того, указывается на трудность объяснения самой возможности иллюзии без субъекта переживания [2; 5].

В ответ Деннетт утверждает, что требование особого феноменального уровня основано на интуициях, не имеющих научного обоснования. Если когнитивные процессы объяснены, введение дополнительных сущностей оказывается избыточным [6].

Подводя итог, концепция Д.Деннетта представляет собой последовательную натуралистическую программу, направленную на пересмотр традиционных представлений о сознании. Несмотря на дискуссионный характер, она задаёт важное направление для современных междисциплинарных исследований сознания [1].

Список использованных источников:

1. Frankish, K. Illusionism as a Theory of Consciousness // Journal of Consciousness Studies. – 2016. – Vol. 23, No. 11–12. – P. 11–39.

2. Chalmers, D. J. The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory. – Oxford : Oxford University Press, 1996. – 414 p.

3. Dennett, D. C. Consciousness Explained. – Boston : Little, Brown and Company, 1991. – 511 p.

4. Dennett, D. C. Quining Qualia // Consciousness in Contemporary Science. – Oxford : Oxford University Press, 1988. – P. 42–77.

5. Wah, T. Illusionism and the Problem of Consciousness // Journal of Humanities and Social Sciences. – 2007. – Vol. 1, No. 2.

6. Dennett, D. C. Sweet Dreams: Philosophical Obstacles to a Science of Consciousness. – Cambridge, MA : MIT Press, 2005. – 196 p.

ПРИМЕРЫ МАНИПУЛИРОВАНИЯ СОЗНАНИЕМ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ МАНИПУЛЯЦИЙ

Соловей Т.В., Лис А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Бархатков А. И. – канд. фил. наук, доцент

В работе рассматривается манипулирование сознанием как форма скрытого воздействия в современном информационном обществе. Анализируется его влияние на свободу и автономию личности, а также отличие от рационального убеждения. Описываются основные приёмы манипуляции: воздействие на эмоции, искажение информации, социальное давление и обращение к авторитету. Раскрывается проблема формирования массового сознания и границ индивидуального мышления. Особое внимание уделяется способам противодействия манипуляциям, включая развитие критического мышления, осознанности и информационной гигиены. Делается вывод о возможности снижения влияния манипуляций при сохранении их неизбежности.

Манипулирование сознанием представляет собой одну из наиболее значимых и одновременно скрытых форм воздействия в современном обществе, затрагивающую как индивидуальный, так и массовый уровни человеческого мышления. В условиях стремительного развития информационных технологий, социальных сетей и медиапространства влияние на человека стало не только более интенсивным, но и менее заметным, что делает проблему особенно актуальной с философской точки зрения. Центральный вопрос здесь связан с природой свободы: если решения человека формируются под воздействием скрытых механизмов, можно ли считать его действия по-настоящему автономными и свободными [1]. Манипуляция в данном контексте понимается как форма психологического воздействия, при которой субъект не осознает внешнего влияния и воспринимает навязанное решение как собственный выбор, что отличает её от открытого убеждения, предполагающего рациональный диалог и возможность критического осмысления [2].

Манипуляция принципиально отличается от убеждения не только по форме, но и по своей этической природе. Убеждение предполагает открытость аргументов, возможность их критики и сохранение за субъектом права выбора, тогда как манипуляция, напротив, стремится обойти рациональное осмысление и воздействовать на бессознательные механизмы восприятия [2]. В этом смысле манипуляция может рассматриваться как форма скрытого принуждения, замаскированного под добровольное действие, что делает ее особенно опасной в контексте философского анализа свободы и ответственности.

Манипуляция подрывает основы рациональности и автономии личности, поскольку использует не логические аргументы, а уязвимости человеческого сознания, включая эмоциональные реакции и когнитивные искажения. Человек в такой ситуации оказывается не субъектом, а объектом воздействия, что сближает данную проблему с критикой массового общества, где подчеркивается возможность управления поведением через скрытые механизмы влияния [1]. Приемы манипулирования разнообразны, однако их объединяет общий принцип скрытого воздействия. Одним из наиболее распространённых механизмов является воздействие на эмоции, такие как страх, чувство вины, стыд и жалость[3], поскольку эмоциональное состояние существенно снижает способность к критическому анализу и способствует импульсивным решениям [4]. Наряду с этим широко применяется искажение информации, включающее выборочную подачу фактов, умолчание о значимых деталях и создание ложных обобщений, что формирует у человека искаженную картину реальности, в рамках которой нужное манипулятору решение кажется логичным и обоснованным [5].

Не менее значимым является давление через социальные нормы, при котором человеку внушается, что определенное поведение является общепринятым или обязательным, что активизирует стремление к принадлежности и страх социальной изоляции [3]. Важную роль играет и создание ложного выбора, при котором предлагаемые альтернативы на самом деле не являются равнозначными и заранее направляют человека к нужному результату, исключая возможность отказа [4]. Дополнительно используется обращение к авторитету, когда информация подается через фигуры, обладающие признанным статусом и влиянием, что снижает критичность восприятия [5]. Повторение одних и тех же утверждений также усиливает их убедительность за счёт эффекта привычности, превращая недоказанные идеи в воспринимаемые как очевидные истины.

Эффективность манипулятивных приёмов во многом объясняется особенностями когнитивной структуры человека. Манипуляции опираются на так называемые когнитивные искажения — устойчивые ошибки мышления, которые упрощают обработку информации, но делают человека более уязвимым к внешнему влиянию [4]. К ним относятся, например, склонность доверять авторитетам, эффект подтверждения собственных убеждений, а также стремление избежать когнитивного диссонанса. Использование этих механизмов позволяет манипулятору воздействовать на человека, не вступая с ним в рациональный диалог [5].

Особую форму представляет манипуляция массовым сознанием, осуществляемая через средства массовой информации, рекламу и политическую коммуникацию. В этом случае индивидуальные механизмы воздействия масштабируются и приобретают системный характер, формируя коллективные представления и установки. Происходит упрощение сложных явлений, создание противопоставлений между «своими» и «чужими», а также усиление эмоциональной поляризации, что затрудняет рациональное восприятие информации и способствует формированию устойчивых, но зачастую искаженных взглядов [1]. В рамках данной проблемы возникает философский вопрос о возможности сохранения индивидуального мышления в условиях постоянного информационного давления, когда границы между собственным мнением и навязанной позицией становятся размытыми.

В данном контексте манипуляция массовым сознанием может рассматриваться как инструмент социального контроля, при котором управление осуществляется не через прямое принуждение, а через формирование определенных представлений о реальности. Это приводит к тому, что человек начинает воспринимать навязанные установки как собственные убеждения, не осознавая их внешнего происхождения [1]. Подобный механизм воздействия основан на постепенном и систематическом закреплении определенных идей, которые со временем начинают восприниматься как естественные и самоочевидные. В результате критическое осмысление ослабляется, а способность к самостоятельному анализу снижается. Таким образом, возникает парадокс: чем менее заметно воздействие, тем более эффективным оно оказывается [2].

Несмотря на широкое распространение манипуляций, существуют способы противодействия им, основанные прежде всего на развитии осознанности и критического мышления. Важным элементом является способность задавать вопросы о происхождении информации, ее целях и выгоде для источника, а также учитывать наличие альтернативных точек зрения [6]. Такой подход позволяет выйти за пределы навязываемой интерпретации и рассматривать информацию в более широком контексте, а также снижает вероятность принятия искаженной картины реальности. Существенную роль играет контроль эмоционального состояния, поскольку именно эмоции часто становятся каналом для манипулятивного воздействия [3]. Способность делать паузу перед принятием решения позволяет избежать импульсивных реакций и сохранить рациональный анализ, а также осознать природу возникающих эмоций и их возможную обусловленность внешним влиянием [7].

Не менее важным является умение устанавливать личные границы и отстаивать свою позицию без необходимости оправдываться, что препятствует давлению со стороны других людей. Прояснение ситуации через прямые вопросы или обозначение попытки воздействия разрушает скрытый характер манипуляции и делает ее менее эффективной [4]. Дополнительно значимым становится развитие внутренней психологической устойчивости и способность сохранять критическое отношение к поступающей информации [7]. В условиях информационного общества особое значение приобретает информационная гигиена, включающая проверку источников, анализ контекста и отказ от одностороннего восприятия данных [5].

Следует отметить, что противодействие манипуляциям требует не только отдельных навыков, но и определенного уровня личностной зрелости. Осознанность, способность к рефлексии и умение анализировать собственные реакции становятся ключевыми условиями сохранения автономии. При этом важным является не только распознавание внешнего воздействия, но и понимание собственных уязвимостей, через которые оно может осуществляться. Развитие внутренней устойчивости позволяет человеку сохранять критическую дистанцию по отношению к навязываемым установкам и принимать более взвешенные решения.

Манипуляция демонстрирует ограниченность человеческой свободы, поскольку даже при наличии рационального мышления человек остается подверженным влиянию среды и социальным механизмам. Полное избавление от манипуляций невозможно, так как они являются неотъемлемой частью коммуникации и социальной жизни. Однако развитие рефлексии, критического мышления и способности осознавать собственные мотивы позволяет снизить степень их воздействия и сохранить относительную автономию. Таким образом, свобода человека оказывается не абсолютной, а зависящей от уровня его осознанности и способности распознавать скрытые формы влияния.

Список использованных источников:

1. Манипуляция массовым сознанием [Удаленный ресурс]. – Доступ: https://w.wiki/K96u – Дата доступа: 21.03.2026.

2. Как защититься от манипуляций, влиять на людей и добиваться своего [Удаленный ресурс]. – Доступ: https://surl.lt/iokbvt – Дата доступа: 21.03.2026.

3. Манипуляция и способы противостоять ей [Удаленный ресурс]. – Доступ: https://e-mba.ru/knowledge-base/kak-zashitit-sya-ot-manipulyacij-vliyat-na-lyudej-i-dobivat-sya-svoego – Дата доступа: 21.03.2026.

4. Активная и пассивная защита от манипуляций [Удаленный ресурс]. – Доступ: https://surl.li/hmanox – Дата доступа: 21.03.2026.

5. Техники защиты от манипуляции [Удаленный ресурс]. – Доступ: https://surl.li/fpbwhj – Дата доступа: 21.03.2026.

6. What Can Crowds Do Against Manipulation of and by Governments? – [Electronic resource]. – Mode of access: https://crowdsourcingweek.com/blog/can-crowds-combat-government-manipulation/ – Date of access: 21.03.2026.

7. How to Resist Psychological Manipulation by Governments, Media, and Corporations – [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.culturecollective.org/how-to-resist-psychological-manipulation/ – Date of access: 21.03.2026.

МОРАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО КРИЗИСА ДОВЕРИЯ

Селятыцкий С.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И. М. – канд. фил. наук, доцент

В статье исследуются моральные основания современных хозяйственных систем в условиях глобализации и социального неравенства. Описаны классические этические концепции капитализма М. Вебера и А. Смита, а также критические аргументы, связанные с отчуждением личности и экологическими издержками. Проведен сравнительный анализ капиталистической, социально-рыночной и кооперативной моделей по критериям их высших ценностей и целей развития. Установлено, что ключевым условием устойчивости общества является переход к антропоцентричной экономике. Продемонстрировано, что решение современных вызовов требует синтеза предпринимательской свободы с принципами социальной ответственности и солидарности.

Актуальность темы обусловлена нарастающим социально-экономическим неравенством и кризисом доверия к традиционным рыночным институтам в условиях глобализации. Поиск баланса между экономической эффективностью и гуманистическими ценностями становится не просто теоретической задачей, а необходимым условием устойчивости современного общества. Переосмысление этических основ хозяйствования позволяет обосновать переход к антропоцентричной экономике, где человек является целью, а не ресурсом. Данное исследование направлено на анализ этической легитимации капитализма и критический разбор альтернативных моделей, предлагающих иной взгляд на человеческое процветание.

Капитализм, как доминирующая мировая система, исторически опирается на мощный этический фундамент, который часто остается в тени его финансовых показателей. Одной из наиболее влиятельных концепций остается идея, изложенная в труде «Протестантская этика и дух капитализма». Вебер блестяще показал, что капитализм не возник бы без специфического морального настроя. Религиозная установка на трудолюбие, бережливость и рациональность превратила мирское профессиональное служение в форму исполнения божественного предназначения. Таким образом, успех в делах стал рассматриваться не как алчность, а как признак моральной добродетели.

Адам Смит в «Богатстве народов» и «Теории нравственных чувств» заложил этику свободного обмена. С точки зрения либерализма, свободный рынок этичен потому, что он уважает автономию личности. Знаменитая «невидимая рука» предполагает, что индивидуальное стремление к выгоде в конечном итоге служит обществу. Однако важно подчеркнуть, что эта модель предполагает наличие доверия и честности между участниками; без этических рамок рынок превращается в хаос.

Несмотря на колоссальные успехи в развитии технологий, капитализм подвергается глубокой этической критике. Главный аргумент критиков (включая Карла Маркса и его последователей) заключается в том, что приоритет прибыли ведет к отчуждению человека. Когда человеческий труд превращается в товар, подрывается достоинство личности. Проблемы эксплуатации, концентрации капитала в руках немногих и разрушения экологической среды ставят под сомнение справедливость системы, где «эффективность» измеряется исключительно в цифрах, игнорируя социальные издержки.

В ответ на эти противоречия сформировались альтернативные подходы, каждый из которых предлагает свое видение «добродетельной экономики».

- Социалистическая модель: этика коллективной справедливости и преодоление эксплуатации. В рамках социалистической парадигмы этический акцент радикально смещается с индивидуальной автономии на приоритет коллективного блага. Моральным фундаментом здесь выступает принцип безусловной социальной справедливости, который трактуется как освобождение человека от «товарной» формы существования. Труд в этой системе перестает быть предметом купли-продажи, что, с этической точки зрения, должно восстановить человеческое достоинство, утраченное в условиях рыночной конкуренции. Однако данная модель порождает специфическую моральную дилемму: поиск равенства неизбежно сталкивается с проблемой ограничения личной инициативы. Этический вопрос здесь заключается в том, допустимо ли принудительное установление справедливости за счет частичного отчуждения индивидуальной свободы выбора.
- Социально-рыночное хозяйство: этика солидарности и государство как «нравственный арбитр». Социально-рыночная модель предлагает сложный этический синтез, где рыночные механизмы эффективности ограничиваются жесткими рамками моральной ответственности. Центральным понятием здесь является принцип солидарности, согласно которому процветание сильных невозможно без поддержки уязвимых членов общества. В этой концепции государство наделяется ролью «этического арбитра»: оно не просто регулирует налоги, а защищает онтологическое достоинство личности от превратностей стихийного рынка. Свобода предпринимательства в данной модели понимается не как лич-

ный произвол, а как «ответственная свобода» — моральное обязательство собственника перед обществом. Таким образом, экономический успех признается легитимным лишь в том случае, если он сопряжен с общественным благом.

– Кооперативная модель и устойчивое развитие: этика сотворчества и субъектности. Наиболее радикальную трансформацию этических основ предлагает кооперативная модель (экономика участия), которая напрямую отвечает на проблему «отчуждения» личности. В отличие от капиталистической иерархии, где работник выступает лишь как ресурс, кооперация возвращает человеку статус полноправного субъекта и творца. Моральная ценность этой системы заключается в преодолении разрыва между трудом и капиталом: когда работник становится совладельцем, его деятельность наполняется личным смыслом и ответственностью. Дополнительное измерение в эту систему вносит этика устойчивого развития, которая постулирует принцип межпоколенческой справедливости. Это расширяет горизонт моральной ответственности человека за пределы настоящего момента, превращая заботу об экологии и будущих поколениях в фундаментальный долг современного хозяйствующего субъекта.

Таблица 1 – Сравнение подходов

Критерий сравнения	Капитализм	Социально-рыночная модель	Кооперативная модель
Высшая ценность	Индивидуальная свобода	Социальный мир	Солидарность и участие
Роль человека	Агент рынка (потребитель/производитель)	Гражданин с правами на защиту	Совладелец и творец
Цель системы	Максимизация прибыли	Благосостояние для всех	Устойчивое развитие

Подводя итог, можно констатировать, что этика капитализма и его альтернатив — это не вопрос выбора между «хорошим» и «плохим», а поиск баланса между эффективностью и человечностью. Современные условия требуют не отказа от рынка, а его глубокой этической коррекции. Эффективная экономическая система будущего должна быть антропоцентричной — то есть служить человеку, а не превращать его в ресурс. Только сочетание свободы предпринимательства с принципами социальной ответственности и солидарности позволит создать устойчивое общество, способное противостоять вызовам нового времени.

Список использованных источников:

1. К вопросу об эволюции теории социальной экономики [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-evolyutsii-teorii-sotsialnoy-ekonomiki – Дата доступа: 14.03.2026.

2. Этические проблемы социально-экономических отношений современной России [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/eticheskie-problemy-sotsialno-ekonomicheskih-otnosheniy-sovremennoy-rossii – Дата доступа: 14.03.2026.

3. Кузьмин, Е. А. Этика современного капитализма [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://moluch.ru/archive/125/34844 – Дата доступа: 15.03.2026.

4. Этика и экономика счастья: новые подходы к старой проблеме [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/etika-i-ekonomika-schastya-novye-podhody-k-staroy-probleme – Дата доступа: 16.03.2026.

5. Генезис и этические основы социально-рыночного хозяйства [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/genezis-i-eticheskie-osnovy-sotsialno-rynochnogo-hozyaystva – Дата доступа: 18.03.2026.

6. Нравственные основания экономики: от «экономического человека» к «человеку социально-ответственному» [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/nravstvennye-osnovaniya-ekonomiki-ot-ekonomicheskogo-cheloveka-k-cheloveku-sotsialno-otvetstvennomu – Дата доступа: 18.03.2026.

ПРОБЛЕМА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Тутин Н. В., Марудин А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Бархатков А.И. – канд. фил. наук, доцент

В работе рассматривается проблема информационной безопасности через призму социально-философского анализа. Проанализирован переход от техноцентричного понимания ИБ к антропоцентричному, где главным объектом защиты становится когнитивная свобода и цифровая идентичность личности. В исследовании сопоставляются традиционные и современные подходы к защите данных, а также обосновывается необходимость формирования новой культуры цифрового доверия в условиях алгоритмизации общества.

Стремительное развитие цифровой культуры и формирование информационного общества (в терминах Д. Белла и М. Кастельса) фундаментально изменили характер взаимодействия человека с окружающей реальностью. Информация перестала быть просто транслируемым сообщением, превратившись в ключевой фактор конструирования социальной реальности и управления массами [1]. В этой связи проблема информационной безопасности выходит далеко за рамки сугубо технической (программной или аппаратной) дисциплины, приобретая ярко выраженное философское, этическое и экзистенциальное измерение. Сетевые структуры проникают во все сферы человеческой жизнедеятельности, размывая границы между физическим и виртуальным мирами. Цифровая среда больше не является внешним инструментом; она стала средой обитания, формирующей наши ценности, убеждения и способы познания.

Традиционно информационная безопасность рассматривалась как триада «конфиденциальность, целостность, доступность» данных. Однако сегодня философский дискурс смещает фокус с «железа и кода» на самого человека.

Во-первых, актуализируется проблема трансформации понятия приватности. В условиях тотальной цифровизации и развития технологий Больших данных человек оставляет непрерывный «цифровой след». Философская дилемма современности заключается в поиске баланса между потребностью общества в безопасности (что часто ведет к усилению контроля и цифровому надзору) и фундаментальным правом личности на неприкосновенность частной жизни. Утечка персональных данных сегодня — это не просто потеря информации, это вторжение в экзистенциальное пространство личности, угроза ее цифровой идентичности. Каждое действие в сети, от поисковых запросов до геолокации, фиксируется, анализируется и монетизируется транснациональными корпорациями. Человек оказывается в ситуации цифрового паноптикума, где невидимое наблюдение модифицирует его поведение, приводя к самоцензуре и утрате спонтанности.

Особого внимания в контексте защиты данных заслуживает философская концепция «права на забвение». В традиционной культуре забвение было естественным механизмом социальной и психологической адаптации, однако цифровая память перманентна. Информационная безопасность личности сегодня должна подразумевать возможность полного удаления своего цифрового следа и суверенный контроль над тем, какая информация остается доступной в глобальной сети. Невозможность «стереть» устаревшие данные или ошибки прошлого создает беспрецедентное давление на человека, фактически лишая его свободы на личностную трансформацию и переосмысление собственного опыта в цифровой среде.

Во-вторых, информационная безопасность тесно связана с гносеологической (познавательной) безопасностью. В эпоху «постправды», дипфейков и алгоритмических лент новостей возникает угроза искажения картины мира. Алгоритмы социальных сетей, стремясь максимизировать вовлеченность пользователя, помещают его в так называемые «информационные пузыри» и «эхо-камеры». В результате субъект лишается доступа к альтернативным точкам зрения, что ведет к радикализации мнений и социальной поляризации. Истина в цифровой среде утрачивает свою объективность, становясь продуктом консенсуса алгоритмов ранжирования. Манипуляция массовым сознанием через информационные сети ставит под вопрос способность человека к критическому мышлению и автономному принятию решений. Защита от дезинформации становится важнейшим элементом сохранения когнитивной свободы субъекта.

В-третьих, делегирование функций безопасности системам искусственного интеллекта порождает проблему «черного ящика». Когда ИИ определяет уровень доверия к пользователю или выявляет потенциальные угрозы, возникает этическая дилемма: кто несет моральную ответственность за ошибочные алгоритмические решения [2]? Философия техники предупреждает об опасности технологического детерминизма, при котором человек становится заложником собственных защитных систем. Перенос субъектности с человека на машину в вопросах безопасности создает риск

дискриминации на основе скрытых алгоритмических предвзятостей. Обществу необходимо разрабатывать концепцию «объяснимого ИИ», чтобы сохранить человеческий контроль над инфраструктурой безопасности.

Таким образом, технические средства являются лишь базовым уровнем обеспечения информационной безопасности. Подлинная защищенность в XXI веке требует философского осмысления «инфосферы» (по Л. Флориди) [3] и формирования новой цифровой этики. Безопасность должна рассматриваться не как система запретов, а как среда, гарантирующая неприкосновенность личности, достоверность познания и свободу воли в условиях тотальной цифровизации.

Список использованных источников:

1. Кастельс, М. Информационная эпоха: экономика, общество и культура / М. Кастельс ; пер. с англ. под науч. ред. О. И. Шкаратана. – М. : ГУ ВШЭ, 2000. – 608 с.

2. Алексеева, И. Ю. Информационные вызовы национальной и международной безопасности / И. Ю. Алексеева // Вопросы философии. – 2013. – № 5. – С. 49–53.

3. Floridi, L. The Fourth Revolution: How the Infosphere is Reshaping Human Reality / L. Floridi. – Oxford : Oxford University Press, 2014. – 272 p.

ЛОГИКА УСЛОВНЫХ ЗНАКОВ И МИФОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА СЛАВЯН

Печенев Е.О., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Мозалевская Д.А. – канд. фил. наук, преподаватель

В данной работе исследуются мифологические знаки и образы славянского мира, раскрывая их роль как условных символов и носителей глубоких смыслов. Анализируются конкретные примеры таких знаков, их структура, свойства и функции в культуре, а также взаимодействия между ними. Особое внимание уделяется многослойности значений, моделям мироздания и современным проявлениям. Работа показывает, как мифологические символы формируют мировоззрение, передают знания и служат магическими и защитными средствами, создавая целостную картину славянской мифологии и культуры.

Логика условных знаков – это важнейшее направление в семиотике и философии, изучающее структуру, содержание и функционирование знаков как носителей смыслов [3]. В ходе исторического развития человечество создаёт систему символов и образов, которая отражала его представления о космосе, природе и духовном мире.

Одним из ярчайших проявлений этого является мифологическая система славян, где символы и знаки выступают не просто в качестве изображений, а носителями сакральных смыслов и универсальных концепций [1;2;6]. Объединив знаки и символы, мы получаем инструментарий для более глубокого понимания того, как мифологическая картина мира формировалась внутри славянской культуры через систему условных знаков.

Знак – это носитель информации, связанный с объектом через определённую систему смыслов [3;7]. Он содержит в себе содержательные свойства, которые при интерпретации создают связь между реальностью и её образами. В контексте славянской мифологии знак – это не просто изображение, а условный символ, наделённый сакральным и магическим смыслом [2]. Особенности знаков в мифологической системе заключаются в следующем: многогранность (знак обладает несколькими значениями: это и материальный образ, и духовный символ, и космологическая модель); контекстуальность (значение зависит от культурного контекста, ритуальной или художественной ситуации); образность и метафоричность (мифологические знаки часто выражают идеи через метафоры, аллегории и символы) [3;6].

При рассмотрении условий возникновения мифологических знаков в славянской культуре удалось выделить несколько ключевых факторов, а именно: объяснение природных явлений и феноменов (знаки создавались для передачи понимания таких явлений, как солнце, вода, дождь и их влияния на жизнь человека), магические и ритуальные практики (необходимость защиты, благословения и привлечения удачи способствовали появлению символов, выступавших в роли оберегов и магических средств), мировоззренческая картина (представления о мире, его структура и циклы времени породили образы и знаки, отражающие гармонию и взаимодействие элементов окружающей среды), передача опыта и знаний через обряды (образы закреплялись в ритуалах, посланиях и традициях, что объединяло сообщество и сохраняло культурное наследие), социальная и духовная потребность (необходимость осмысления и упорядочивания мира, а также поддержка связи с предками и богами, создавали основу для появления условных символов и образов) [2;5;6].

Мифы славян – это система образов, наделённых сакральным смыслом, моделирующих структуру мира и космологические отношения [2;6]. Древо Рода (Мировое дерево) – обычно это раскидистое дерево (часто дуб, берёза или яблоня) – связь трёх миров. Навь (предвечные предки), Явь (наш мир), Правь (небеса); символизирует семейную связь, защиту от зла, плодородие и процветание. Солнце (Ярило) – расписные круги, кулоны с солнцем, изображения в народном искусстве – источник жизни, тепла, света; символ божественного порядка, времени и плодородия. Змей / Дракон (Змей-Горыныч) – скульптуры, ритуальные предметы, орнаменты – символизирует границу между мирами (живых и мёртвых), похищает женщин, а также выступает как собирательный образ внешних врагов Руси. Коловрат – орнаменты на вышивках и тканях, гравировки на камнях, рунические символы – вечность, бесконечное движение и циклы природы, солнцепоклонство. Нечисть – черти, бесы, лешие, водяные, русалки – представляет олицетворение тёмных сторон природы [2;5;6].

Также можно выделить структуру знаков: референт (реальный объект) – объекты или идеи, которые образ символизируют (Древо Жизни, Солнце, Змей), денотат – конкретное имя или обозначение (знак) – (название "Мокошь" - богиня плодородия или «Коловрат» – символ солнца, а в некоторых источниках его считают ещё и символом времени), сигнификат (концептуальное содержание) – значение или идея, которой наделен знак (модель мироздания, в которой встречается круговое движение, жизни и смерти в виде «Души»), коннотат – передача смыслов через обряды и символическую речь (ритуалы, обереги, орнаменты, сказания), пейоратив – негативные или ироничные оттенки, присущие знаку (Баба-

яга – имя конкретного персонажа часто используется как пейоратив для обозначения старой, злой или ворчливой женщины), код – интерпретация и понимание окружения и мира через знаки (социальные законы, традиционные значения символов, культурные нормы) [3;7].

Рассматривая свойства знаков, мы видим следующие паттерны: *многослойность*, если взять змей-горыныча, то он не только мифический зверь, но и символ хаоса, опасности и препятствий; *контекстуальность*, в разных ситуациях солнце может иметь совсем другой смысл, например, в празднике Купала – символ плодородия и обновления, в оберегах – защита и теплота, обеспечивающая благополучие семьи [2]. Модель мира, в представлении у славян древо жизни изображается как двуветвящееся дерево, соединяющее небо, землю и навь: это модель мира, где все связано и движется по циклам [2;6].

Функциональные свойства знака со стороны практического применения представляют несколько, возможных вариантов. Коммуникативное (знаки служили для передачи сложных культурных, духовных и обрядовых смыслов - например, рунические символы, обереги), образное (каждый знак – носитель типичного образа, который помогает понять или запомнить важную идею – например, изображение змей как символа мудрости или границы), обеспечивающее связь (знаки использовались в обрядах для защиты, благословения, привлечения удачи, укрепляя социальные связи и личную защиту), магическое (многие знаки выполняли ритуальную функцию – защищали дом, здоровье или урожай, выступая как магические амулеты) [3;7].

Когда мы говорим о взаимодействии знаков, то можно привести такие примеры. Например, коловрат и солнце – эти орнаменты со знаком коловрата символизируют вечность и цикл времени [6]. Они отображают идею того, что солнце движется по кругу – от рассвета до заката и назад, – то есть цикл природы и времени. А ведь именно так и ощущается жизнь: всё возвращается, всё повторяется. Еще есть древо Рода и змей (у славян – это символы связи между миром людей и духовным миром). Дерево – символизирует мост, связка двух пространств, а змей – это охранитель или даже искупитель, связанный с этим деревом (помогает охранять священное пространство или служит связующим звеном) [2;5]. Лунный диск и морской дух, в народных верованиях луна управляет водами, а воды, в свою очередь, считаются домом Морского духа, который связан с такими магическими процессами, как очищение и защита [2;6].

Что касается современности – эти древнеславянские символы всё еще сохраняют свою актуальность. Например, коловрат используется в амулетах и вышивках – он как символ вечности и солнца. Также в народном ткачестве часто встречаются рисунки с божьими кругами – они помогают защититься от злых сил [4]. В искусстве и архитектуре – на церквях и деревянных изделиях можно найти орнаменты с изображениями солнца, дерева и змей. Эти символы показывают, что лежит в основе бытия: начало и конец, духовное и материальное. В литературе, театре, кино – современные герои часто получают имена или образы, связанные с этими древними знаками. Например, персонаж-Змей или Ярило – такие имена делают персонажей более символическими, придавая их образам особый смысл и глубину.

Таким образом, с помощью условных знаков и мифологических образов славянская культура создала сложную и глубоко символическую систему, отражающую мировоззрение людей, их отношения с природой и божественным [2;6]. Эти знаки не только служили средством сохранения и передачи знаний, но и выступали в роли духовных и магических инструментов, объединяя мир загадочных мифов и повседневной жизни. В итоге, именно через эти многослойные символы и образы мифологическая картина мира становилась целостной, живой и непрерывной, передаваясь из поколения в поколение и сохраняя свою актуальность и сегодня.

Список использованных источников:

1. Кэмпбелл Д. Тысячеликий герой / Д. Кэмпбелл – СПб.: Питер, 2019. – 352 с.

2. Слушны Я. Все славянские мифы и легенды / Я. Слушн // пер. с чеш. Г.М. Лифшиц-Артемьевой – Москва : Издательство АСТ, 2026. – 320 с.

3. Старикова, И. В. Знак: понятие, философская сущность, содержательные аспект / И.В. Старикова // Экономические и социально-гуманитарные исследования национального исследовательского университета «МИЭТ»: Философия, этика, религиоведение. – 2018. – С.122-127.

4. Джурич М. Деревня тихое // librusec.pro [сайт]. – URL: https://librusec.pro/b/851215 (дата обращения: 25.03.2026).

5. Бестиарий. Существа славянской мифологии // mirf.ru [сайт]. – URL: https://www.mirf.ru/worlds/monstry-slavyanskoy-mifologii (дата обращения: 25.03.2026).

6.Славянская мифология // Wikipedia. [сайт]. – URL: ru.wikipedia.org/wiki/Славянская_мифология (дата обращения: 25.03.2026).

7. Символ // Wikipedia. [сайт]. – URL: ru.wikipedia.org/wiki/Символ - (дата обращения: 25.03.2026).

КОНЦЕПЦИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ДОГОВОРА: ОТ КЛАССИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ К СОВРЕМЕННЫМ ИНТЕРПРЕТАЦИЯМ

Евтухович А.С., Ловцевич А.Ю., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

Анализируется эволюция теории общественного договора от классических концепций XVII–XVIII вв. до современных интерпретаций. Рассматриваются взгляды Т. Гоббса, Дж. Локка и Ж.-Ж. Руссо, а также их критиков и последователей.

В XXI веке обращение к концепции общественного договора обусловлено трансформациями отношений между государством и обществом. Снижение доверия к политическим институтам, рост социального неравенства, цифровизация, меняющая границы частной жизни и безопасности, а также поиск новых способов объединения людей актуализируют вопрос о легитимности власти и условиях добровольного согласия граждан. Концепция общественного договора позволяет осмыслить эти вызовы не как временные сбои, а как фундаментальную проблему пересмотра «негласных соглашений», лежащих в основе современного социального порядка.

Цель работы – выявление эволюции теоретических оснований концепции общественного договора в истории политической философии и определение её структурных элементов как ноумена современного общественного развития. Исходя из цели определены следующие задачи: проанализировать ключевые подходы к пониманию общественного договора в классических теориях (Т. Гоббс, Дж. Локк, Ж.-Ж. Руссо), рассмотреть критику договорной традиции в философии XIX века (на примере М.А. Бакунина), выявить трансформацию концепции в XX веке (Дж. Ролз, Р. Нозик, М. Олсон), обозначить актуальность идей общественного договора для осмысления современных политических процессов.

Отправной точкой для любой дискуссии об общественном договоре служит труд Томаса Гоббса «Левиафан», написанный в 1651 году. Философ создает модель, где естественное состояние – это «война всех против всех», делающая жизнь человека «одинокой, бедной, беспросветной, тупой и кратковременной» [1, с. 48]. Единственным спасением от этой взаимной угрозы является договор, по которому индивиды отказываются от своих прав в пользу абсолютного суверена. Как пишет Гоббс, «такое реальное единство, воплощенное в одном лице, называется государством... Это порождение того договора, который заключается между людьми, словно бы каждый человек сказал другому: я уполномочиваю этого человека... управлять собой при условии, что и ты передашь ему свое право» [1, с. 68]. В этой трактовке объединяющей идеей выступает справедливость, а общественный договор представляет собой акт тотального отчуждения прав ради достижения главной цели – физической безопасности.

Решающий шаг в трансформации концепции совершает Джон Локк в «Двух трактатах о правлении». Если Гоббс защищал идею полной власти государства над человеком, то Локк утверждал, что в естественном состоянии люди уже обладают неотъемлемыми правами – на жизнь, свободу и собственность. Он выступал за взаимную доброжелательность и доверие, утверждая, что люди от природы свободны и независимы, а политическое общество возникает на основе обоюдного договора с согласия всех граждан для гарантии естественных прав [6, с. 101]. Общественный договор заключается не для того, чтобы учредить абсолютную власть, а чтобы защитить эти права с помощью закона. Государство становится гарантом договора, а не его единоличным хозяином. Локк подчеркивает: «Целью закона является не уничтожение и не ограничение, а сохранение и расширение свободы. Ведь свобода состоит в том, чтобы не испытывать ограничения и насилия со стороны других, а это не может быть осуществлено там, где нет закона» [2, с. 293]. Если правительство нарушает условия договора и посягает на естественные права граждан, народ получает право на сопротивление. Таким образом, Локк превращает общественный договор из инструмента абсолютного подчинения в фундамент конституционного правления.

Наиболее ярко идеи договора сформулировал Жан-Жак Руссо в работе «Об общественном договоре, или Начальные основания политического права». Согласно его концепции, общественный договор – это негласные соглашения между индивидами, основанные на добровольном выборе. Главная проблема общественного договора – найти такую форму объединения, при которой человек, подчиняясь обществу, остается свободным. Решение Руссо видит в полном отчуждении прав каждого в пользу всей общины, что ставит всех в равное положение перед законом и создает условия для общего блага. В результате заключения договора народ становится сувереном – единственным законным носителем верховной власти. Народный суверенитет реализуется через осуществление общей воли, которая отражает общее в различных интересах и ориентирована на общее благо. Важнейшее условие

эффективности договора – опора на мнение большинства и требование подчинения ему, что, по мнению Руссо, означает, что человека «силою принудят быть свободным» [3, с. 83].

В XIX веке идеи общественного договора подверглись серьезной критике, в частности, со стороны основоположника русского анархизма М.А. Бакунина. Он считал слабым местом теории подмену понятия «общества» понятием «государства» [4, с. 187]. По мнению Бакунина, общество – это естественный способ существования совокупности людей, тогда как государство – искусственное образование, которое ставит себя над обществом и стремится его поглотить.

Бакунин резко критиковал договорную теорию происхождения государства, называя предположение Руссо о договоре, заключенном дикарями, «большой ошибкой» [4, с. 186]. Он полагал, что никакое историческое государство никогда не имело своей основой договор – все они были основаны на насилии и завоевании. Вместо идеи общественного договора М.А. Бакунин выдвинул концепцию федерализма как свободной организации социальной жизни, освобожденной от власти любого рода.

Следующий важнейший этап эволюции концепции приходится на XX век и связан с именами американских философов. В «Теории справедливости» Джона Ролза концепция общественного договора получает новое развитие: из политической теории она превращается в этическую модель, позволяющую определить, каким должно быть справедливое общество. Ролз предлагает мысленный эксперимент – «исходное положение», в котором свободные и рациональные индивиды выбирают принципы справедливости, находясь за «вуалью неведения»: никто не знает своего будущего социального положения, богатства, способностей. В таких условиях люди выбрали бы два фундаментальных принципа: равные основные свободы для всех и такое устройство социальных неравенств, которое было бы выгодно наименее защищенным слоям общества [7, с. 66]. Здесь общественный договор перестает быть историческим фактом и становится гипотетической процедурой проверки общественных институтов на справедливость.

В современном мире концепция общественного договора получила новые интерпретации. Р. Нозик защищал идею «минимального государства» и критиковал перераспределительную справедливость. М. Олсон объяснял возникновение государства через эволюцию «кочующих бандитов» в оседлых, которые начинают создавать общественные блага для оптимизации изъятия доходов [5, с. 7].

Подводя итог теоретическому анализу, можно выделить структуру общественного договора как ноумена. Это, прежде всего, наличие общей цели, разделяемой и народом, и государством. Далее – конкретизация цели в средствах, прежде всего в правах и свободах, зафиксированных в конституции. Важнейшим элементом выступает доверие народа к социальным и политическим институтам, реализуемое как социальный контракт. Необходимо также соответствие реальной политики устремлениям народа, что требует постоянного изучения общественного мнения. Ключевое значение имеет наличие эффективной обратной связи между властью и народом. Наконец, требуется обеспечение баланса интересов не только по вертикали (народ–власть), но и по горизонтали – между различными социальными группами внутри общества. Только выполнение этих условий обеспечивает устойчивость социального порядка.

Проведённый анализ показывает, что концепция общественного договора прошла сложную эволюцию: от обоснования абсолютной власти у Гоббса, через конституционную модель, ограничивающую произвол государства у Локка, к радикально-демократической версии, основанной на общей воле у Руссо. Критика Бакунина выявила противоречие договорного подхода – подмену общества государством. В XX веке теория трансформировалась в этическую модель справедливости у Ролза.

Сегодня снижение доверия к демократическим институтам, рост неравенства и усиление роли государства делают идею общественного договора вновь актуальной. Пересматриваются границы свободы и безопасности, вмешательство государства в частную жизнь, принципы налогообложения. Актуальны размышления Ролза о справедливости по отношению к уязвимым слоям общества – в дискуссиях о минимальной оплате труда, доступности медицины и базовом доходе. Идеи Руссо об общей воле и предостережения Бакунина об усилении государства служат ориентирами в поиске баланса между свободой, справедливостью и эффективностью управления.

Список использованных источников:

1. Гоббс Т. Левиафан, или Материя, форма и власть государства церковного и гражданского. – М.: Мысль, 2001. – 240 с.

2. Локк Дж. Два трактата о правлении // Сочинения: В 3 т. – Т. 3. – М.: Мысль, 1988. – С. 137–405.

3. Кученкова А.В. Народный суверенитет и право на восстание в концепции общественного договора Ж.-Ж. Руссо / А.В. Кученкова // Вестник РГГУ. Серия «Философия. Социология. Искусствоведение». – 2023. – № 4. – С. 79–88.

4. Буланова М.Б. Общественный договор: pro et contra М. Бакунина / М.Б. Буланова // Вестник РГГУ. Серия «Философия. Социология. Искусствоведение». – 2023. – № 3, ч. 2. – С. 184–192.

5. Тощенко Ж.Т. Общественный договор как ноумен: опыт социологического осмысления / Ж.Т. Тощенко // Социологические исследования. – 2023a. – № 6. – С. 3–15.

6. Тощенко Ж.Т. Общественный договор: эволюция идей / Ж.Т. Тощенко // Ежегодник. – 2023b. – С. 98–120.

7. Ролз Дж. Теория справедливости. – Новосибирск: Издательство Новосибирского университета, 1995. – 206 с.

КОНФУЦИАНСКАЯ ЭТИКА В ЦИФРОВОЙ КОРПОРАТИВНОЙ КУЛЬТУРЕ

Грабовский А. К., Яцков А. А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Мозалевская Д.А. – канд. фил. наук, преподаватель

В работе анализируется гуманистический потенциал конфуцианских категорий «Ли» (礼), «Жэнь» (仁) и «мяньцзы» (面子) применительно к современному корпоративному управлению. На материале кейсов китайских и японских компаний обосновывается, что конфуцианская модель, основанная на взаимных обязательствах и ритуальных практиках, представляет жизнеспособную альтернативу западной контрактной парадигме менеджмента в условиях цифровой экономики.

Современная цифровая экономика с её автоматизацией, дистанционной работой и алгоритмическим контролем существенно ослабляет социальные связи внутри коллектива, которые раньше придавали трудовой деятельности смысл и формировали чувство принадлежности к команде. Процесс труда в таких обстоятельствах часто превращается в набор механических операций, где общение сводится к коротким транзакциям: получению задачи через цифровой интерфейс, её выполнению и последующей оплате. В результате усиливается отчуждение работника от своей деятельности, снижается уровень межличностного доверия, а корпоративная среда становится психологически неустойчивой. В этом контексте конфуцианская категория «Ли» (礼), которую принято переводить как «ритуал» или «нормы поведения», предлагает практический и человечный путь для реорганизации рабочей среды. Речь идет не о формальном этикете или стремлении вернуться в прошлое, а об использовании «Ли» как живого инструмента для восстановления достоинства личности в организационных структурах. Г. Сигурдссон подчеркивает, что ритуальные практики, вдохновленные конфуцианской традицией, способны эффективно противостоять дестабилизирующим эффектам ускоренной модернизации, восстанавливая четкую структуру социальных отношений и придавая им предсказуемость [1].

Принцип «Ли» не может рассматриваться как самостоятельный набор правил, поскольку неразрывно связан с категорией «Жэнь» (仁 – гуманность или человеколюбие). Ещё Конфуций определял «Жэнь» через возвращение к «Ли»: «Преодолеть себя и вернуться к ритуалу – вот что значит быть человечным» [2]. В то же время категория «Ли» действует как своего рода «культурная грамматика»: подобно тому, как владение правилами языка позволяет нам говорить свободно и точно выражать свои мысли, усвоение норм «Ли» делает этичное поведение естественной повседневной привычкой, а не результатом внешнего давления. В такой системе руководитель, соответствующий идеалу «благородного мужа» (君子 – «Цзюнь-цзы»), управляет коллективом не за счет жесткого административного принуждения, а посредством личного примера и следования тем же моральным стандартам, которые он требует от других. Как показывают современные исследования, такой лидер формирует здоровую этическую культуру организации через повседневные ритуалы взаимодействия, где авторитет базируется на поступках и нравственной харизме [3]. Конфуцианская иерархия в организации базируется на взаимных обязательствах и ответственности. В этой архитектуре отношений руководитель берет на себя роль наставника, а сотрудник становится надежной опорой команды, что создает атмосферу взаимного доверия и предсказуемости, необходимую для стабильной работы в нестабильном цифровом мире.

Продолжая анализ структуры конфуцианского управления, необходимо рассмотреть механизм, который обеспечивает гибкость и психологическую устойчивость этой иерархической системы – категорию «мяньцзы» (面子 – лицо). В условиях современной корпоративной среды «лицо» выполняет функцию важнейшего социально-этического регулятора обратной связи. Если иерархия задает вертикаль власти, а ритуал «Ли» – правила игры, то «мяньцзы» выступает в роли своего рода «предохранителя», который не позволяет системе стать подавляющей. Правильное использование этого механизма предполагает, что управленческая критика и исправление ошибок должны осуществляться в формах, сохраняющих достоинство сотрудника. Это не означает замалчивание проблем, но требует косвенных и уважительных методов коммуникации, которые позволяют скорректировать поведение человека, не разрушая его статус в коллективе. Эмпирические исследования подтверждают практическую ценность такого подхода: было установлено, что в организациях, где менеджмент сознательно заботится о сохранении «лица» своих подчиненных, наблюдается значительно более высокий уровень обмена знаниями и творческой активности [4]. Сотрудник, уверенный в том, что случайная ошибка не приведет к публичному унижению или потере репутации, гораздо охотнее идет на оправданный риск и предлагает инновационные идеи.

Важно понимать, что конфуцианская модель принципиально иначе трактует саму природу организации. Если классические западные теории, такие как модель М. Дженсена и У. Меклинга, рассматривают фирму лишь как «сплетение контрактов» (nexus of contracts) [5] – механическую совокупность индивидов, связанных временными обязательствами, то подход, основанный на «Ли», видит в компании единый социальный организм. Эта модель опирается на традиционное представление о семье как об идеальной структуре отношений, что находит прямое воплощение в корпоративной культуре FOTILE, где принципы «большой семьи» и наставничества стоят выше формальных предписаний [6]. В такой системе связи выстраиваются вокруг долгосрочной опеки, что формирует «социальный капитал благополучия»: сотрудники воспринимают цели организации как свои личные [7]. Это делает структуру исключительно устойчивой. В то время как «транзакционные» компании в кризис прибегают к сокращениям, фирмы наподобие Pangdonglai обеспечивают выживаемость через логику взаимности (报 – «бао»), где высокие зарплаты и социальные гарантии, по имеющимся данным, выступают инвестицией в ответную сверхдисциплину и лояльность персонала, превращая этическую заботу («Жэнь») в измеримый рыночный актив [8]. Системное внедрение таких ценностей позволяет создать целостный каркас управления, успешно работающий даже в условиях глобального культурного многообразия.

Жизнеспособность ритуального управления подтверждается его успешным масштабированием в глобальном контексте, наиболее ярким примером которого является японский менеджмент. Такие специфические японские практики, как «ринги» (稟議 – коллективное принятие решений) и «немаваси» (根回し – предварительное согласование интересов), имеют под собой глубокие философские корни, напрямую связанные с конфуцианским пониманием ритуала [9]. Более того, экспериментальные данные показывают, что западные менеджеры также способны эффективно применять эти принципы при работе с коллективами, если они сочетают конфуцианскую коллективную ориентацию с открытостью к диалогу. Это подтверждает, что ритуал не является исключительной принадлежностью азиатских культур, а представляет собой универсальную технологию настройки социальных связей [10]. В итоге модель управления на основе «Ли» превращает рабочую среду из холодного механического процесса в пространство человеческого развития. Коллективные ритуалы от регламентированных совещаний до церемоний признания заслуг создают общее смысловое поле, которое помогает преодолеть экзистенциальное одиночество сотрудника в цифровом мире. Такой подход не заменяет современные методы менеджмента, но дополняет их этическим фундаментом, делая компанию более привлекательной для талантов и устойчивой к вызовам будущего.

В то же время необходимо учитывать опасность романтизации «конфуцианского менеджмента» и на возможный разрыв между философскими идеалами и реальной управленческой практикой. Поэтому представленный аргумент следует понимать, прежде всего, как нормативный: конфуцианская концепция «Ли» предлагает гуманистическую философскую рамку, которая может служить источником альтернативных подходов к организации труда. В условиях глобальных социальных и технологических изменений такая перспектива позволяет рассматривать организационную жизнь не только как экономический механизм, но и как пространство человеческого развития и коллективного процветания.

Список использованных источников:

1. Sigurdsson, G. Can Ritual Be Modern? Liquid Modernity, Social Acceleration and Li-Inspired Ritual / G. Sigurdsson // European Journal For Philosophy Of Religion. – 2021. – Vol. 13, № 2.

2. КОНФУЦИЙ. ЛУНЬ ЮЙ // ДРЕВНЕКИТАЙСКАЯ ФИЛОСОФИЯ. СОБР. ТЕКСТОВ: В 2 Т. – М., 1972–1973. – Т. 1. – 1972.

3. YUAN, L. CONFUCIAN VIRTUE ETHICS AND ETHICAL LEADERSHIP IN MODERN CHINA / L. YUAN, R. CHIA, J. GOSLING // JOURNAL OF BUSINESS ETHICS. – 2023. – 182, №1. – P. 110-133.

4. THE IMPACT OF MIANZI ON KNOWLEDGE SHARING AND EMPLOYEE CREATIVITY – TAKING THE ORGANIZATIONAL COMMUNICATION CLIMATE AS MODERATOR VARIABLE. – URL: HTTPS://WWW.SEMANTICSCHOLAR.ORG/PAPER/206FE1456683A132E95BB05DF15B159C9CC64011 (DATE OF ACCESS: 23.03.2026).

5. Jensen, M. Theory of the Firm: Managerial Behavior, Agency Costs, and Ownership Structure / M. Jensen, W. Meckling // Journal of Financial Economics. – 1976.– Vol. 3, № 4. – 305–360.

6. Humanistic Management with a Confucian Twist: The Case of FOTILE. – URL: https://www.semanticscholar.org/paper/bc22b51f66ad386213b575f2c0cc67c23d440024 (date of access: 23.03.2026).

7. Zhao, L. A Confucian approach to well-being and social capital development / L. Zhao, J. Roper // Journal of Management Development. – 2011. – Vol.30, №7/8. – P.740–752.

8. Meng, Z. Embedding Confucian Values in Human-Centered Management: Evidence from a Chinese Enterprise / Z. Meng, Q. Yang // Journal of Social Science and Humanities. ─ 2025. – Vol.7, №7. – P.118–125.

9. Konovalov, A.A. Philosophical and Culturological Foundations of Japanese Corporate Culture: A Conceptual Analysis of Ringi-Seido and Nemawashi Practices / A.A. Konovalov // Society: Philosophy, History, Culture. – 2025. – Vol. 12. – P. 233–238.

10. Transforming cross-cultural conflict into collaboration: the integration of western and eastern values – URL: https://www.semanticscholar.org/paper/3ea8b84d25a20737068675cd7609e13318fd4d19 (date of access: 23.03.2026).

ФОРМИРОВАНИЕ ИДЕНТИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ: ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Дубровский П.И., Фатеев И.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

В работе рассматривается влияние цифровизации на формирование идентичности личности. Раскрываются особенности сферы личностного бытия, приватности, социальных взаимодействий, а также анализируется роль алгоритмов в формировании цифровой среды. Показано, что современный человек существует в условиях гибридной субъектности, выступая одновременно субъектом и объектом обработки данных. Особое внимание уделяется противоречию между осознанием цифровых рисков и повседневными практиками пользователей. Делается вывод о необходимости развития цифровой грамотности, а также совершенствования этических и правовых механизмов защиты личности в условиях цифровой реальности.

Цифровая эпоха радикально изменила не только техническую сторону жизни общества, но и сам способ существования человека. Технологии перестали быть внешним инструментом и превратились в среду повседневной жизни. В результате границы между физической и виртуальной реальностью постепенно стираются, формируя единое пространство опыта, в котором человек одновременно действует и как физический, и как цифровой субъект.

Наиболее существенные изменения затрагивают понимание личности. Современный человек существует одновременно в офлайн- и онлайн-среде, причём цифровое присутствие становится всё более значимым. Личность представлена через данные, аккаунты и цифровые следы, которые формируются как самим человеком, так и алгоритмами. Это приводит к множественности и изменчивости идентичности, зависящей от контекста и особенностей цифровых платформ.

В этих условиях трансформируется и само понятие субъекта. Он уже не является полностью автономным, поскольку часть его функций передаётся цифровым системам. Память, коммуникация и социальная оценка всё чаще опосредуются технологиями, что делает человека элементом техносоциальной системы. Возникает новая форма субъектности, в которой границы между человеком и технологией становятся менее определёнными.

Серьёзные изменения происходят и в сфере приватности. Данные о пользователе постоянно собираются и обрабатываются, что делает невозможным полный контроль над ними. Приватность становится ситуативной и зависит от условий взаимодействия с цифровыми платформами, при этом сохраняется разрыв между осознанием рисков и реальным поведением. Это указывает на необходимость развития культуры ответственного обращения с данными.

Алгоритмы играют ключевую роль в формировании современной реальности. Они определяют доступ к информации, создавая персонализированные информационные среды. Влияние алгоритмов распространяется не только на информационное поведение, но и на процессы формирования идентичности. На основе анализа данных алгоритмы приписывают пользователям определённые характеристики, что влияет на их цифровой образ и доступ к ресурсам. Это влияет на восприятие мира и одновременно превращает человека в объект оценки и классификации, что может усиливать социальное неравенство и ограничивать возможности индивидуального развития.

Цифровизация меняет и социальные отношения. Коммуникация становится более доступной, но менее глубокой, а социальное признание всё чаще выражается через количественные показатели. Это влияет на самооценку и эмоциональное состояние человека, усиливая зависимость от цифрового одобрения и внешней оценки.

Таким образом, цифровизация трансформирует не только формы взаимодействия, но и само понимание личности. Человек всё больше включается в систему связей между технологиями, данными и социальными структурами, что открывает новые возможности и одновременно требует осознанного, критического и ответственного отношения к цифровой среде.

Список использованных источников:

1. Кондаков А.М., Костылева А.А. Цифровая идентичность, цифровая самоидентификация, цифровой профиль: постановка проблемы // Вестник РУДН. Серия: Информатизация образования, 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 207–218.

2. Солдатова Г.У., Войскунский А.Е. Социально-когнитивная концепция цифровой социализации: новая экосистема и социальная эволюция психики // Психология. Журнал Высшей школы экономики, 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 431–450.

3. Макатов З.В. Деконструкция алгоритмической идентичности: постструктуралистские перспективы цифровой субъективности // KANT, 2024. – № 4(53). – С. 249–258.

4. Gillespie T. The Relevance of Algorithms // Media Technologies: Essays on Communication, Materiality, and Society / ed. by T. Gillespie, P. Boczkowski, K. Foot. – Cambridge, MA: MIT Press, 2014.

5. Cheney-Lippold J. A New Algorithmic Identity: Soft Biopolitics and the Modulation of Control // Theory, Culture & Society, 2011. – Vol. 28. – No. 6. – P. 164–181.

ЦИФРОВОЕ МЫШЛЕНИЕ VS КРИТИЧЕСКОЕ: ПОЧЕМУ GOOGLE ДЕЛАЕТ НАС ГЛУПЕЕ

Апетёнок И. А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Мозалевская Д. А. – канд. фил. наук, преподаватель

В статье рассматривается влияние привычки к использованию поисковых систем на структуру критического мышления. На основе исследования Б. Спэрроу, Дж. Лю и Д. Вегнера и данных нейронауки анализируется феномен «эффекта Google» и логическая ошибка подмены понятий «доступ = понимание». Показано, что с приходом ИИ-ассистентов проблема приобретает новое измерение.

В эпоху цифровизации человек получил беспрецедентный доступ к информации. Однако возникает закономерный вопрос: не происходит ли одновременно деградация способности самостоятельно мыслить? В данной работе рассматривается то, как привычка к цифровому аутсорсингу памяти влияет на структуру критического мышления, опираясь на эмпирические исследования и логический анализ.

В 2011 году психологи Бетси Спэрроу, Дженни Лю и Дэниел Вегнер опубликовали в журнале Science исследование «Google Effects on Memory» [1]. Участникам предлагалось запомнить фактические утверждения. Одной группе сообщали, что информация сохранится в компьютере, другой – что она будет удалена. Результаты показали: группа, знавшая о сохранении данных, запоминала факты значительно хуже. Участники запоминали не сами факты, а то, где их искать. Мозг перераспределял когнитивные ресурсы: вместо хранения – навигация. Авторы заключили: Google стал «внешним жёстким диском» человеческой памяти.

Критическое мышление – это не знание фактов само по себе, а умение устанавливать связи между ними: находить противоречия, строить аналогии, выдвигать гипотезы. Это навык с широким спектром применения: в образовании он позволяет глубже усваивать материал и генерировать новые идеи; в профессиональной деятельности – принимать взвешенные решения и распознавать манипуляции; в повседневной жизни – противостоять дезинформации и понимать причинно-следственные связи событий. Если факты не хранятся в оперативной памяти, умозаключение рассыпается. В таблице 1 представлено сравнение двух моделей познания.

Таблица 1 – Сравнение двух моделей познания

Внутренняя память + мышление	**Аутсорсинг в поисковые системы**
Факты связываются между собой	Факты изолированы
Возникают аналогии и выводы	Получаем готовый ответ
Критическое мышление активно	Критическое мышление пассивно
Знание как структура	Знание как ссылка

Цифровое общество порождает устойчивое когнитивное заблуждение – силлогизм: «У меня есть доступ к любой информации → следовательно, я информирован». Вывод неверен: доступ к информации ≠ её понимание [1]. Это классическая подмена понятий. Доступ к библиотеке не делает человека читателем; умение найти ответ в поисковой системе не гарантирует осмысленное понимание информации.

Николас Карр в книге «The Shallows» [2] опирается на данные нейронауки: интернет-чтение – это сканирование и прыжки по гиперссылкам, а не линейное глубокое чтение. Глубокое чтение активирует зоны мозга, ответственные за критический анализ: например, при чтении научной статьи читатель удерживает предыдущие аргументы, сопоставляет их с новыми и формирует собственную интерпретацию. Листая же ленту новостей или просматривая ответ поисковика, человек фиксирует лишь поверхностные факты, не выстраивая между ними связей. Уровень активации критического мышления и долгосрочного запоминания в зависимости от типа взаимодействия с информацией показан на рисунке 1. Мозг пластичен: то, как мы используем инструменты, буквально меняет его структуру. Цифровые инструменты – не нейтральны [3].

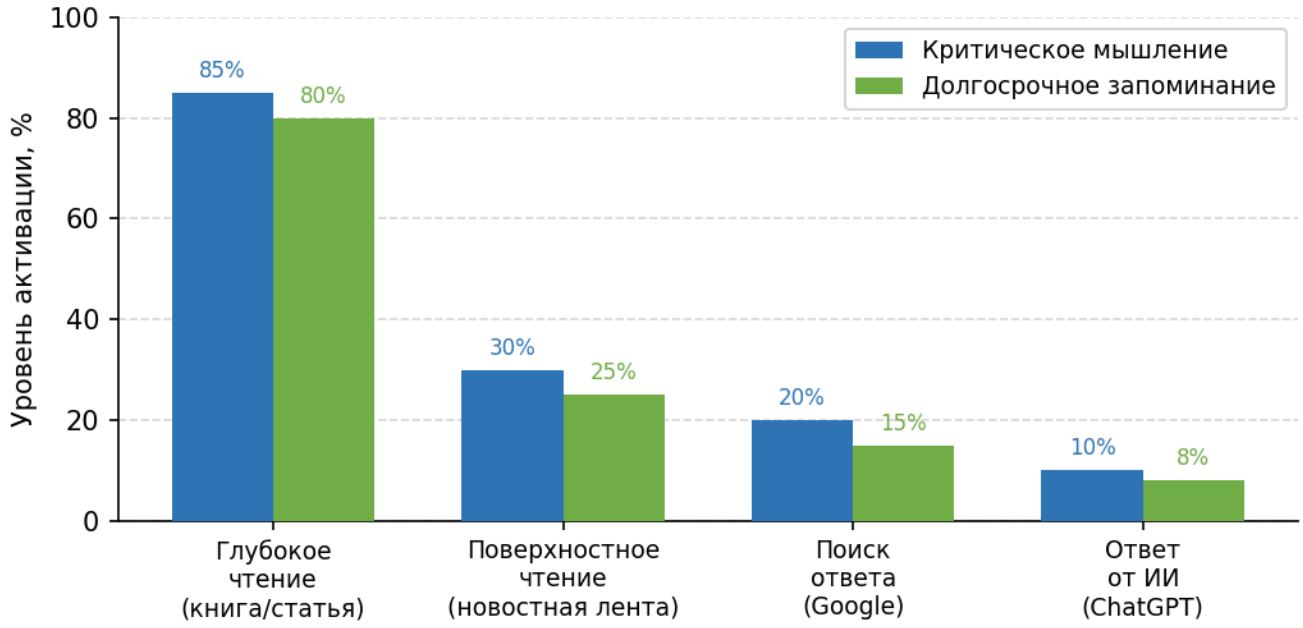


Рисунок 1 – Уровень активации критического мышления и долгосрочного запоминания при разных типах взаимодействия с информацией

Исследование 2011 года касалось Google. Сегодня появились генеративные языковые модели (ChatGPT, Gemini и др.), которые не просто выдают информацию, но формулируют готовые суждения и выводы. Аутсорсинг памяти трансформировался в аутсорсинг рассуждения. При анализе информации, сгенерированной ИИ, важно придерживаться следующего подхода: воспринимать ответ ИИ как отправную точку, а не окончательный вердикт; проверять ключевые утверждения по первичным источникам; самостоятельно сопоставлять несколько точек зрения. Только так пользователь остаётся подлинным субъектом познания, а не пассивным потребителем готовых суждений.

Таким образом, сформулированы следующие выводы. Во-первых, «эффект Google» – эмпирически подтверждённый феномен: внешнее хранилище данных снижает мотивацию мозга к запоминанию [1]. Во-вторых, это не просто проблема памяти, но проблема мышления, поскольку критическое рассуждение опирается на оперативно доступные знания. В-третьих, убеждение «доступ =понимание» является логической ошибкой подмены понятий. В-четвёртых, с приходом ИИ аутсорсинг перешёл с памяти на само рассуждение. В-пятых, решение – не отказ от технологий, а осознанное управление ими: при использовании ИИ необходимо руководствоваться принципами критической верификации (проверять утверждения по первоисточникам), интеллектуальной самостоятельности (формировать собственную позицию до и после запроса) и рефлексии (осознавать, что отдаётся машине, а что – остаётся за человеком). Только при соблюдении этих принципов цифровые инструменты остаются усилителем, а не заменой человеческого разума.

Список использованных источников:

1. Sparrow, B. Google Effects on Memory: Cognitive Consequences of Having Information at Our Fingertips / B. Sparrow, J. Liu, D. M. Wegner // Science. – 2011. – Vol. 333. – P. 776–778.

2. Carr, N. The Shallows: What the Internet Is Doing to Our Brains / N. Carr. – New York : W.W. Norton & Company, 2010. – 276 p.

3. Wegner, D. M. Transactive Memory: A Contemporary Analysis of the Group Mind / D. M. Wegner // Theories of Group Behavior. – New York : Springer, 1987. – P. 185–208.

4. Rosen, L. D. iDisorder: Understanding Our Obsession with Technology / L. D. Rosen. – New York : Palgrave Macmillan, 2012. – 256 p.

5. Kaspersky Lab. Digital Amnesia in Europe: A Research Study into the Impact of the Internet on Human Memory [Электронный ресурс]. – Kaspersky Lab, 2015. – Режим доступа: https://kas.pr/digitalamnesia. – Дата доступа: 25.03.2026.

ВЛИЯНИЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОГО ПОВЕДЕНИЯ И ТРЕВОЖНОСТИ У ЧЕЛОВЕКА

Родевич М.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шепетюк В.В. – канд. фил. наук, доцент

Статья посвящена анализу воздействия рекомендательных алгоритмов социальных сетей на психоэмоциональное состояние пользователей. Рассматриваются механизмы формирования зависимого поведения, рост тревожности, а также социальные последствия цифровой зависимости. Особое внимание уделяется методам защиты и профилактики негативных эффектов, актуальным для специалистов в области информационной безопасности

Современный человек проводит в социальных сетях в среднем от 2 до 5 часов ежедневно. Рекомендательные системы Instagram, TikTok, YouTube стали не просто помощниками в поиске контента, а полноценными управляющими нашего внимания. С позиции курсанта, изучающего информационную безопасность, хорошо заметно, как алгоритмы соцсетей воздействуют на людей: они провоцируют навязчивую проверку уведомлений и усиливают тревогу от переизбытка информации. Как отмечает психолог Адам Альтер, автор книги «Неотразимый», «никогда раньше в истории человечества мы не создавали технологии, способные конкурировать с нами за внимание наших собственных детей» [1]. Цель данной работы – выявить механизмы влияния рекомендательных систем на психику и предложить пути минимизации вреда.

Рекомендательные системы работают на основе сложных алгоритмов машинного обучения, анализирующих поведение пользователя: лайки, время просмотра, паузы, репосты. Их главная цель – удержание внимания любой ценой. Как справедливо отмечает Т.В. Владимирова, «персонализированные рекомендации снижают когнитивную нагрузку пользователя, но одновременно формируют замкнутый информационный пузырь, ограничивающий развитие критического мышления» [2]. Психологический механизм здесь прост: непредсказуемость награды (как в игровых автоматах) вызывает выброс дофамина, формируя стойкую зависимость. Пользователь прокручивает ленту в поисках «того самого» контента, но алгоритм всегда держит его в состоянии неудовлетворенности.

Зависимое поведение, формируемое социальными сетями, имеет четкие диагностические признаки: потеря контроля над временем, проверка телефона сразу после пробуждения, тревога при невозможности зайти в приложение, «синдром фантомной вибрации» (ощущение, что телефон завибрировал). В монографии «Цифровая зависимость: природа и последствия» подчеркивается: «Дофаминовые петли, создаваемые социальными сетями, по своему воздействию на мозг сопоставимы с действием психоактивных веществ» [3]. Личный опыт рефлексии позволяет подтвердить эти выводы: в состоянии усталости или стресса мозг автоматически тянется к привычному источнику быстрого дофамина – прокрутке ленты или проверке сообщений.

Тревожность, порождаемая социальными сетями, имеет несколько источников. Во-первых, это – страх упустить что-то важное. Пользователь постоянно ощущает, что жизнь проходит мимо, а другие живут интереснее. Во-вторых, социальное сравнение: алгоритмы подбирают идеальные картинки, создавая иллюзию, что у всех всё лучше, чем у тебя. В-третьих, информационная перегрузка: мозг не справляется с объемом входящих данных, что приводит к хроническому стрессу. Исследование Е.П. Белинской показывает, что «высокая интенсивность использования социальных сетей коррелирует с повышением уровня тревожности и депрессивных симптомов у молодежи» [4].

Особую опасность рекомендательные системы представляют для детей и подростков, чья психика еще не сформирована. Алгоритмы подбирают контент, вызывающий максимальный эмоциональный отклик, что может приводить к закреплению деструктивных паттернов поведения. Как человек, изучающий информационную безопасность, я понимаю, что эта проблема имеет не только психологический, но и социальный аспект: уязвимые группы населения становятся объектами манипуляций, в том числе политических и коммерческих.

Список использованных источников:

1. Альтер, А. Неотразимый. Психология зависимостей и как с ними бороться. – Москва: Эксмо, 2018. – 416 с.

2. Владимирова, Т.В. Влияние персонализированных рекомендаций на когнитивные процессы пользователей / Т.В. Владимирова // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. – 2024. – № 2. – С. 45–58.

3. Цифровая зависимость: природа и последствия / А.Г. Асмолов [и др.]; под ред. А. Г. Асмолова. – СПб.: Питер, 2023. – 288 с.

4. Белинская, Е.П. Социальные сети и психологическое благополучие молодежи / Е.П. Белинская, А.Е.. Жичкина // Психологические исследования. – 2025. – Т. 18, № 3. – С. 12–24.

ЗАКОНЫ ФОРМАЛЬНОЙ ЛОГИКИ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ

Ковалёв А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

В данной работе представлены примеры отражения четырёх основных законов формальной логики в программировании – законов тождества, непротиворечия, исключённого третьего, достаточности основания. Показаны возможные причины допущения логических ошибок в процессе написания кода, а также доказательства применимости этих законов.

При работе с программами нужно учитывать то, что, помимо грамотного синтаксиса, важной составляющей правильно работающего кода является отсутствие логических ошибок, которые возникают при неверном применении логических законов в данном контексте.

К законам формальной логики относят закон тождества, непротиворечия, исключённого третьего и достаточного основания. Каждый из них в той или иной мере проявляется при создании программы, обеспечивая такие свойства кода, как определённость, непротиворечивость, последовательность, обоснованность. Далее пойдёт речь о влиянии каждого из этих законов на код.

Закон тождества

Закон тождества гласит: сущность должна оставаться сама собой в рамках одного контекста рассуждения. Соблюдение этого закона обеспечивает *определённость.*

Примером может быть использование оператора присваивания (=) вместо оператора равенства (==) в при проверке условия, что часто встречается у новичков. Для предотвращения этого в IDE Visual Studio 2022 существует официальное предупреждение, подчёркивающее данную ошибку зелёной волнистой линией.

Подмена понятий – одно из проявлений нарушения закона тождества в логике. Ещё одним ярким примером нарушения закона тождества является попытка сравнения знаковых и беззнаковых чисел: в языках программирования одна и та же битовая последовательность может иметь разные значения в зависимости от того, учтён ли знак. Обычно отрицательные числа переводятся компьютером в двоичные посредством «дополнительного кода». Это значит, что вначале биты числа инвертируются, а затем к ним добавляется единица [1].

Пример:

Запишем в двоичном виде число 37, деля его и последующие целые части частных столбиком на 2 и записывая остатки в обратном порядке.

– 37 : 2 = 18 (ост. 1);
– 18 : 2 = 9 (ост. 0);
– 9 : 2 = 4 (ост. 1);
– 4 : 2 = 2 (ост. 0);
– 2 : 2 = 1 (ост. 0);
– 1 : 2 = 0 (ост. 1).

Таким образом получаем остатки 1, 0, 1, 0, 0, 1. $37_2 = 100101$.

Если 37 – это переменная типа char – она занимает в памяти 1 байт, то есть имеет 8 битов под 1 или 0, а само число 37 записывается 6 цифрами. Все недостающие цифры заполняются нулями перед первой:

char num = 37; // 00100101.

Теперь получим из этого отрицательное число. Для этого нужно провести побитовую операцию отрицания, а затем добавить к результату число 1 (рис. 1).

```
~ 00100101
  11011010

+ 11011010
  00000001
  11011011
```

Рисунок 1 – Получение отрицательного значения от char num = 37 методом дополнительного кода

Знаковое число (signed), применяемое по умолчанию при отсутствии знакового спецификатора перед именем переменной, может принимать 256 значений ($2^8 = 256$ комбинаций) в диапазоне [-128; 127]. Первый бит такого числа является знаковым. Если он равен единице, то число отрицательное. Беззнаковые переменные в свою очередь имеют обязательный спецификатор перед их названием.

Такие числа всегда обладают неотрицательным значением, а это значит что unsigned char будет вмещать числа от 0 до 255. При этом первый бит числа будет определять не знак, а значение, как и все остальные биты числа. Проблемы начинаются как раз при наличии отрицательного знака. Конкретно нарушение закона тождества кроется в том, что одна и та же битовая последовательность (11011011) трактуется компьютером в одном и том же контексте (операция сравнения) как два совершенно разных значения (-37 и 219).

Закон непротиворечия классической логики гласит: два противоречащих суждения о предмете не могут быть одновременно истинными в одно и то же время и в одном и том же отношении. Этот закон помогает выявлять ложь, а его соблюдение обеспечивает *непротиворечивость.*

В программировании простейшие случаи этого закона соблюдаются всегда. Например, никакая переменная не может иметь одновременно два разных значения. При присваивании ей нового значения старое моментально теряется.

Закон исключённого третьего предполагает, что третьего не дано. В программировании же третье — это всегда ошибка, неучтённый случай или состояние неопределённости. Соблюдение этого закона обеспечивает логическую *последовательность.*

Закон исключенного третьего позволяет компьютеру «однозначно решить, куда переходить дальше». Его проявление происходит в стандартных случаях, например при использовании условного оператора. Оператор if-else имеет только два «состояния» – истина и ложь, остальные конструкции этого оператора можно представить в виде последовательности простых условных операторов.

Ещё одним примером могут служить указатели в языке Си. Два состояния, например, в языке Си могут иметь указатели – они либо могут указывать на какую-то переменную со своим значением, либо возвращать NULL (ложное состояние). Практическое применение это находит при работе с динамической памятью, когда функция malloc может возвращать NULL при ошибке выделения памяти [2]. В программировании бывают случаи, когда «ошибка» считается отдельным состоянием, вдобавок к «истине» и «лжи», например, при проверке пользовательского ввода.

Интересно следующее: концепция «кубитов», являющихся основой гипотетических квантовых компьютеров, основывается на том, что данные находятся «в суперпозиции» и один бит может являться не только 1 либо 0, но также 1 и 0 одновременно [3]. Это нарушает закон непротиворечия (два противоположных состояния объекта истинны в одно и то же время) и закон исключения третьего (наличие трёх состояний у, казалось бы, бинарного разряда). Для таких компьютеров существую отдельные правила квантовой логики.

Также при работе с SQL используется трёхзначная логика, к которой неприменим закон классической логики о исключенности третьего. Приходящие данные могут быть TRUE или FALSE (истина или ложь), при сравнении значений, но NULL в SQL обозначает «маркер потерянной информации». При сравнении чего-либо с NULL получается результат UNKNOWN, который не приписывается ни к TRUE, ни к FALSE, потому что имеет вероятностный характер [4].

Закон достаточного основания гласит: только такое суждение может быть признано истинным, которое имеет такие основания, из которых истинность следует с логической необходимостью, как следствие из причины. Соблюдение этого закона обеспечивает *обоснованность.*

Ни одна команда не должна выполняться без обусловленной на то причины. У каждой важной операции должно быть явное, проверенное условие, причём «границы достаточности» основания устанавливаются условием задачи или самим программистом: если программа не подразумевает деления на ноль, нужно чётко это обозначить через оператор assert. В противном случае допускается константа inf, равная бесконечности, получаемая по умолчанию при попытке деления на ноль.

Неявные основания для выполнения строк кода не нужно писать вручную: для выполнения вывода на экран «printf(“Hello world\n”);» требует для себя одного основания: выполнение программы дошло до текущей строки, функции записи в файл требуют основанием открытый файл и т. д. При попытке записать строку в неоткрытый файл программа прервётся с всплывающим окном об ошибке.

Необходимость достаточности оснований просматривается также и при непосредственно логическом осмыслении задачи, не поощряя избыточный код.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что соблюдение основных технических принципов работы программы (определённость, непротиворечивость, последовательность, обоснованность) обусловлено четырьмя главными логическими законами, а логические ошибки происходят при их неправильном применении или пренебрежении ими.

Список использованных источников:

1. Назарова Н. Кодирование информации и её единицы измерения / С. Назарова // Наука и мировоззрение. – 2024. – №28. – С. 1-6.

2. Основы алгоритмизации и программирования. Язык Си : учебное пособие / М. П. Батура [и др.]. – Минск : БГУИР, 2007. – 240 с.

3. Универсальный квантовый компьютер – впереди времени и технологий / С. Килин // Наука и инновации. – 2023. – №8(246). С. 10-17.

4. Учебник языка SQL – Трехзначная логика и предложение Where. Режим доступа: https://sql-tutorial.ru/ru/book/second_phase_of_testing/typical_problems/three_valued_logic_and_where_clause – Дата доступа: 20.02.2026.

ФЕНОМЕН ХИКИКОМОРИ В КОНТЕКСТЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО СПОСОБА БЫТИЯ

Ковчур П. Д., Житник А. Д., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И. М. – канд. фил. наук, доцент

В данной работе феномен хикикомори анализируется в философском ключе как проявление трансформации человеческого способа бытия в цифровом обществе, где добровольная изоляция выступает экзистенциальным ответом на жёсткие требования социальной успешности и онтологическую неуверенность.

Япония – страна, стоящая на пике технологического прогресса – столкнулась с проблемой добровольной самоизоляции, которая достигла настолько больших масштабов, что для данного явления был создан отдельный термин – «хикикомори» [1]. В итоге традиционная для философии и психологии проблематика одиночества изменяется и приобретает совершенно новые оттенки в цифровом обществе. «Хикикомори» показывает, что современный способ бытия переживает кризис, заставляющих задуматься о значении «быть с другими» или «быть собой».

Экзистенциальный ракурс позволяет рассмотреть феномен как одну из крайних форм бегства от тревоги, ожиданий общества, ответственности, что поднимается в темах Жан-Поль Сартра, Альберта Камю и других представителей экзистенциализма. Человек, который в побеге от реальности закрывается в своей комнате, не считается «больным», а рассматривается как субъект, который столкнулся с жесткими нормами оценки успешности, постоянной конкуренцией и сравнением себя с другими. Каждая попытка выйти в мир рассматривается как необходимость делать выбор, действовать, нести последствия каких-либо решений и уход в изоляцию в такой ситуации уменьшает уровень тревоги перед неопределенностью и возможным провалом [2, 3].

С внешней точки зрения радикальное самоограничение может рассматриваться как потеря свободы. Тогда возникает ключевой философский вопрос: будет ли являться такой уход актом свободы или же напротив – формой несвободы? Если считать свободу в экзистенциальном смысле не только возможностью выбора, но и способностью выдерживать ответственность и встречаться с другими как равноправный участник бытия, то замкнутость хикикомори скорее выглядит как уход от свободы, чем её реализацией.

Термин онтологической безопасности применялся для определения того, насколько человек может ощущать безопасность в своём существовании и чувстве «себя» [4]. В этом свете уход в комнату и добровольная изоляция могут восприниматься как попытка вновь обрести контроль над собственным пространством и временем. Человек «сворачивает» мир до размеров комнаты, где он, по крайней мере, может держать ситуацию в своих руках. Встает другой вопрос: не является ли общество, навязывающее жёсткие сценарии успеха, соавтором феномена «хикикомори»? Если общество предъявляет к человеку жёсткие требования в плане эффективности, продуктивности и при этом оставляет мало возможностей для альтернативных форм существования, то отказ от участия в таком порядке выглядит как логическая реакция. С такой точки зрения «хикикомори» выступает как симптом онтологической неуверенности: человек не сумел взять на себя ответственность за какой-то сценарий и выбирает полное отсутствие роли, чтобы не быть «неполноценным».

Феномен «хикикомори» заставляет задуматься о том, что в современном обществе одиночество – не частная проблема. В условиях технической развитости и ужесточенных требований свобода и ответственность оказываются не только возможностью самореализации, но и источником беспокойства и усталости. Такая перспектива ставит перед философией задачу не «исправления» хикикомори как индивидов, а вопрос о том, какие условия должен создавать человеко-ориентированный мир, чтобы свобода не была экзистенциальным грузом, а одиночество – не ответом на ощущение непригодности к сценариям жизни. В этом смысле анализ хикикомори побуждает не только к переосмыслению одиночества, но и к переоценке тех моделей общества, в которых отказ от участия становится, по сути, одним из последних «дозволенных» актов субъективности.

Список использованных источников:

1. Сергеева, Д. Д. Десоциализация в цифровом обществе как культурно-психологический феномен / Д. Д. Сергеева, Ю. В. Ситникова, О. Ю. Андреева // Роль и место студента медицинского образовательного учреждения в реализации региональных проектов здравоохранения. – 161 с.

2. Кибальник, А. В. Социальный эскапизм в молодежной среде / А. В. Кибальник, И. В. Федосова // Казанский педагогический журнал. – 2020. – № 2 (139). – С. 222-229.

3. Давыдов, О. Б. Философский аспект социального эскапизма в эпоху виртуальности / О. Б. Давыдов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2015. – Т. 12, № 2. – С. 77-81.

4. Худайкулова, А. В. Концепция онтологической безопасности в международно-политическом дискурсе / А. В. Худайкулова, Н. Я. Неклюдов // Вестник МГИМО Университета. – 2019. – № 6 (69). – С. 129-149.

ЗАКОНЫ ЛОГИКИ И АРГУМЕНТАЦИЯ В РЕКЛАМЕ

Воробьева К. В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И. М. - канд. фил. наук, доцент

В работе анализируется нарушение фундаментальных законов логики в аргументации современной рекламы в условиях баннерной слепоты и информационной перегрузки. Актуальность обусловлена ростом манипулятивных приёмов, позволяющих обходить рациональный анализ потребителя и формировать иррациональное поведение. Доказано, что рекламодатели активно используют неформальные логические ошибки для манипуляции сознанием. Выявлены и систематизированы наиболее распространённые нарушения в рекламной аргументации. Показано, что они эффективно обходят критическое мышление и способствуют иррациональному потреблению. Рассмотрены теоретические основы ошибок, выделена их типология в контексте рекламы, проанализированы механизмы воздействия при дефиците внимания и установлена связь между логическими нарушениями и желаемым поведением потребителя.

Реклама давно превратилась в одно из наиболее массовых и влиятельных явлений в системе средств массовой коммуникации. Она выступает неотъемлемой и весьма значимой составляющей современной культуры, оказывая глубокое и многогранное влияние не только на отдельного индивида, но и на общество в целом [9]. В наши дни реклама буквально окружает человека повсеместно — от экранов смартфонов и компьютеров до уличных щитов и телевизионных трансляций — и прочно вошла в структуру повседневной жизни. Однако именно эта чрезмерная частота и интенсивность контактов с рекламными сообщениями приводит к постепенному снижению внимания потребителя. Люди перестают обращать должное внимание на рекламу, воспринимая её как неизбежный фон. Это явление получило название баннерной слепоты — одного из наиболее изученных когнитивных феноменов цифровой эпохи. Под баннерной слепотой понимается психолого-поведенческое явление, при котором пользователь интернета, а также цифровых медиа в целом, бессознательно игнорирует рекламные элементы, такие как баннеры, блоки, всплывающие окна и другие визуальные конструкции, даже если они находятся в зоне прямой видимости. Мозг автоматически фильтрует всё, что напоминает шаблонную рекламу, чтобы сосредоточиться на основном контенте.

В таких условиях основная цель современной рекламы существенно смещается. Если раньше акцент делался на демонстрации реальных преимуществ товара или услуги, то теперь приоритет отдаётся способности «зацепить» внимание хотя бы на несколько секунд и вызвать быструю, часто иррациональную эмоциональную реакцию. Реклама вынуждена прибегать к приёмам, которые нередко нарушают фундаментальные законы логики и порождают разнообразные неформальные ошибки. Как подчёркивает О.Б. Коренная, современная рекламная аргументация в большинстве случаев строится не на строгой логической связи между тезисом, аргументами и демонстрацией, а на особенностях человеческого восприятия, психологических слабостях и когнитивных искажениях [5]. Аналогичные тенденции отмечает Е.П. Невельская-Гордеева: даже в журналистских и информационных текстах всё чаще встречаются подмена понятий, фрагментарность изложения, противоречивая подача материала и чрезмерное упрощение сложной действительности. Автор приходит к выводу, что современная аргументация в целом остро нуждается в усилении логического обеспечения и критического подхода [2].

А. Никольский в своей монографии определяет логические ошибки как случайные или, что гораздо чаще встречается в рекламе, намеренные искажения фактов, рассуждений, выводов, предпосылок или связей между ними [3]. В рекламной практике подавляющее большинство искажений носит именно осознанный и целенаправленный характер. Особое место среди них занимают неформальные логические ошибки, поскольку они позволяют максимально быстро и эффективно обойти рациональный анализ потребителя и оказывать прямое воздействие на эмоции, ассоциации, стереотипы восприятия и подсознательные мотивы. На основе классификации неформальных логических ошибок А. Никольского [3] и анализа рекламной аргументации О.Б. Коренной [5] были выделены несколько наиболее характерных нарушений, которые напрямую связаны с фундаментальными законами логики, изложенными в учебнике Г.И. Малыхиной [1].

Одним из самых широко распространённых приёмов остаётся ложное установление причинно-следственной связи, известное как ошибка «после этого — значит вследствие этого». Реклама нередко утверждает, что желаемый результат, будь то красота, крепкое здоровье, финансовый успех или социальный статус, наступил именно благодаря использованию данного продукта, опираясь исключительно на временную последовательность событий и полностью игнорируя другие возможные факторы влияния. Такое нарушение закона достаточного основания формирует у потребителя устойчивую иллюзию гарантированной эффективности товара. Например, в рекламе Red Bull человек мгновенно бежит быстрее после банки напитка, создавая иллюзию, что именно энергетик даёт сверхъестественную энергию, игнорируя другие факторы.

Не менее мощным и повсеместно применяемым инструментом выступает апелляция к эмоциям. Вместо предоставления логических доводов или объективных фактов реклама активно эксплуатирует сильные аффективные состояния, среди которых страх потери чего-то важного, чувство вины перед близкими, любовь к семье и друзьям, зависть к более успешным людям или гордость за принадлежность к определённой группе. Этот приём особенно эффективен в условиях дефицита внимания, поскольку эмоциональная реакция возникает гораздо быстрее, чем любое критическое осмысление, и успешно замещает собой рациональное обоснование преимуществ продукта [7]. Ярким примером является кампания WWF с полярным медведем, закрывающим лапами глаза и вопросом «What on earth are we doing to our planet?», вызывает чувство личной вины за глобальное потепление, замещая рациональный анализ эмоциональным давлением.

Другой часто встречающийся приём — апелляция к большинству. Рекламное сообщение строится вокруг утверждения, что правильность или выгодность выбора подтверждается тем, что большинство уже выбрало, миллионы людей используют данный продукт или все вокруг так делают. В результате вместо точного и честного описания реальных свойств товара потребителю навязывается эмоциональное чувство принадлежности к большинству, что нарушает закон тождества и подменяет факты социальным давлением. В рекламе Sensodyne фраза «9 out of 10 dentists recommend» подаётся как доказательство превосходства, хотя большинство стоматологов рекомендуют несколько качественных паст. Аналогично Maybelline Great Lash Mascara использует «America's favorite» и «продаётся каждые 1,7 секунды».

Нередко применяется конструкция ложной дилеммы. Потребителю искусственно предлагаются лишь два крайних варианта: либо купить продукт и обрести счастье, либо отказаться от покупки и продолжать страдать и жалеть об упущенной возможности. Хотя в реальности существует множество промежуточных, альтернативных и даже более рациональных решений, такое сужение выбора нарушает принцип достаточного основания и создаёт ложную иллюзию единственно правильного пути. Слоган McDonald's «You deserve a break today» подразумевает: либо мучиться дома с рутиной, либо получить «заслуженный отдых» в ресторане, хотя существует множество других способов отдохнуть.

Ещё одним распространённым приёмом является апелляция к авторитету. Истинность утверждения обосновывается ссылкой на эксперта, ведущего врача, известных учёных или знаменитостей без предоставления каких-либо доказательств их реальной компетентности, независимости исследований или отсутствия коммерческого интереса. В этом случае закон достаточного основания подменяется чисто эмоциональным доверием к статусу или публичному имиджу. Недавним примером является кампания American Eagle с Сидни Суини «Sydney Sweeney HAS GREAT JEANS» играет на омонимии «jeans/genes», создавая иллюзию, что джинсы дадут генетическую красоту знаменитости.

Таким образом, в работе доказано, что использование логических ошибок в современной рекламной аргументации представляет собой не случайные недочёты или технические просчёты, а вполне осознанный, целенаправленный и высокоэффективный инструмент повышения воздействия в условиях острого дефицита внимания и информационной перегрузки. Было показано, что существует острая общественная необходимость в развитии критического мышления у потребителей, а также в повышении этических стандартов и нормативного регулирования в рекламной индустрии. Практическая значимость работы заключается в возможности широкого применения предложенной типологии неформальных логических ошибок для анализа и критической оценки рекламных сообщений в рамках учебных курсов по логике, теории аргументации, рекламоведению, психологии потребления, медиакритике и этике коммуникаций. Полученные материалы могут послужить надёжной основой для дальнейших научных исследований влияния искусственного интеллекта на эволюцию манипулятивных техник в рекламе, а также для разработки конкретных практических рекомендаций по распознаванию, противодействию и нейтрализации логических манипуляций в повседневной коммуникации потребителя.

Список использованной литературы:

1. *Логика: уч. пособие / Г. И. Малыхина. – изд. 3-е, испр. – Минск: Вышэйшая школа, 2013. – 333 с.*
2. *Логика в журналистской аргументации / Невельская-Гордеева Е. П. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. - 2011. - №3-4. – С. 375-380.*
3. *Логические ошибки: монография / Никольский А. – 34 с.*
4. *Логические ошибки и паралогические приемы манипуляции в СМИ / Ермакович Екатерина Евгеньевна // Экология языка и коммуникативная практика. - 2016. - №1. – С. 1-9.*
5. *Логико-аргументативный аспект в современной рекламе / Коренная О.Б. // Вестник Амурского государственного университета. - 2017. - №78. – С. 33-37.*
6. *Манипулятивные приемы в рекламе: уч. пособие / Рюмшина Л.И. – Москва: Издательский центр «Март», 2004. – 240 с.*
7. *Особенности использования когнитивных искажений в нативной рекламе / Глухова Елена Сергеевна // Филология: научные исследования. - 2024. - №2. – С. 90-102.*
8. *Ошибки в рекламных текстах / Никитина Ю. Н // Вестник УРАО. - 2006. - №2. – С.78-84.*
9. *Языковая игра как причина ошибок в рекламных текстах / Постных Е.О. // Вестник УрФУ. - 2017. - №28. – С. 84-86.*

УДК 123.1:004

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА СВОБОДУ ЧЕЛОВЕКА В КОНТЕКСТЕ ТЕОРИИ ЗИГМУНДА ФРЕЙДА

Рязанова С.Е., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Мащитько С.М. – канд. фил. наук, доцент

В статье исследуется парадоксальное влияние цифровых технологий на свободу личности через призму психоаналитической теории Зигмунда Фрейда. Доказывается, что информационные среды, расширяя операционные возможности человека, одновременно сужают пространство его внутренней автономии, систематически воздействуя на конфликтные структуры психики: бессознательные импульсы («Оно»), рациональное «Я» и внутренние запреты («Сверх-Я»). Анализ выявляет механизмы формирования «цифрового Сверх-Я» и эксплуатации принципа удовольствия, ведущие к новой форме невротической зависимости. В качестве решения предлагается не отказ от технологий, а развитие практик осознанного взаимодействия с ними – «гигиены цифрового Я», направленной на укрепление психологической зрелости и критической рефлексии.

Свобода традиционно понимается как деятельность, не обусловленная внешними по отношению к субъекту причинами. Однако психоаналитическая теория Зигмунда Фрейда вносит в это понимание принципиальную коррективу, показывая, что подлинная несвобода индивида коренится в его собственной психике, расколотой внутренними конфликтами. Актуальность фрейдовского подхода в цифровую эпоху заключается в том, что информационные технологии оказывают системное влияние на глубинные структуры личности, описанные Фрейдом, создавая новые формы контроля и зависимости. Таким образом, классическая теория становится ключевым инструментом для диагностики современного состояния свободы.

Цель исследования: на основе концепции структуры личности Зигмунда Фрейда проанализировать парадоксальное влияние информационных технологий на свободу человека, заключающееся в одновременном расширении возможностей и порождении новых несознаваемых ограничений.

Цель определила задачи:

1) изучить основные положения теории Фрейда о конфликтной природе психики;

2) рассмотреть, каким образом цифровые среды воздействуют на инстанции «Оно», «Я» и «Сверх-Я», формируя новые механизмы несвободы;

3) предложить ориентиры для индивидуального преодоления цифрового отчуждения через принципы психоаналитической рефлексии.

Согласно Фрейду, движущей силой психики является бессознательное («Оно»), руководствующееся принципом удовольствия и состоящее из вытесненных влечений. Противостоящее ему «Сверх-Я» представляет собой строгого внутреннего критика и цензора, который формируется под влиянием воспитания, морали и требований общества. Сознательное «Я» оказывается полем постоянного конфликта между этими силами, а его свобода – не данностью, а достижением. Свобода возможна лишь через осознание бессознательных импульсов и их сублимацию в социально приемлемую деятельность. Однако в цифровую эпоху сами условия этой работы «Я» радикально меняются.

Информационные технологии, взаимодействуя с каждой инстанцией психики, систематически осложняют задачу «Я». Во-первых, они напрямую эксплуатируют «Оно», предлагая немедленное удовлетворение через бесконечный скроллинг, персонализированный контент и игровые механики, что ослабляет способность к отсрочке удовольствия и усиливает импульсивность. Во-вторых, они формируют новое, «цифровое Сверх-Я», источником норм для которого становятся не традиционные институты, а алгоритмы одобрения (лайки, рейтинги) и публичное осуждение в социальных сетях. Это создает внутренний цензор, действующий непредсказуемо. В-третьих, «Я» оказывается перегружено потоком информации и необходимостью поддерживать цифровые идентичности, что ведет к регрессу в примитивные психологические защиты – отрицание, избегание, проекцию. Возникающий «информационный пузырь» алгоритмически ограничивает картину мира, подменяя принцип реальности его симуляцией.

Парадокс заключается в том, что те же технологии предлагают иллюзию решения порождаемых ими проблем. Психотерапевтические чат-боты и анонимные цифровые собеседники, к которым пользователи проявляют больше откровенности, чем к живому человеку, имитируют метод «разговорной терапии» Зигмунда Фрейда. Однако эта коммуникация, лишенная подлинной эмпатии и трансфера, рискует стать лишь новой формой рационализации и бегства от реальных межличностных отношений, которые Фрейд считал основой для исцеления. Цифровая среда поощряет жизнь по принципу удовольствия, которая, как предупреждал Фрейд, ведет к неврозу и зависимости, а не к свободе.

Таким образом, философия и психология в цифровую эпоху должны способствовать развитию критической рефлексии, направленной не вовне, а на механизмы работы собственной психики в среде

технологий. Задачей является не отказ от цифровых инструментов, а формирование «гигиены цифрового Я» – осознанной практики взаимодействия, при которой человек учится распознавать манипулятивное воздействие на «Оно» и «Сверх-Я» и укреплять автономию своего сознательного «Я». Это предполагает медийную грамотность, технологический аскетизм и культивирование живого диалога как пространства подлинной вербализации и проработки внутренних конфликтов.

Вывод: Анализ через призму теории Фрейда показывает, что информационные технологии, расширяя операционные возможности человека, сужают пространство его внутренней свободы, систематически воздействуя на бессознательные импульсы и внутренние запреты психики. Стремительное развитие в цифровой сфере требует не менее интенсивного развития сознательного самопознания, целью которого должно стать не бегство от технологий, а достижение нового уровня психологической зрелости, позволяющего использовать их, не попадая в зависимость от создаваемых ими иллюзорных удовольствий и навязанных норм.

Список использованных источников:

1) Абишева, А. Проблема свободы и самоотчуждения личности / А. Абишева // Адам әлемі. – 2024. – Vol. 102, No. 4. – P. 3-13. – DOI 10.48010/aa.v102i4.549. – EDN SJVODG.

2) Арапова, Э. А. Философия человека: идея "homo natura" в учении З.Фрейда / Э. А. Арапова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2011. – № 3. – С. 180-182. – EDN NYCAHD.

3) Кар, Бретт. Правила жизни от Зигмунда Фрейда / Бретт Кар ; [пер. с англ. Т. О. Новиковой]. - Москва: Э, 2015. - 156, [1] с. : (Великие мысли великих людей); ISBN 978-5-699-84113-4

4) Кириленко, Галина Георгиевна. Краткий философский словарь [Текст] / Г. Г. Кириленко, Е. В. Шевцов. - Москва: АСТ [и др.], 2010. - 479 с.; 20 см. - (Высшее образование).; ISBN 978-5-17-067231-8

5) Коптева, Н. В. Здоровые и патологические стратегии поиска счастья в связи с Интернетом / Н. В. Коптева // Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования. – 2018. – Т. 7, № 6А. – С. 16-25. – EDN OHBPBW.

6) Морозова, А.Н. Сознание человека как объект социально-гуманитарных технологий, рекламы и пиар-манипуляций с.495-497 / Компьютерные системы и сети : сборник статей 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2025 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2025. – 626 с.

7) Тополь Э. Искусственный интеллект в медицине : Как умные технологии меняют подход к лечению / Э. Тополь. - М. : Альпина Паблишер, 2022. - 398 с. - ISBN 9785961429206.

UDC 123.1:004

THE IMPACT OF INFORMATION TECHNOLOGIES ON HUMAN FREEDOM IN THE CONTEXT OF SIGMUND FREUD'S THEORY

Razanava E.S., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Mashutko S.M. – PhD in Philosophy

Annotation. The article explores the paradoxical impact of digital technologies on individual freedom through the lens of Sigmund Freud's psychoanalytic theory. It is argued that information environments, while expanding human operational capabilities, simultaneously narrow the space of internal autonomy by systematically affecting the conflicting structures of the psyche: unconscious impulses (the "Id"), the rational "Ego," and internal prohibitions (the "Superego"). The analysis reveals mechanisms of "digital Superego" formation and the exploitation of the pleasure principle, leading to a new form of neurotic dependence. As a solution, the author suggests not a rejection of technology, but the development of conscious interaction practices – "digital Ego hygiene" aimed at strengthening psychological maturity and critical reflection.

Keywords. freedom, Sigmund Freud, psychoanalysis, personality structure, information technologies, digital addiction, the unconscious, Superego, digital Superego, digital Ego hygiene.

ФИЛОСОФИЯ ОБРАЗОВАНИЯ В ЭПОХУ ГЛОБАЛИЗАЦИИ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОБУЧЕНИЮ

Кравцова А.Б., Федорович А.Л., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

В статье рассматривается трансформация философии образования под влиянием глобализации. Анализируются новые подходы к обучению: личностно-ориентированный, толерантно-коммуникативный и технологически-инновационный, направленные на формирование адаптивной личности в многокультурном мире. Особое внимание уделяется балансу универсализма и культурной идентичности, а также их практическим стратегиям интеграции. Рассматриваются ключевые подходы: субъект-субъектное взаимодействие в обучении, развитие толерантности и внедрение цифровых технологий для персонализации траекторий.

Глобализация как сложный процесс охватывает экономическую, политическую и культурную сферы, закономерно изменяя систему образования. Сегодня, когда национальные границы становятся всё более прозрачными, а цифровые коммуникации и культурное разнообразие растут, образовательные системы вынуждены пересматривать свои мировоззренческие и методические основы. Особую значимость приобретает анализ новых философских подходов к обучению – личностно-ориентированного, толерантно-коммуникативного и технологически-инновационного – а также выявление возможностей их интеграции в образовательную практику.

Современная философия образования эволюционирует от технократической модели к гуманистической, акцентирующей ценность индивидуальности, толерантности и инновационности. Личностно-ориентированный подход утверждает, что обучение становится подлинным тогда, когда оно обращено к уникальным потребностям, интересам и потенциалу каждого студента. В рамках этого подхода образование обретает смысл как условие самореализации, а его ключевым механизмом выступает субъект-субъектное взаимодействие педагога и обучающегося. Преподаватель превращается из передатчика знаний в помощника, создающего среду для познавательной инициативы, а образовательная траектория строится как диалог, где студент проявляет активность в выборе содержания, форм и темпа обучения. На практике это реализуется через такие методы, как проектная деятельность, проблемное обучение, портфолио.

В эпоху глобальной миграции, цифровых контактов и усиления культурного разнообразия толерантность перестает быть моральным требованием и превращается в стратегический ресурс общественной устойчивости. Толерантно-коммуникативный подход в образовании направлен на формирование установок открытости и уважения к инаковости. Он исходит из того, что подлинный межкультурный диалог возможен лишь при условии сохранения глубокой связи человека с собственной культурой. Именно здесь достигается баланс между универсализмом глобальных ценностей и культурной самобытностью. Следуя данному подходу, образование призвано помочь человеку удерживать перспективу: быть открытым миру, но при этом сохранять связь со своими корнями.

В рамках технологически-инновационного подхода цифровая трансформация образования предоставляет средства для воплощения личностно-ориентированного и толерантно-коммуникативного подходов в широкой практике. Современные адаптивные платформы, интеллектуальные системы, цифровые среды позволяют выстраивать индивидуальные образовательные траектории, учитывающие не только академическую успеваемость, но и когнитивные стили, мотивационную сферу, культурные особенности. Использование цифровых инструментов для персонализации в условиях дистанционного обучения дает возможность анализировать активность студентов и предлагать им материалы, соответствующие их запросам.

Глобализация ставит перед философией образования задачу переосмысления традиционных представлений о целях и методах обучения. Личностно-ориентированный подход, толерантность как критерий воспитания и инновационные технологии образуют три направления новой образовательной парадигмы. Их сочетание позволяет снять противоречие между стремлением к универсальности знаний и необходимостью сохранения культурной идентичности, сформировать у молодежи качества, необходимые для жизни в многокультурном и динамичном мире. Реализация таких принципов требует системных преобразований: корректировку учебных планов, повышение квалификации преподавателей и обновление технологической инфраструктуры.

Список использованных источников:

1. *Философия. Практикум / Г. И. Малыхина [и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – 260 с.*
2. *Огурцов, А. П. Философия образования сегодня / А. П. Огурцов. – М. : Просвещение, 2005. – 168 с.*
3. *Иванова, Е. П. Педагогическая толерантность в образовании / Е. П. Иванова. – Астана : ЕНУ, 2024. – 156 с.*
4. *Блохина, Ю. В. Глобализация и образование / Ю. В. Блохина. – Н. Новгород : ННГУ, 2008. – 182 с.*

ЭСТЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МУЗЫКАЛЬНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ: ПРОБЛЕМА ОБЪЕКТИВНОСТИ

Врублевский И. Е., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

Работа посвящена исследованию основных подходов к определению критериев эстетической оценки музыкальных произведений. На основе идей И. Канта, Э. Ганслика и современной методологии А. Фломастера исследуется переход от субъективистского подхода «дометрической эпохи» к системному анализу творчества. В статье показано, что объективность в искусстве аналогична метрической системе: это необходимый «общий язык», защищающий культуру от спекуляций и цифрового шума. Установление четких критериев оценки (техника, форма, стиль) рассматривается как способ преодоления кризиса авторитетов и сохранения ценностной иерархии в эпоху постмодерна.

Вопрос о наличии объективных критериев в искусстве остается одним из центральных в эстетике, особенно в условиях цифрового постмодерна, где границы между профессиональным и любительским творчеством существенно размыты. Традиционное противоречие между субъективным восприятием и стремлением выявить универсальные закономерности в музыке проявляется в современных попытках упорядочивания музыкального опыта. Если рассматривать музыку как целостно организованную систему, становится очевидно, что стремление к объективной оценке опирается на анализ ее формы, абстрагированной от контекста и биографических факторов. В музыкальной критике данная линия получила развитие в трудах Эдуарда Ганслика, который связывал содержание произведения непосредственно с его звуковой формой. Следовательно, объективность возникает там, где анализ направлен на внутреннюю логику, структуру и соразмерность произведения, а не на личные эмоциональные реакции [1].

Однако любая объективность, претендующая на статус истины в человеческом обществе, в действительности формируется как результат длительного и сложного социального согласования. Как отмечается в ряде исследований, объективность следует рассматривать не как некую внешнюю данность, а как устойчивое соглашение, закрепившееся со временем. Исторический анализ демонстрирует, что даже такие базовые системы измерения, как метрическая, изначально возникли в результате договоренностей. До введения единых стандартов существовало множество разрозненных способов измерения, что затрудняло взаимодействие между людьми. Подобная ситуация наблюдается и в музыкальной критике, где отсутствие общей шкалы оценки создает условия для произвольных интерпретаций. Введение единой системы необходимо не для ограничения творчества, а для обеспечения взаимопонимания: при использовании различных критериев диалог утрачивает смысл, тогда как согласованная «линейка» позволяет выстраивать конструктивное обсуждение культурных явлений [2].

Важным этапом становления объективного подхода стало отделение искусства от общего массива человеческой деятельности, ранее обозначаемого как «техне». До X века искусство не выделялось в особую категорию и рассматривалось как разновидность ремесла без четкой иерархии. С развитием гильдий, а затем и академий возникла потребность в разграничении уровней мастерства и формировании критериев оценки. Академии XV–XVI веков стали инструментом институционализации этих различий, закрепляя представления о качестве через обучение и систему канонов. В музыке аналогичный процесс сопровождался развитием нотной записи, которая позволила зафиксировать звуковую форму и сделать ее объектом анализа. В современных условиях ослабления авторитетов и утраты институциональной монополии на оценку наблюдается тенденция к размыванию границ, при которой любое самовыражение начинает претендовать на статус искусства [4].

В условиях усиливающегося информационного многообразия возникает необходимость в новой систематизации, способной упорядочить многочисленные субъективные проявления с помощью четко структурированных описательных моделей. Одним из примеров подобного подхода является проект Риза за творчество (РЗТ), в рамках которого предложен метод многокритериального анализа музыкальных произведений. Применение разложенных на отдельные элементы параметров, таких как рифмы и образы, структура и ритмика, реализация стиля, а также индивидуальность и харизма, выполняет функцию своеобразного измерительного инструмента в сфере искусства. Используемая 90-балльная шкала формирует единое координатное пространство, позволяющее участникам культурного процесса говорить на общем языке оценки. Такой подход способствует преодолению ситуации, при которой оценивание сводится к произвольным и несопоставимым суждениям, и переводит восприятие произведения в более формализованную и сопоставимую плоскость. Объективность в данном случае достигается не путем исключения субъективного фактора, а за счет его структурирования и включения в систему прозрачных критериев, что делает процесс оценки более обоснованным и воспроизводимым [5].

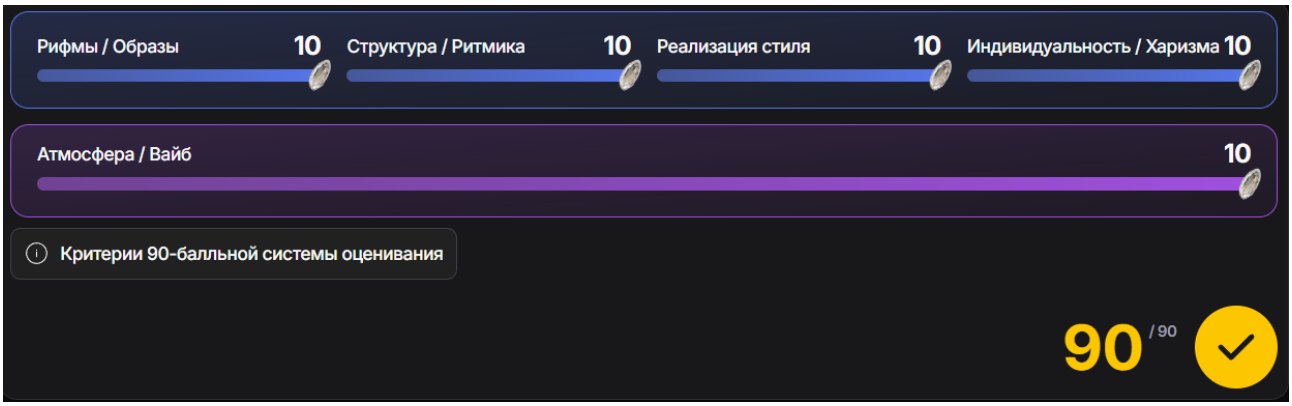


Рисунок 1 – Интерфейс цифровой платформы «Риза за творчество» (РЗТ) с применением 90-балльной системы дескриптивного оценивания

Теоретическая основа данного подхода связана с попыткой преодоления противопоставления формы и содержания в эстетике. С одной стороны, признается ограниченность возможности достижения абсолютной объективности вне субъективного восприятия, с другой – подчеркивается необходимость выработки согласованных критериев оценки. В рамках рассматриваемой методологии идея всеобщности вкусового суждения получает конкретное выражение через систему дескрипторов, фиксирующих различные аспекты музыкального произведения. Одновременно учет таких параметров, как харизма и атмосфера, позволяет интегрировать в анализ эмоциональную составляющую, которая традиционно ускользает от строгого формального описания. В результате формируется комплексный инструмент оценки, сочетающий рациональный анализ структуры с фиксацией эмоционального воздействия, что позволяет переводить субъективное впечатление в аргументированную и сопоставимую форму, не разрушая при этом целостности художественного восприятия [2].

Методика строится на сочетании анализа технических аспектов произведения и оценки его эмоционального воздействия, реализованном через набор базовых параметров и интегративный коэффициент. Оценка текстовой части, включающей рифмы и образы, зависит от жанра и может требовать либо концептуальной глубины, либо практической уместности. Структурно-ритмический блок анализирует согласованность частей композиции и динамику исполнения, тогда как параметр реализации стиля отражает соответствие художественного замысла его звуковому воплощению. Завершают систему критерии индивидуальности и харизмы, связанные с узнаваемостью и эмоциональной убедительностью исполнения. Категория атмосферы аккумулирует общее впечатление от произведения и переводит субъективное восприятие в сопоставимый числовой показатель, обеспечивая целостность оценки [5].

Таким образом, объективный подход к музыке следует рассматривать как динамическую систему, формирующуюся на пересечении природных закономерностей, внутренних структур произведения и согласованных культурных норм, выработанных обществом в ходе исторического развития. Создание общей методологической платформы для оценки художественных произведений способствует сохранению преемственности эстетической мысли от классических традиций до современных практик и одновременно защищает само понятие «искусство» от окончательного размывания, возникающего в условиях цифрового постмодерна и кризиса авторитетов. Объективная оценка становится возможной только при согласии участников культурного процесса использовать единые критерии и принципы анализа, что позволяет избежать хаотичности и произвольности в оценочных суждениях. В этом контексте системность и упорядоченность выступают не как ограничение, а как необходимое условие для осмысленного понимания художественной реальности и обеспечения сопоставимости результатов. Такой подход закрепляет значимость экспертного знания, формирует надежный интеллектуальный фундамент и обеспечивает существование искусства в цифровой среде, позволяя передавать, интерпретировать и проверять смыслы в ясной, сопоставимой и воспроизводимой форме.

Список использованных источников:

1. *Ганслик, Э. О музыкально-прекрасном / Э. Ганслик ; пер. с нем. Г.А. Лароша. – М. : Издательство Либроком, 2012. – 160 с.*
2. *Кант, И. Критика способности суждения / И. Кант ; пер. с нем. Н.М. Соколова. – М. : Искусство, 1994. – 367 с.*
3. *Мартынов, В.И. Конец времени композиторов / В.И. Мартынов. – М. : Русский путь, 2002. – 296 с.*
4. *Ницше, Ф. Рождение трагедии из духа музыки / Ф. Ницше ; пер. с нем. Г.А. Рачинского. – СПб. : Азбука, 2012. – 214 с.*
5. *Риза за творчество : сайт [Электронный ресурс] / А. С. Фломастер. – Режим доступа : https://risazatvorchestvo.com/*

ПРОБЛЕМНОСТЬ КОНЦЕПЦИИ ТРАНСМИРОВОГО ТОЖДЕСТВА

Кумищо А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Амоненко С.А. – магистр фил. наук, преподаватель

Рассмотрены две проблемы, связанные с концепцией трансмирового тождества. Проблема пустых тождеств проанализирована на примере парадокса Чизолма. Проблема транзитивности рассмотрена через аргумент транзитивности Чендлера и парадокс четырех миров. Дана оценка некоторым стратегиям решения данных вопросов. Сделан вывод об уязвимости понятия в силу нерешенности рассмотренных противоречий.

Семантика возможных миров служит в современной философии и логике удобным аппаратом для анализа модальных высказываний, то есть для рассуждений о том, что возможно, необходимо или случайно. Сами возможные миры могут пониматься как способ описания альтернативных положений дел. Непосредственно через истинность в различных мирах и определяются модальные характеристики. Высказывание считается необходимым, если оно истинно во всех возможных мирах, и возможным, если оно истинно хотя бы в одном возможном мире. Такой подход обеспечил модальной логике строгую и удобную модельную интерпретацию.

Рассматриваемая в настоящей работе концепция трансмирового тождества формулируется в рамках данного аппарата. Она основывается на допущении, что объект может существовать в более чем одном возможном мире, и основной задачей концепции является обеспечение его идентификации в различных возможных состояниях дел. Трансмировое тождество вызывает немало сомнений и споров даже среди философов, которые считают правомерным высказывания о возможных мирах, в связи с рядом нерешенных противоречий, возникающих при анализе этой концепции [1]. В качестве аргументов проблемности данной концепции далее рассматриваются две ключевые проблемы.

Проблема «пустых» тождеств («bare» identity) заключается в возникновении ничем не обоснованных идентификаций, основанных преимущественно на интуиции и не подкреплённых строгими аргументами. Продемонстрируем появление пустого тождества на конкретном примере, используя «парадокс Чизолма».

Проведем мысленный эксперимент. Из действительного мира возьмем Сократа и Платона. Исходя из допущения, что не все их свойства являются сущностными, предположим, что существует такой возможный мир, в котором Сократ чуть больше похож на действительного Платона, чем он есть в действительности, и в котором Платон чуть больше похож на действительного Сократа. Если такой мир существует, можно развивать предположение и допустить, что существует возможный мир, в котором Сократ еще больше похож на действительного Платона, а Платон еще больше похож на действительного Сократа. В конце концов, мы можем получить такой возможный мир, который будет отличаться от действительного лишь тем, что Сократ и Платон целиком поменяются ролями. Данная ситуация, когда исполняющий роль Сократа индивид ничем не отличается от действительного Сократа, однако по своей сути является Платоном, кажется контринтуитивной.

Подходов для решения проблемы пустых тождеств предлагается немало, однако каждый из них так или иначе критикуется. Рассмотрим некоторые из них.

Одна из стратегий предполагает выделение так называемых «индивидуальных сущностей» – свойства или набора свойств, которые необходимы и достаточны для определения объекта. Среди философов существуют разные взгляды на то, какими должны быть индивидуальные сущности. Наиболее простым примером их определения можно назвать подход, основанный на принципе закона тождества, который говорит, что любой объект необходимо тождественен самому себе. В этом случае свойство «быть тождественным Платону» может рассматриваться как индивидуальная сущность. Проблема, однако, в том, что такая сущность является тривиальной. Приведенное свойство аналитически гарантирует тождество, но при этом не имеет никакой содержательной информации об объекте, не говорит нам о том, какой объект есть Платон.

Альтернативой являются попытки определить индивидуальные сущности нетривиальным образом. Здесь вариантов тоже предлагается несколько. Один из них предполагает составление более содержательного описания объекта с помощью качественных свойств. Качественным можно назвать свойство, которое не отсылает к другим индивидам, например, «быть фиолетовым», «иметь запах». Критика такого подхода заключается в большом скептицизме касательно того, возможно ли исчерпать сущность индивида без ссылки на других индивидов. В рамках другого подхода предлагается определять индивидуальные сущности с помощью введения понятия «этовости» («haecceity»). Под этим предполагается неквалитативное свойство, которое не может быть выражено через описание качеств. Оно просто есть – как «быть именно этим объектом», «быть Платоном». Этот вид индивидуальной сущности также является нетривиальным, но сам вопрос о возможности и необходимости существования свойств класса «быть x» является открытым и дискуссионным в современных

исследованиях. В действительности, многие философы высказывают скептические мнения относительно идеи индивидуальных сущностей в целом. Это связано с большими сомнениями в том, возможно ли в принципе вывести удовлетворительные варианты определения индивидуальных сущностей.

Еще одно из предложенных решений рассматривает переход к теории двойников Д.Льюиса. В этом случае мы отказываемся от тезиса о существовании индивида в более чем одном мире, заменяя его представлением о наличии у индивидов двойников в возможных мирах. Из этого следует, что анализ модальности de re осуществляется через отношение сходства, а не тождества. Критика данного подхода сосредоточена на отсутствии строгих критериев сходства и проблеме множественности двойников. Теория противоречит убеждению, что мир устроен так, что именно «я» обладаю возможностями, а не мой двойник.

Существует также смешанный подход к решению проблем, который поддерживает Г. Форбс. Он предложил использовать трансмировое тождество, если в случае некоторых объектов получается вывести индивидуальные сущности, в противном случае – прибегать к теории двойников. Еще один вариант – согласиться с наличием пустых тождеств или принять существование у объектов качественных двойников.

Проблема транзитивности трансмирового тождества. Аргумент о том, что применение транзитивного отношения тождества к возможным мирам приводит к противоречиям, был предложен Х. Чендлером. Продемонстрируем его на примере.

Представим, что у нас есть компьютер, который можно условно разбить на три составные части: A1, B1, C1 (допустим, что A1 – это процессор, B1 – память, C1 – устройство ввода-вывода). Однако справедливо предположить, что этот компьютер мог бы состоять и из несколько иных частей. Назовем это «принципом терпимости». Но и у этого допущения должен быть предел, ведь компьютер не мог бы существовать, имея кардинально иной исходный состав. Назовем это «принципом ограничения». Комбинация этих предположений и транзитивности тождества порождает серьезные трудности, когда мы говорим о трансмировом тождестве. Допустим, что, исходя из принципа терпимости, существует возможный мир w2, включающий в себя тождественный исходному устройству компьютер с составом A1, B1, C2, где C2≠C1. Тогда, если мы снова применим этот же принцип к новому варианту компьютера, то получим, что в возможном мире w3 он состоит из частей A1, B2, C2, где B2≠B1 и C2≠C1. Применив транзитивность тождества, можно заключить, что компьютер из мира w3 тождественен исходному. Однако эти два компьютера кардинально отличаются по составу, и, согласно принципу ограничения, просто не могут быть тождественны. Таким образом, мы получили противоречие. Этот аргумент можно и усилить. Если допустить существование компьютера A с составом A1, B1, C1 и компьютера B с составом A2, B2, C1, где A2≠A1 и B2≠B1, и применить к ним принцип терпимости, можно получить два разных возможных мира, которые качественно идентичны (в них есть компьютер с составом A1, B2, C1), но в одном из них этот компьютер тождествен первому исходному компьютеру A, а второй – B. Это так называемый «парадокс четырех миров», в котором к тому же возникает пустое тождество.

Предлагаются следующие стратегии решения этой проблемы. Некоторые подходы предполагают отказ от одного из трех принципов, что имеет мало сторонников в силу сложности и специфичности обоснования. Самим Чендлером было предложено следующее решение: хотя и существуют возможные миры, где исходный компьютер составлен из минимума своих частей, нам стоит признать такие миры недостижимыми относительно действительного мира. Строение компьютера в w3 является лишь вероятностно возможным, то есть достижимым при условии наличия иного от действительности положения дел. Однако большим влиянием пользуется переход к теории двойников. Благодаря нетранзитивному отношению сходства между двойниками принципы терпимости и ограничения не нарушаются. С решением парадокса четырех миров все еще сложнее, поскольку он ставит нас перед неочевидным выбором: либо отказаться от принципа терпимости (что означает признать, что для любого объекта все его свойства будут являться сущностными), либо принять пустые тождества.

Справедливо сказать, что не существует консенсуса о том, как стороннику трансмирового тождества следует реагировать на проблемы транзитивности и пустых тождеств. Существующие стратегии решения данных проблем не устраняют всех возникающих противоречий. Некоторые мыслители склонны считать, что пустые тождества, возникающие при рассмотрении обеих проблем, являются неоправданно высокой ценой за возможность описывать модальные высказывания через трансмировое тождество в возможных мирах. Таким образом, если мы действительно не можем предложить валидный вариант определения и вывода индивидуальных сущностей, ответа на возникающую проблему транзитивности, то это позволяет сделать вывод о проблематичности использования концепции трансмирового тождества в её классическом виде.

Список использованных источников:

1. Transworld Identity [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://plato.stanford.edu/entries/identity-transworld/. – Дата доступа: 27.03.2026

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И СОВРЕМЕННОЕ ИСКУССТВО: ОТ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ДЕТЕРМИНИЗМА К РАСПРЕДЕЛЕННОМУ АВТОРСТВУ

Фролов М.А., Кузьмич Д.С., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Бархатков А.И. – канд. фил. наук, доцент

В работе исследуется философский статус произведений искусства, созданных с помощью генеративных нейросетей. Анализируется проблема субъектности искусственного интеллекта сквозь призму алгоритмического детерминизма и семантической слепоты машин. Рассматривается переход от традиционного авторства к распределенной агентности и промпт-инжинирингу как новой форме радикального концептуализма.

Внедрение генеративных нейросетей в сферу современного искусства спровоцировало фундаментальный эпистемологический кризис, разделив исследовательское сообщество в оценке эстетического статуса искусственного интеллекта (ИИ). Ключевая философская проблема данного феномена заключается в определении субъектности алгоритмических систем: функционирует ли нейросеть как суверенный творец, или же она представляет собой исключительно сложный вычислительный механизм, оперирующий в рамках формальной логики.

Несмотря на то, что визуальные результаты работы генеративных моделей создают иллюзию творческого акта, на фундаментальном уровне их механика строго детерминирована. Процесс генерации изображений представляет собой сложную вычислительную процедуру, сводящуюся к математической статистике и алгоритмической оптимизации. Синтез изображения (в алгоритмах диффузии или переноса стиля) — это решение классической задачи минимизации «функции потерь» [1]. Балансируя между потерей контента и стиля [2], машина калибрует веса, образующие многомерную функцию. Абстрагирование огромных массивов обучающих данных неизбежно приводит к вероятностному усреднению визуальных паттернов, что К. Кроуфорд характеризует как «триумф статистической банальности» [3]. В сущности, нейросеть выступает в роли механизма эмпирической индукции, являясь сложным «предсказателем следующего пикселя» [4]. Ключевым барьером на пути к обретению машиной семантики является полное отсутствие интенциональности (намерения). Алгоритмы «ничего не чувствуют и ничего не желают».

Для анализа проблемы машинного понимания в работе адаптируется мысленный эксперимент Дж. Сёрла «Китайская комната». Нейросети работают исключительно с синтаксисом, манипулируя пикселями согласно заданным правилам, совершенно не понимая их внутреннего смысла [5]. Смысл сгенерированного полотна не существует объективно внутри системы, а возникает исключительно в акте интерпретации человеком случайной комбинации вычисленных элементов.

Тем не менее, детерминизм ИИ не упраздняет искусство, а радикально трансформирует статус художника. Происходит переход от парадигмы «ремесленника» к «концептуалисту», выступающему архитектором условий. Центральным инструментом становится промпт-инжиниринг. Текстовый запрос функционирует как форма «операционализированного дейксиса» [6] – инструмента поиска, задающего координаты в латентном пространстве нейросети.

Такое делегирование исполнения деконструирует традиционный правовой фундамент искусства. Опираясь на акторно-сетевую теорию Б. Латура, генеративное искусство следует рассматривать как результат сетей взаимодействия, образующих когнитивные коллективы [7]. Творческий акт становится результатом «распределенной агентности» между создателями баз данных, разработчиками, нейросетью и автором промпта. Закономерным правовым выходом из этого кризиса становится внедрение гибридной модели собственности (sui generis), предполагающей распределение интеллектуальных прав между всеми участниками коллаборации [8].

Таким образом, генеративный ИИ не является автономным разумом и не вытесняет художника. Он представляет собой математически сжатый совокупный человеческий опыт, принуждающий творца адаптироваться к парадигме, где понятие уникальности требует концептуальной пересборки. Дальнейшее развитие цифрового искусства зависит от способности человека сохранить за собой роль критического куратора.

Список использованных источников:

1. Gerner A. M. Critical Generative AI Aesthetics // Semeiosis — transdisciplinary journal of semiotics. — 2023. — Vol. 11, № 1. — P. 69–99. — DOI: 10.53987/2178-5368-2023-12-05.Hayles N. K. How We Became Posthuman. [Электронный ресурс] // arl.human.cornell.edu. — URL: https://arl.human.cornell.edu/linked%20docs/Hayles-Posthuman-excerpts.pdf (дата обращения: 10.03.2026).

2. Leong W. Y. Ethical and Philosophical Perspectives on Artificial Intelligence-Generated Art // International Journal of Social Sciences and Artistic Innovations. — 2025. — Vol. 5, № 2. — Article 0007. — DOI: 10.35745/ijssai2025v05.02.0007.

3. Crawford K. A Questionnaire on Art and Machine Learning // October. — 2024. — Vol. 189. — P. 6–130. — DOI: 10.1162/octo_a_00533.

4. Galloway A. R. A Questionnaire on Art and Machine Learning // October. — 2024. — Vol. 189. — P. 6–130. — DOI: 10.1162/octo_a_00533.

5. Sack W., Gonzalez J. A Questionnaire on Art and Machine Learning // October. — 2024. — Vol. 189. — P. 6–130. — DOI: 10.1162/octo_a_00533.

6. Somaini A. A Questionnaire on Art and Machine Learning // October. — 2024. — Vol. 189. — P. 6–130. — DOI: 10.1162/octo_a_00533.

7. Криман А. И. Постгуманизм и современное искусство: пересборка антропоцентристского дискурса в пространстве визуального // Наука телевидения. — 2023. — Т. 19, № 3. — С. 21–41. — DOI: 10.30628/1994-9529-2023-19.3-21-41.

8. Gaidartzi A., Stamatoudi I. Authorship and Ownership Issues Raised by AI-Generated Works: A Comparative Analysis // Laws. — 2025. — Vol. 14, № 4. — Article 57. — DOI: 10.3390/laws140400

ФИЛОСОФИЯ ПОСТПРАВДЫ: КАК МЫ МОЖЕМ ПЕРЕОСМЫСЛИТЬ ПОНЯТИЕ ИСТИНЫ В ЭПОХУ ФЕЙКОВЫХ НОВОСТЕЙ И МАНИПУЛЯЦИЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Полещук О. В., Ишеков А. М., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Бархатков А. И. – канд. фил. наук, доцент

В статье рассматривается феномен постправды как кризис классического понимания истины. Анализируются основные характеристики эпохи постправды: приоритет эмоций над фактами, распространение фейков и падение доверия к экспертам. Проанализирована связь истины с властью и социальными практиками. Обосновывается необходимость пересмотра понятия истины как динамичного диалога, требующего развития критического мышления, медиаграмотности и эпистемической ответственности. Делается вывод о том, что постправда не отменяет истину, но меняет способы её обоснования в условиях цифрового общества.

Современное общество переживает острый кризис в сфере познания, в центре которого находится феномен постправды. Изначально этот термин был применен сербско-американским драматургом Стивом Тесичем в 1992 году, описывая сокрытие фактов и политические манипуляции, но истинный размах концепция получила только недавно. В 2016 году Оксфордский словарь выбрал слово «постправда» главным словом года [1]. Она была определена как ситуация, где эмоции и личные убеждения играют большую роль в формировании общественного мнения, чем объективные факты. Масштабное распространение фейковых новостей и упадок доверия к научному знанию актуализируют главную философскую дилемму: свидетельствует ли феномен постправды об окончательной утрате категории истины, либо же возникает необходимость ее концептуального пересмотра в изменившихся условиях [2].

Чтобы понять масштаб происходящих изменений, стоит обратиться к истории философии. Традиционное понимание истины опиралось на веру в то, что мир объективен и у человечества есть возможность его познать. Главной здесь была теория соответствия, которая идет еще от Аристотеля: истина – это точное совпадение наших суждений с реальными фактами материального мира. Также развивался подход, где истинность утверждения зависела от его строгой логической связи с уже накопленными знаниями. Позже философы-прагматики (например, Уильям Джеймс) сместили акцент на пользу: истина – это то, что эффективно работает на практике [3]. Вне зависимости от частных различий, классическая рациональность основывалась на признании истины как независимой от человека величины, выступающей в роли единого критерия действительности.

Переход к постправде ускорился в тот момент, когда повсеместное распространение интернета и развитие мировых медиа сделали производство информации массовым и бесконтрольным. В эпоху интернета социальные сети стали не просто каналами связи, а механизмами, которые сами создают нашу реальность. Алгоритмы цифровых платформ, ориентированные на максимальную вовлеченность, способствуют формированию изолированных информационных сред, в которых пользователь сталкивается преимущественно с контентом, подтверждающим его существующие установки. В такой среде ценность объективности падает, уступая место эмоциональному комфорту и популярности алгоритмов. Именно этот сдвиг, ярко проявившийся во время политических кризисов последних лет, и зафиксировал Оксфордский словарь, отметив вступление общества в новую сетевую эпоху.

Мощным катализатором развития эпохи постправды выступают когнитивные уязвимости самого субъекта познания. С точки зрения когнитивной психологии и социальной эпистемологии, процесс формирования убеждений опирается на дуальную систему мышления: ресурсосберегающую «дефолтную» и ресурсоемкую «критическую». Дефолтная система функционирует на основе ассоциаций, стремясь максимально сохранить уже имеющуюся систему базовых ценностей и убеждений субъекта, в то время как критическая система нацелена на объективную верификацию и пересмотр догм. Архитектура современных цифровых платформ, искусственно стимулирует именно дефолтную систему, блокируя доступ к диссонирующей информации. В этих условиях ярко проявляется «эффект обратного результата» – феномен мотивированного рассуждения, при котором столкновение субъекта с объективными фактами, противоречащими его политическим или мировоззренческим установкам, не разрушает, а напротив, лишь усиливает его веру в изначальную ложь. Таким образом, феномен постправды паразитирует на фундаментальной потребности человеческой психики в когнитивном комфорте и устранении когнитивного диссонанса, превращая субъекта в соучастника собственного обмана.

Эпоха постправды имеет несколько разрушительных характеристик. Во-первых, личные убеждения и эмоции теперь безоговорочно важнее фактов: эмоциональный отклик становится главным критерием правдивости сообщения. Во-вторых, целенаправленные манипуляции и создание фейков стали нормой и инструментом политического доминирования, а не просто случайными ошибками. В-

третьих, наблюдается небывалое обесценивание экспертного знания: общество открыто не доверяет ученым и профессионалам [4]. Как точно отмечает философ Ли Макинтайр, постправда – это не просто игнорирование фактов, а акт идеологического превосходства. Это сознательное подчинение реальности политическим мотивам, когда факты отбираются или отбрасываются только ради нужной повестки.

Философские предпосылки эпохи постправды были заложены задолго до появления интернета – в кризисе классической рациональности. Еще Ф. Ницше рассматривал истину как "иллюзию" и инструмент воли к власти, а мыслители-постмодернисты деконструировали претензии науки на объективность, провозгласив наступление эры "симулякров", где стирается граница между реальностью и вымыслом [5]. В этом контексте опора на концепт "режима истины" М. Фуко обнажает фундаментальный парадокс постправды: если истина всегда является лишь производной от социальных отношений и властных диспозиций, то объективной реальности никогда не существовало, а постправда – это не трагедия утраты фактов, а лишь демократизация борьбы за "модальную власть" на мета-уровне.

Однако принятие такого радикального релятивизма губительно для гносеологии. Разрешение этого парадокса возможно через обращение к политической философии Х. Арендт, разделявшей "истины разума" (идеологии, которые действительно конструируются властью) и "истины факта" (онтологический фундамент совместного существования людей). Постправда деструктивна именно тем, что переносит методы деконструкции власти на уничтожение самих упрямых фактов реальности, что в конечном итоге ведет к разрушению общего политического мира людей [6].

Преодоление этого эпистемологического тупика требует отказа от банальных призывов к медиаграмотности в пользу выработки новых механизмов верификации. Выходом становится формирование «зон обмена» – специфических площадок, где носители несоизмеримых парадигм и враждующих нарративов могут координировать действия и вырабатывать общий язык для решения конкретных проблем, даже не приходя к единой метафизической истине. На макроуровне это означает неизбежный переход к коммуникативной модели истины, в которой критерием достоверности становится не статичное соответствие фактам, а прозрачность процедур смыслового согласования в условиях интерсубъективного диалога.

Таким образом, эпоха постправды означает не полную гибель истины, а показывает, что старые представления о ней больше не работают, и требует новых подходов к познанию. В современном мире, где информация распространяется через всевозможные каналы, истина перестаёт быть чем-то незыблемым и независимым. Она становится сложным явлением, на которое влияют способы передачи информации, культурные особенности и политическая обстановка. Философия не может в ответ на это ни просто вернуться к старым догмам (рискуя навязать свою «единственно верную» истину), ни окончательно отказаться от самого понятия истины. Вместо этого современному человеку предстоит выработать новые способы отличать достоверное от ложного, опираясь на открытость общения, умение критически осмысливать информацию и чувство ответственности за свои суждения. В конечном счёте, постправда заставляет нас понять, что истина в XXI веке – это не застывшая догма, а живой процесс, постоянный диалог, в котором участники ищут взаимопонимание. Это требует от каждого из нас смелости мыслить самостоятельно и готовности слушать других, чтобы сохранить общее пространство для человеческого общения.

Список использованных источников:

1. *Шевченко, А. А. «Постправда» как новый «режим истины» // Гуманитарный вектор. – 2019. – № 4. – С. 8-14.*
2. *Иванова, Е. В. Проблема истины в условиях постправды: философский анализ трансформации эпистемологии / Е. В. Иванова, Л. Б. Шубин, Е. В. Левченко, О. В. Филиппова, С. С. Усов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Познание. – 2025. – № 12. – С. 93-98.*
3. *Brahms, Y. Philosophy of Post-Truth / Y. Brahms // INSS. – 2018. – P. 1-19.*
4. *Масланов, Е. В. Постправда и несоизмеримость: наука и политика в эпоху постправды // Вестник Томского государственного университета. – 2023. – № 486. – С. 74-82.*
5. *McIntyre, L. Post-Truth / L. McIntyre. – Cambridge, MA : MIT Press, 2018. – 240 p.*
6. *Шейнов, Т. Постправда как неумеренная речь: философские подходы Х. Арендт и Л. Штрауса в современных дискуссиях об истине и политике // Социологическое обозрение. – 2025. – № 2. – С. 31-57.*

ДИПФЕЙК КАК СИМУЛЯКР: ФИЛОСОФСКИЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВОЙ ИЛЛЮЗИИ

Николащенко Е.А, Гладышева Д.А, студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И. М. – канд. фил. наук, доцент

Работа посвящена философскому анализу дипфейка как симулякра в контексте теорий Платона и Ж. Бодрийяра. Исследуется трансформация концепции истины: от классического соответствия действительности к «алгоритмическому консенсусу». Дипфейк интерпретируется как симулякр четвертого порядка, формирующий гиперреальность, где модель замещает оригинал. Анализируется эффект зловещей долины как пограничная зона между истиной и иллюзией. Выявлена роль экранной культуры в формировании типа homo screen. Делается вывод об онтологическом сдвиге, стирающем границу между подлинным и искусственным, что требует переосмысления социального доверия и критического мышления в условиях цифровой эпохи.

Современное культурное пространство переживает фундаментальную трансформацию под воздействием технологий искусственного интеллекта. Повсеместное внедрение нейросетей привело к появлению дипфейков – синтетического контента, ставящего под сомнение достоверность визуальной информации и подрывающего основы социального доверия. Если ранее медиа выступали зеркалом реальности, фиксируя объективные факты, то теперь они становятся самостоятельными генераторами смыслов, где оригинал утрачивает свое первичное значение [1]. Проблема заключается не только в технической подделке, но и в серьезном онтологическом сдвиге: истина перестает быть соответствием факту и трансформируется в алгоритмический консенсус. В данной работе дипфейк анализируется через сопоставление платоновской концепции истины и бодрийяровской теории симулякра. Особое внимание уделяется механизмам формирования гиперреальности, где цифровая модель замещает оригинал, и трансформации истины из «соответствия действительности» в «алгоритмический консенсус» [2].

Философский анализ дипфейка как симулякра требует обращения к классической традиции осмысления соотношения истины и иллюзии. В притче о пещере Платон описывает ситуацию, когда люди с детства прикованы в пещере и видят лишь тени от огня, принимая их за реальность [3]. Современный человек также прикован, пусть и не железными цепями, к новостным лентам и сконструированным образам, часто не желая понять, что реальность может отличаться от этих конструкций. Это реализованный на новейших технологиях образ платоновской пещеры: люди погружены в мир теней, прикованы технологическими цепями. Человек, погрузившийся в такую пещеру, воспринимает ее как единственную реальность, а значит, и истина, и красота также находятся в ней. Современная пещера – это пространство глобальной коммуникации, условием такой виртуальной прикованности выступают большие данные, ограничивающие внутреннюю свободу. Отфильтрованный на основе цифрового следа Интернет превращается в так называемый «тоннель реальности» – узкий спектр явлений, которые мы видим внутри сформированной алгоритмами действительности [3]. Визуальный образ воздействует непосредственно, отключая рациональное осмысление, что создаёт предпосылки для манипуляции.

Платон выделяет четыре состояния души для постижения истины: на высшей ступени – разум, на второй – рассудок, третье место уделено вере, а последнее – уподоблению [3]. Вера и уподобление находятся в нижней части иерархии и не являются результатом размышления, а поэтому могут порождать лишь мнения, то есть в наибольшей степени удалены от возможности познания истины. Цифровизация способна выстроить цепочки соизмерений, интерпретирующие мир иным образом, но при этом необходимо помнить, что это мыслительная конструкция, которая может находиться достаточно далеко от постижения сущности объектов. Визуальный образ в цифровой среде воздействует непосредственно, как бы отключая рациональное осмысление, что помещает современного пользователя на нижние ступени платоновской иерархии – в зону веры и уподобления, где тень неотличима от реальности.

Переходя к теории Жана Бодрийяра, необходимо отметить, что сегодня исчезла грань между реальностью и симуляцией. В бодрийяровской трактовке симуляция изначально противостоит реальному, представляя собой совокупность несуществующего, но представляющегося реальным. Бодрийяр выделяет последовательные фазы представления: оно отражает глубинную реальность; маскирует и денатурализует ее; маскирует отсутствие глубинной реальности; вообще не соотносится с какой бы то ни было реальностью: оно есть чистый симулякр [2]. Эпоха симуляции наступает при переходе от второй стадии к третьей, когда представление становится самодостаточным. В системе Жана Бодрийяра феномен дипфейка классифицируется как симулякр четвертого порядка – стадия, на которой изображение окончательно разрывает связь с физическим миром. Технология ИИ генерирует гиперреальный объект: человек на экране говорит и действует так, как никогда не делал в действительности. Симулякр четвертого порядка не копирует оригинал – он предшествует ему и

замещает его. Истина здесь заменяется эффективностью симуляции. Ключевым механизмом внедрения гиперреальности является принцип прецессии симулякров – приоритет модели над оригиналом [1].

Происходит переход к «истине как консенсусу»: мы верим не своим глазам, а «цифровой подписи». Истина теперь – это консенсус доверенных узлов сети, вычисляемый через алгоритмы [1]. В этом пространстве дипфейк становится реальностью, если у него отсутствует «цифровая тень» подделки. Экранная культура значительно изменила жизнь современного человека, превратив экран в самостоятельный глобальный субъект, воздействующий на сознание. Homo screen становится придатком экрана, а экран активным действующим субъектом, продуцирующим свои смыслы. Экран не просто отражает, он всегда копирует, воспроизводит действительность посредством цифровых образов. В понимании Ж. Бодрийяра симулякр – это элемент культуры, который сам по себе «ничего не обозначает», это нулевое бытие. Соответственно из подобных эффектов симуляции рождается феномен нарциссизма: мы влюбляемся в подобие культуры. Наше собственное «Я» становится симулякром, который нам видится чем-то поистине действительным. Посредством симуляции истинность информации уступает место доверию к экрану [4].

Это можно назвать глобальным эмпиризмом или солипсизмом нашего времени; для Бодрийяра же это означает универсальность симулякра и исчезновение реального, заменяемого на «гиперреальное», которое определяется как «порождение, при помощи моделей, реального без истока и реальности» [2]. В 2026 году дипфейк-технологии завершили трансформацию медиасреды, превратив её из «зеркала реальности» в пространство чистых симулякров. Главный философский итог этого процесса – капитуляция классической концепции истины, которая перестала существовать как «соответствие факту» и перешла в статус «алгоритмического консенсуса» [1].

Эффект зловещей долины можно рассматривать как промежуточный этап между теорией Платона и теорией Бодрийяра. Данный феномен демонстрирует нелинейную зависимость между степенью человекоподобия объекта и эмоциональной реакцией на него. По мере увеличения визуального сходства с человеком эмоциональная реакция растет, достигая пика. Однако при достижении определенного порога происходит резкий спад: объект, который почти неотличим от человека, но имеет минимальные дефекты имитации, вызывает не эмпатию, а чувство отторжения и страха [5]. Платон искал границу, отделяющую истину от иллюзий. Дипфейки – это момент стирания этой границы, когда уже непонятно, где человек, а где его копия. Эффект зловещей долины возникает именно в этой пограничной зоне, когда имитация почти совершенна, но ещё распознаваема как искусственная. Движущиеся объекты вызывают более выраженную реакцию отторжения, чем статичные, поскольку динамика обнажает даже минимальные несоответствия в мимике и жестах [5]. В цифровых медиа эффект провоцируется минимальным несовпадением деталей, которое сигнализирует сознанию о присутствии симуляции там, где ожидается подлинник.

Философский анализ дипфейка как симулякра позволяет констатировать завершение фундаментальной трансформации концепции истины в цифровую эпоху. От классического понимания истины как соответствия образа действительности современная культура перешла к «алгоритмическому консенсусу», где подлинность определяется подтверждением доверенным протоколом верификации [1]. Дипфейк-технологии превратили медиасреду из «зеркала реальности» в пространство чистых симулякров, где модель предшествует оригиналу и замещает его. Сопоставление мифа о пещере Платона и теории симулякра Жана Бодрийяра выявило онтологический сдвиг в восприятии действительности. Если Платон искал границу, отделяющую истину от иллюзий, то дипфейки представляют момент стирания этой границы. Экранная культура сформировала нового антропологического типа – homo screen, для которого электронная среда стала второй средой обитания, точнее, копией-симулякром [4]. Философское осмысление этих процессов необходимо для предупреждения возможных последствий цифровизации и сохранения способности человека к критическому мышлению в условиях глобальной коммуникационной пещеры [3].

Список использованных источников:

1. Кугай, А.И. Дипфейк-технологии и трансформация концепции истины: от отражения к чистому симулякру / А.И. Кугай // Среда. – 2026. – С. 1–5.

2. Бронзино, Л.Ю. Концепция симулякра Жана Бодрийяра: методология «алеаторного мышления» и трансформация субъекта в обществе потребления / Л.Ю. Бронзино // Вестник РУДН. Серия: Социология. – 2011. – № 1. – С. 11–22.

3. Миронов, В.В. Цифровая пещера как возможный вектор развития культуры / В.В. Миронов // Мировое развитие: проблемы предсказуемости и управляемости : материалы пленарного заседания. – 2024. – С. 183–186.

4. Григорьев, С.Л. Экран как генератор симулякров и фейков / С.Л. Григорьев // Russian Studies in Culture and Society. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 19–33.

5. Шестерин, Н.О. Визуальные предпосылки формирования эффекта «зловещей долины» в цифровых медиа / Н.О. Шестерин // Челябинский гуманитарий. – 2024. – № 3(68). – С. 51–57.

СОЦИАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУСТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Микулин К.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шепетюк В.В. – канд. фил. наук, доцент

Статья посвящена социальным вызовам, обусловленным последствиями внедрения ИИ, начиная от возможной потери людьми рабочих мест, заканчивая отсутствием доступа к важнейшим ресурсам для жизни в связи с цифровым неравенством и манипуляциями сознанием. Рассматриваются пути минимизации рисков и угроз, альтернативные сценарии и направления развития технологических инноваций.

Искусственный интеллект стал неотъемлемой частью нашей жизни. Алгоритмы рекомендуют музыку, ставят медицинские диагнозы, одобряют кредиты и помогают судьям выносить решения. Однако, как отмечает редактор Financial Times Мадумита Мурджия, «слишком часто искусственный интеллект (далее – ИИ) приводит к эксплуатации, дискриминации и неравенству, особенно среди уязвимых групп населения» [1]. Рассмотрим основные социальные проблемы, связанные с внедрением ИИ.

Под угрозой автоматизации и замещения людей алгоритмами в настоящее время находятся около половины существующих профессий в развитых странах. Проблема не в полном исчезновении рабочих мест, а в их глубокой трансформации. Люди старшего возраста, жители отдаленных регионов, те, у кого нет доступа к качественному образованию, рискуют оказаться на обочине и стать маргинальными слоями населения. Авторы монографии «Искусственный интеллект в социальной сфере» подчеркивают: «Для ИИ изначально нехарактерны присущие человеческому разуму нелинейные решения, итерационные методы рассуждений. Следует признать объективные ограничения его применения в социально-гуманитарной сфере» [2].

Казалось бы, компьютер беспристрастен. Но алгоритмы обучаются на данных, содержащих человеческий опыт и стереотипы. В медицинской практике это особенно опасно: «Если в обучающих данных исторически недооценивались симптомы или чаще игнорировались потребности пациентов определенных этнических групп, LLM может перенять и воспроизвести эти нежелательные паттерны. Аналогично, гендерное смещение: долгое время медицинские исследования акцентировали внимание на мужском организме как "стандартном", игнорируя специфику женского» [3]. Относительно данной группы вопросов Эндрю Кокс и Мария Федотова добавляют, что ИИ порождает «множество этических проблем, касающихся пристрастности, прозрачности, объяснимости и ответственности, конфиденциальности, защиты и безопасности» [4]

Мы ежедневно сообщаем алгоритмам новые данные: геолокацию, поисковые запросы, историю покупок. ИИ анализирует указанные массивы, создавая наше цифровое досье, что дает возможность предугадывать наше поведение, реакции, потребности, перспективы дальнейшего выбора. На основании этих сведений в сочетании с другими факторами страховые компании, например, могут повышать цену полиса, если вы слишком часто заказываете фастфуд, а работодатели проявляют интерес к мониторингу активности и интересам сотрудников в нерабочее время. Анализ массивов данных на государственном уровне дает основания для создания целых систем социального рейтинга и управления общественными процессами, что уже успешно реализуется в Китайской Народной Республике. Таким образом, противоречивая грань между заботой и тотальным контролем постепенно стирается, последствия чего еще предстоит исследовать в будущем.

Особую угрозу представляют технологии deepfake и целый спектр связанных с ними социально-правовых проблем. Как отмечается в исследовании «Социально-правовая обусловленность формирования механизма уголовно-правового противодействия преступлениям, совершенным с использованием технологии deepfake», «дипфейк представляет собой сфальсифицированный аудио- и видеоконтент, сгенерированный с использованием генеративно-состязательных нейросетей» [5]. Использование таких технологий «способно причинить вред как правам и законным интересам отдельной личности, так и создавать более серьезные угрозы в информационном пространстве, затрагивая интересы всего государства» [5].

Е.В. Завгороднева и А.Г. Голощапова обращают внимание на проблему порнографических дипфейков: «высокая степень выбора женщин и несовершеннолетних в качестве жертв при создании глубоких порнодипфейков, а также степень морального и материального вреда, причиняемого вследствие генерирования и распространения сексуального интернет-насилия, основанного на изображениях требует принятия оперативных мер сдерживания потенциальных преступников выработки надлежащей общественной реакции на происходящее» [6].

ИИ требует огромных ресурсов, сосредоточенных, как правило, в богатых странах и размещенных там корпорациях. Бедные слои населения не участвуют в создании технологий, но всегда страдают от побочных эффектов их применения, когда весь мир перестраивается, модернизируется, а в каком-то месте отсутствуют возможности для следования новейшим трендам, стандартам и технологическим решениям. Таким образом, технологическое неравенство наслаивается на экономическое, порождая новые формы дискриминации различных групп населения, провоцируя ограничения для реализации их потребностей, интересов и даже порождая новые скрытые формы эксплуатации.

Современные нейросети устроены порой так сложно, а массивы обрабатываемых данных так огромны, что даже их создатели не всегда способны понять и реконструировать логику решений ИИ. Такое явление порождает эффект потенциальной неопровержимости выводов ИИ, что ведет к угрозе принятия его подсказок, советов или готовых решений в качестве идеальных. При этом даже в случае ошибки все еще не понятно, кто виноват: разработчик, пользователь или сам алгоритм. Юридическая система пока все еще не дает ответов на эти вопросы, актуальность и значимость которых нарастает.

Еще одной новой стороной проявления социальных рисков при использовании ИИ становится общение человека с чат-ботами, которое может вызывать эмоциональную привязанность, замещая реальные контакты. Анонимность, доступность, простота взаимодействия с системами ИИ при наличии у некоторых людей сложностей в самореализации в реальном мире по причине имеющихся страхов, ограничивающих убеждений или простой неуверенности в себе становятся очень привлекательными факторами. Алгоритмы соцсетей специально подбирают контент для удержания внимания, вызывая зависимость, интерес или тревогу. Особенно страдают от этого дети и подростки, жизненного опыта которых недостаточно для полноценного управления своим вниманием и поведением. Как следствие возникают эффекты социальной самоизоляции, социофобия, дезадаптация, социопатия, девиантное поведение и аномия.

Остановить технологический прогресс невозможно, однако, очевидно, что требуются принятие мер для управления складывающейся ситуацией в связи с внедрением ИИ в различных сферах общественной жизни. В первую очередь, на наш взгляд, необходимо внедрение решений, повышающих прозрачность алгоритмов ИИ. Под прозрачностью понимается способность объяснить, почему алгоритм принял то или иное решение, а также возможность для пользователей, регуляторов и независимых экспертов проверить, на каких данных строилась модель, какие признаки учитывались и нет ли в ней систематических искажений. Это означает внедрение механизмов объяснимости (explainability), обязательное документирование архитектуры и ограничений алгоритма, проведение регулярных аудитов и создание процедур оспаривания автоматических решений с участием человека. Во-вторых, огромное значение имеет законодательное регулирование всех сторон использования ИИ, что выражается в своевременном принятии нормативно-правовых актов, описывающих типичные ситуации его применения в повседневной жизни. В-третьих, важнейшую роль в обеспечении устойчивого будущего будет играть обучение людей навыкам применения естественного интеллекта в тех сегментах, где ИИ не может или не должен иметь решающее значение – речь о развитии и поддержании навыков критического мышления, этических стандартах поведения, навыках самоконтроля человека, ценностных ограничениях для разработчиков, а также о предвидении и управлении последствиями технологических решений. Как подчеркивают исследователи, «этическое регулирование ИИ требует расширенного комплексного подхода и междисциплинарного сотрудничества» [3].

В заключении отметим, что искусственный интеллект меняет не только технологии, но и все общество в целом – стиль жизни, стандарты, правила, ценности, ориентиры дальнейшего развития. Однако упрощение, оптимизация или трансформация жизни, не всегда означает ее улучшение. Актуальным остается главный вопрос – место и роль человека в новой технологической реальности, его способность сохранять свой статус автора осуществляющихся изменений и возможность нести ответственность за их последствия, направлять социальное развитие в требуемое русло. Проблемы, рождаемые внедрением ИИ невозможно игнорировать. Чтобы будущее было устойчивым, комфортным и безопасным для всех, обсуждать и решать эти проблемы нужно уже сейчас.

Список использованных источников:

1. *Мурджия, М. Кодозависимые. Жизнь в тени искусственного интеллекта / М. Мурджия. - Москва: Синдбад, 2025. - 384 с.*
2. *Петрова, Т.Э. Искусственный интеллект в социальной сфере: монография / Т.Э. Петрова, Л.И. Селиванов, С.А. Соколовская [и др.]; под общ. ред. Т.Э. Петровой. – Москва: Русайнс, 2024. - 176 с.*
3. *Габидуллина, Л. Ф. Этика применения LLM–моделей в медицине и науке / Л. Ф. Габидуллина, М. Ю. Котловский // Медицинская этика. - 2025. - №3. - С. 9-13.*
4. *Кокс, Э. Исследования этических проблем применения искусственного интеллекта в библиотечном и информационном секторе / Э. Кокс, М.В. Федотова // Новости Международной федерации библиотечных ассоциаций и учреждений. - 2025. - №1(126). - С. 26-32.*
5. *Светанков, Д. Ю. Социально-правовая обусловленность формирования механизма уголовно-правового противодействия преступлениям, совершенным с использованием технологии deepfake / Д. Ю. Светанков // Российский следователь. - 2025. - № 6. - С. 47–51.*
6. *Завгороднева, Е.В. К вопросу о криминализации порнографических глубоких фейков / Е. В. Завгороднева, А.Г. Голощапова // Российско-азиатский правовой журнал. - 2025. - № 1. - С. 90–97.*

САМОИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИЧНОСТИ КАК ПРОБЛЕМА СОВРЕМЕННОЙ СОЦИАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ

Москалькова А. Ю., Кухарёнок А. С., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Мащитько С.М. – канд. фил. наук, доцент

Работа посвящена анализу самоидентификации личности в современной социальной философии. Рассматриваются изменения идентичности под влиянием глобализации и цифровой среды, а также её множественный и динамичный характер.

Самоидентификация личности является одной из ключевых проблем современной социальной философии, поскольку она затрагивает фундаментальные вопросы о том, кем является человек в условиях быстро меняющегося мира [1]. В эпоху глобализации, цифровизации и культурного многообразия традиционные основания идентичности подвергаются пересмотру, что делает процесс самоопределения более сложным и многослойным.

Классические философские подходы рассматривали идентичность как относительно устойчивую категорию, формирующуюся под влиянием культуры, социальной среды и личного опыта. Однако в современном обществе наблюдается тенденция к «размыванию» устойчивых идентичностей. Индивид оказывается вовлечён в множество социальных контекстов — профессиональных, культурных, виртуальных, — каждый из которых предъявляет свои требования и формирует различные аспекты «Я». В результате возникает феномен множественной идентичности, при котором человек одновременно принадлежит к нескольким социальным мирам [2]. Особую роль в трансформации самоидентификации играет цифровая среда. Социальные сети и онлайн-платформы создают пространство, в котором личность может конструировать и репрезентировать себя по-разному. Это приводит к усилению рефлексивности, но одновременно и к кризису аутентичности: возникает вопрос, насколько «цифровое Я» соответствует реальному. В итоге самоидентификация становится не только внутренним процессом, но и публичным актом, зависящим от признания со стороны других. Современные философы подчеркивают, что идентичность формируется в диалоге с обществом. Согласно теориям социального конструктивизма, личность не обладает фиксированной сущностью, а постоянно конструируется в процессе коммуникации и социального взаимодействия [3]. Это означает, что самоидентификация всегда связана с признанием, нормами и ожиданиями, существующими в обществе. В условиях культурного плюрализма и социальной нестабильности этот процесс становится особенно напряжённым. Кроме того, проблема самоидентификации тесно связана с вопросами свободы и ответственности. С одной стороны, современный человек получает больше возможностей для выбора жизненного пути и самореализации. С другой стороны, эта свобода сопровождается неопределённостью и необходимостью самостоятельно определять свои ценности и цели. В этом контексте кризис идентичности можно рассматривать как следствие избыточной свободы и недостатка устойчивых ориентиров.

Таким образом, самоидентификация личности в современной социальной философии предстает как динамичный и противоречивый процесс, находящийся на пересечении индивидуального опыта и социальных структур [4]. Она отражает основные вызовы современности — глобализацию, цифровизацию, культурное разнообразие — и требует новых теоретических подходов для своего осмысления. Особую остроту проблеме придают технологии, ставящие вопрос о границах человеческого «Я». Способность к самоидентификации становится мерой устойчивости личности в эпоху перемен.

Список использованных источников:

1. Тейлор, Ч. Источники «Я»: становление современной идентичности / Ч. Тейлор. – М. : Канон+, 2015. – 680 с.

2. Бауман, З. Индивидуализированное общество / З. Бауман. – М. : Логос, 2005. – 390 с.

3. Социальное конструирование реальности: трактат по социологии знания / П. Бергер, Т. Лукман // М. : Академический проект, 2020. – 323 с.

4. Гидденс, Э. Устроение общества: очерк теории структурации / Э. Гидденс. – М. : Академический проект, 2005. – 528 с.

ФИЛОСОФИЯ КОММУНИКАЦИИ И СОВРЕМЕННАЯ ЦИФРОВАЯ СРЕДА

Лаппо В. Д., Сосновская А. В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Гуринович С. В. – преподаватель

Работа посвящена одному из важнейших каналов социализации личности – коммуникации. Рассматривается потенциал основных модусов коммуникации: монолог, диалог, молчание. Раскрываются современные цифровые трансформации коммуникативных актов.

Коммуникация является важнейшей категорией в рамках философской антропологии, поскольку она выступает существенным фактором социализации личности. Коммуникация в строгом смысле – это информационный процесс, передача субъектом сообщения объекту [1]. Философ К. Ясперс определяет коммуникацию как универсальное условие человеческого бытия. Он выделяет уровни «Я» (эмпирический, сознание вообще, дух, экзистенциальная коммуникация) и соответствующие им типы общения. Эмпирический – другой как средство для выживания. Сознание вообще – обмен логическими, общезначимыми смыслами. Дух – общение через причастность к целому (народу, культуре). Экзистенциальный – подлинное общение уникальных «самостей», где человек раскрывается через другого [2]. Лотман добавляет, что коммуникация может быть направлена на самого себя («Я – Я»), что меняет саму личность (аутокоммуникация). Бейтсон подчёркивает важность «рамки» (например, «это шутка»), которая задаёт способ понимания сообщения. В современном мире доверие к такой рамке часто важнее содержания [3].

В зависимости от характеристик субъектов и типов взаимодействия в философской антропологии классифицируют социальную коммуникацию в таких модусах, как монолог, диалог, молчание.

Монолог представляет собой асимметричную форму общения, при которой один голос претендует на исключительное обладание истиной. По К. Ясперсу, как только человек воображает себя носителем безусловной истины, подлинная коммуникация прекращается [2]. Ю. Лотман сравнивал монолог со скульптурой: она рассчитана на созерцание и не требует ответа [3]. *В сущностном плане монолог нередко понимают как внутренний диалог. В лингвистике и литературоведении монолог определяют как целостное высказывание, которое не предполагает немедленной ответной реплики и как бы «изъято» из живого диалогического обмена.* При этом даже в условиях многообразия коммуникативных практик монолог сохраняет свою суверенную «креативную» или «индустриальную» структуру: он представляет собой сложный объект, систему структурных элементов (реплики, предлоги, контакты, приставки, интонации), которые вместе образуют цепочку смысловых действий. Идеи абсолютной истины, абсолютной правдоподобности, абсолютной веры служат основой для построения монологического текста, который, в свою очередь, становится основанием для дальнейшего анализа и обобщения.

Диалог, с точки зрения философской антропологии, является фундаментальным условием становления личности. М. М. Бахтин утверждал: «Быть – значит общаться диалогически», поскольку человек обретает себя только через Другого [4]. К. Ясперс рассматривал диалог как «меру человека»: подлинная коммуникация – это общение «в истине», где происходит обнаружение своего «Я» в Другом [5]. В отличие от узкотехнической коммуникации, диалог (общение) предполагает симметричную связь, где участники выступают как функционально равные и свободные субъекты совместной деятельности. В моменты кризисов и катастроф диалог становится единственным способом преодоления абсурдности бытия, заставляя человека обращаться к духовным истокам и искать взаимопонимания поверх культурных и конфессиональных барьеров. Подлинная диалогическая коммуникация возможна только при условии отказа сторон от претензий на владение «безусловной истиной», так как «с борцами за веру говорить невозможно» [2].

Молчание в философии коммуникации также признаётся полноценной коммуникативной единицей. Оно может выступать знаком отказа, неспособности поддерживать отношения или, напротив, формой глубокого присутствия. Социолог Э. Ноэль-Нойман ввела понятие «спираль молчания», описывающее ситуацию, когда человек, опасаясь изоляции, не высказывает мнение, расходящееся с позицией большинства или СМИ. В таком контексте молчание становится индикатором конформизма или скрытого несогласия [3]. Помимо этих аспектов, молчание обнаруживает значительный личностный и творческий потенциал. Исследователи отмечают, что безмолвие способствует обретению состояния внутренней гармонии, наполненности, а также обладает напряжённостью и активностью. Молчание закономерно «разрешается» прорывом в реальное творчество, соединяя буквы и звуки с тем, что их породило.

По способу взаимодействия выделяют непосредственную и опосредованную коммуникацию. Общение как форма непосредственной коммуникации отличается личностно-экзистенциальной связью и функциональным равенством. Это симметричное взаимодействие, в котором участники выступают

равноправными субъектами совместной деятельности. При непосредственной коммуникации важную роль играют невербальные сигналы и общность переживания ситуации [1]. *Этого нельзя утверждать об опосредованной коммуникации. Её главная проблема – ограниченность межличностного восприятия:* участники испытывают трудности в оценке друг друга и вынуждены мысленно «достраивать» образ собеседника на основе стереотипов [2].

Современная коммуникативная среда характеризуется вытеснением прямого общения. Важным преимуществом является отсутствие зависимости у субъектов взаимодействия от времени и местоположения, комфортная среда и анонимность. Однако это же приводит к определенным рискам. Главной проблемой становится ограниченность межличностного восприятия, что затрудняет понимание и формирование эмоциональных привязанностей. Еще одной проблемой сетевой коммуникации является анонимность в сети. В условиях, когда личность скрыта, коммуникация превращается в механический обмен данными. С точки зрения М. Бубера, в такой среде «Ты» собеседника исчезает, превращаясь в объект («Оно»), который можно анализировать или использовать, но с которым невозможно подлинное бытие. Анонимность в цифровой среде часто ведет к проявлению агрессии, обсценной лексике и переходу общения на уровень «эмпирического Я», где другой человек воспринимается лишь как средство [4]. Опираясь на классификацию К. Ясперса, исследователи отмечают, что анонимность удерживает общение на самом низшем, эмпирическом уровне. На этом уровне другой человек воспринимается лишь как средство для получения удовольствия, информации или самосохранения. Такое общение не является целью, *а направлен лишь на удовлетворение практических потребностей* [2].

Развитие нейросетей одновременно усилило и упростило коммуникацию, но также сделало её более опосредованной и противоречивой. Так, например поиск информации, выполнение рутинных задач стало гораздо быстрее и удобнее. Появились первые чат-боты-компаньоны, с которыми люди общаются ежедневно. Они доступны всегда, подстраиваются под эмоциональное состояние пользователя, никогда не критикуют и всегда готовы помочь. Из этого вытекают новые проблемы. Часть людей начинает предпочитать ИИ-собеседников реальным людям, что снижает мотивацию развивать эмпатию, терпение и навыки решения конфликтов в реальных отношениях [6]. Нейросети прекрасно симулируют эмпатию и человек быстро привыкает к идеальному, всегда поддерживающему партнеру. Такая эмпатия ненастоящая. Человек может ощутить себя менее одиноким, но эффект этот кратковременный. В долгосрочной перспективе это может привести к социальной изоляции и сильной эмоциональной зависимости от технологий. диалог с большими языковыми моделями имеет форму «аутокоммуникации»: адресант и адресат частично совпадают, потому что нейросеть отвечает строго в рамках того, что пользователь смог сформулировать [7].

Таким образом, современные коммуникативные практики характеризуются противоречивой динамикой: с одной стороны, они расширяют возможности для обмена информацией и преодоления пространственно-временных границ, с другой – ставят под угрозу самоценность диалогической встречи. Среди ключевых проблем цифровой среды можно выделить ограниченность межличностного восприятия, вынужденное достраивание образа собеседника и утрату невербальных каналов связи. Особую роль в этом контексте играет анонимность. Современное развитие нейросетей и технологий искусственного интеллекта порождает новые коммуникативные практики, среди которых особое место занимает аутокоммуникация – диалог человека с языковой моделью, фактически являющийся разговором с самим собой. Такое общение создаёт иллюзию эмпатии и доступности, однако несёт риски эмоциональной зависимости, атрофии навыков реального взаимодействия и углубления социальной изоляции.

Список использованных источников:

1 Яскевич, Я. С. Философские проблемы социальной коммуникации : учебное пособие / Я. С. Яскевич. — Минск : Вышэйшая школа, 2017. — 286 с..

2 Демидов, А. Б. Феномены человеческого бытия / А. Б. Демидов. — Минск : Экономпресс, 1999. — (Глава IV. Коммуникация).

3 Почепцов, Г. Г. Теория коммуникации / Г. Г. Почепцов. — М. : Рефл-бук ; Киев : Ваклер, 2001. — 656 с..

4 Серёгин, А. А. Проблемы современной социальной коммуникации: философский аспект / А. А. Серёгин // Манускрипт. — 2021. — Т. 14, вып. 9. — С. 1887–1891.

5 Мудрагей, Н. С. Коммуникация как мера человека (возрождая Ясперса) / Н. С. Мудрагей. — С. 143–155

6 Wei, M. How AI could shape our relationships and social interactions / M. Wei // Psychology Today. — 2025. — July 10. — URL: https://www.psychologytoday.com/us/blog/urban-survival/202502/how-ai-could-shape-our-relationships-and-social-interactions (дата обращения: 26.03.2026).

7 Может ли искусственный интеллект повлиять на отношения и привести к социальной изоляции // nappc.ru. — 2025. — 10 июля. — URL: https://nappc.ru/tpost/jksa0n0i51-mozhet-li-iskusstvennii-intellekt-povliy (дата обращения: 26.03.2026).

АЛГОРИТМЫ, ВНИМАНИЕ И ИДЕНТИЧНОСТЬ: ФИЛОСОФСКИЙ ВЗГЛЯД НА ЦИФРОВОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ

Макей П.Ю., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

В работе рассматривается влияние цифровых платформ и алгоритмов на трансформацию потребления, внимания и идентичности. Показано, что в условиях цифровой среды потребление приобретает символический и нематериальный характер, а пользователь одновременно выступает как потребитель контента и ресурс. Анализируются концепции ложных потребностей, коммодификации внимания, фильтровых пузырей и социального сравнения. Делается вывод о снижении автономии субъекта и росте алгоритмического воздействия на формирование желаний и восприятия, а также о необходимости сохранения критического мышления в цифровую эпоху.

Цифровизация существенно трансформировала классическое понимание потребительского общества. Выбор пользователя в данной среде формируется не только его личными предпочтениями, но и внешними информационными воздействиями – прежде всего персонализированной рекламой и рекомендательными системами. Актуальность темы связана с тем, что цифровое потребление влияет на идентичность человека, его автономию и способность к критическому мышлению. Возникают риски манипуляции вниманием, внутреннего отчуждения и зависимости от алгоритмических систем.

Классическая теория общества потребления (по Ж. Бодрийяру) утверждает, что люди потребляют не сами вещи, а их символические значения. Потребление становится способом социальной идентификации и выражения статуса [1]. Г. Маркузе вводит концепцию «ложных потребностей», которые навязываются обществом. Люди стремятся удовлетворять желания, не являющиеся их подлинными, чтобы соответствовать социальным ожиданиям [2]. В цифровую эпоху идеи Бодрийяра и Ги Дебора получают новое развитие – объектом потребления становится информационный поток, социальные отношения всё больше опосредуются образами [3].

Цифровая среда радикально меняет идентичность. В отличие от классического понимания идентичности, где «Я» относительно устойчиво [4], онлайн-идентичность гибкая и конструируемая. Самопрезентация тесно связана с потреблением: демонстрация товаров, образа жизни и визуального контента становится способом конструирования идентичности.

Пользователь постоянно сталкивается с идеализированными образами чужой жизни, что приводит к неудовлетворённости и феномену FOMO (страха упущенных возможностей) [5]. С философской точки зрения (позиция Ж.-П. Сартра), это можно интерпретировать как усиление зависимости от «взгляда Другого»: человек начинает воспринимать себя как объект оценки, что сопровождается чувством уязвимости и снижением автономии [6].

Анализируя поведение пользователя, алгоритмы создают персонализированный контент, стимулирующий новые желания. Цифровые платформы извлекают прибыль, удерживая внимание и анализируя поведенческие данные. Алгоритмическая персонализация ограничивает свободу выбора. Пользователь получает заранее отобранный контент, что сужает спектр альтернатив и ставит под вопрос степень его свободы. Формируются «фильтровые пузыри» и «эхо-камеры», в которых человек сталкивается преимущественно с согласующимися с его взглядами мнениями. Это усиливает поляризацию, способствует распространению дезинформации и снижает критичность восприятия [7]. Цифровая среда влияет на когнитивные процессы. Частое переключение внимания формирует фрагментарное мышление, снижая способность к длительной концентрации и рефлексии [8].

В цифровой среде формируется новый тип субъекта, чьи желания, восприятие и самоидентификация всё больше опосредованы алгоритмами и социальным сравнением. Это усиливает зависимость от внешних механизмов признания и снижает автономию, превращая внимание и поведение пользователя в экономический ресурс. Следовательно, ключевой задачей становится сохранение способности к рефлексии и независимому выбору.

Список использованных источников:

1. Бодрийяр, Ж. Общество потребления / Ж. Бодрийяр. – М. : Республика, 2006. – 269 с.
2. Маркузе, Г. Одномерный человек / Г. Маркузе. – М. : АСТ, 2003. – 331 с.
3. Дебор, Г.-Э. Общество спектакля / Г.-Э. Дебор. – М. : Логос, 2000. – 184 с.
4. Erikson, E. H. Identity: Youth and Crisis / E. H. Erikson. – New York : W. W. Norton & Company, 1968. – 336 p.
5. Fear of Missing Out [Electronic resource]. – Mode of access: https://clc.li/CtOZg. – Date of access: 17.03.2026.
6. Сартр, Ж.-П. Бытие и ничто / Ж.-П. Сартр. – М. : Республика, 2000. – 639 с.
7. Влияние алгоритмов персонализации контента на модели медиапотребления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://clc.li/hBTVK. – Дата доступа: 22.03.2026.
8. Digital media use and attention [Electronic resource]. – Mode of access: https://clc.li/sKqtO. – Date of access: 22.03.2026.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМЕ СОВРЕМЕННОГО НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

Нгуен Хоанг Хиеп, магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чуешов В. И. – д-р фил. наук, профессор

В статье представлен исчерпывающий философско-методологический анализ роли информационных технологий (ИТ) в системе современного научного познания. ИТ рассматриваются не просто как инструмент, а как фундаментальная социокультурная среда, трансформирующая методологию науки. Проанализированы ключевые функции ИТ, их прикладное использование (САПР, имитационное моделирование, *Big Data*), а также основные этические и методологические вызовы цифровизации, включая проблему «черного ящика» ИИ, кризис верификации, академический плагиат и информационную перегрузку.

В современном мире информационные технологии (ИТ) занимают центральное место, выступая главным драйвером научно-технического прогресса, обусловленным потребностями постиндустриального общества [1]. Интеграция ИТ в науку спровоцировала настоящую эпистемологическую и методологическую революцию, создав фундамент для исследований беспрецедентного масштаба и сложности.

Если классическая наука опиралась на индивидуальный анализ и натурный эксперимент, то сегодня вычислительные кластеры и ИИ обрабатывают петабайтные массивы данных. Это позволяет моделировать сверхсложные процессы и генерировать новые знания, недоступные традиционным методам индукции и дедукции [2]. Стремительная цифровая трансформация радикально меняет процессы генерации, верификации и трансляции научных фактов, что требует их глубокого философского осмысления.

Понимание текущей технологической революции опирается на трехуровневую концепцию развития человеческого интеллекта Огюста Конта [3]. Исторически наука прошла через следующие стадии:

– Религиозная (теологическая): Объяснение явлений через вмешательство трансцендентных сил, основанное на вере и догматизме, без использования инструментария.

– Философская (метафизическая): Рациональное конструирование мира через абстрактные сущности, опирающееся на интуицию и умозрительную дедукцию.

– Позитивная (научная): Фиксация объективных фактов посредством измерительных приборов и строгой математизации. Знание отвечает на вопрос «как», а не «почему».

– Информационно-цифровая (современность): Экстраполяция позитивизма в цифровую среду. Генерация знаний осуществляется через имитационное моделирование, алгоритмический анализ *Big Data* и нейросети [3].

Цифровая эпоха стала гипертрофированным воплощением позитивистского идеала. Информационные системы многократно усилили когнитивные способности человека, а наука трансформировалась в непосредственную производительную силу наукоемкой экономики [1].

В современном философском дискурсе технология – это не просто набор станков, а всеобъемлющая социокультурная макросистема [4]. Информатизация обострила проблему репрезентации знаний. Если раньше основой универсализации выступала математика, то сегодня вектор сместился к созданию универсальных семантических онтологий, подходящих для машинного обучения.

Высшей интегративной формой познания стало имитационное моделирование. Оно позволило алгоритмизировать и подвергнуть строгой верификации гуманитарные дисциплины, объединив концептуальные гипотезы с вычислительными мощностями ЭВМ [3].

Информационные технологии детерминируют новую парадигму научной рациональности, выполняя комплекс важнейших функций [4]:

– Коммуникативная: Обеспечивает мгновенное профессиональное общение (например, глобальные сетевые дискуссии по сверхпроводимости), делая субъектом познания не индивида, а международные коллаборации.

– Методологическая: Внедряет компьютерное моделирование как равноправный метод наряду с теорией и натурным экспериментом, обеспечивая управление сложнейшим оборудованием.

– Кумулятивная: Решает проблему информационного взрыва через систематизацию экспоненциально растущих баз данных и дифференциацию знаний по уровням достоверности.

– Организационная: Объединяет усилия государства, академии и бизнеса, способствуя формированию самоорганизующихся «невидимых колледжей».

– Оценочная (Экспертная): Глобализирует институт рецензирования (Peer review), делая оценку вклада ученых прозрачной и открытой.

– Этическая: Реализует императивы этоса науки (по Р. Мертону) через требования цифровой прозрачности (*Open Access*), но одновременно ведет борьбу с плагиатом [5].

Качество современных исследований находится в прямой зависимости от программного инструментария [6]:

– Системы компьютерной алгебры (СКА): Пакеты *Maple*, *MathCad* и *MATLAB* автоматизировали рутинные символьные вычисления. Исследователь лишь задает граничные условия, а система автономно подбирает алгоритмы интегрирования и дифференцирования [6].

– САПР и инженерный анализ (CAD/CAE): В градостроительстве и электротехнике комплексы *AutoCAD* и *Multisim* позволяют синтезировать сложнейшие принципиальные схемы и симулировать их работу, минимизируя время и исключая фатальные ошибки без затрат на физические прототипы [7].

– Вычислительный эксперимент: Стал незаменим для изучения нелинейных систем. Например, разработка модели траекторного сигнала радиолокатора БПЛА в среде *MATLAB* позволила авторам избежать громоздких вычислений и сфокусироваться на интерпретации радиофизических феноменов [8].

– Искусственный интеллект и логико-лингвистические методы: Экспертные системы и интеллектуальные пакеты автономно синтезируют математические модели по запросам на естественном языке, революционизируя диагностику и прогнозирование.

Феномен Больших данных (*Big Data*) превратил ИТ из внешнего инструмента в базовую «среду обитания» информации. Обработка петабайтных неструктурированных массивов нейросетями привела к методологическому развороту в эпистемологии [9].

В отличие от классической науки, где гипотеза предшествует эксперименту, ИИ в парадигме Big Data автономно находит глубоко скрытые корреляции в «информационном шуме» без первоначальной теории. Эта предиктивная мощь алгоритмов возрождает концепцию абсолютного детерминизма – «демона Лапласа», позволяя науке с высочайшей точностью предсказывать климатические, экономические и социальные процессы [9].

На фоне технологического триумфа ИТ порождают комплекс острых кризисов, требующих философского осмысления [2]:

– Проблема «черного ящика» ИИ: Нейросети выдают точные прогнозы, но их внутренняя логика непрозрачна. Возникает иллюзия понимания: наука начинает лишь констатировать факты, утрачивая понимание причинно-следственных связей.

– Информационная перегрузка и фейки: Нецензурируемый доступ к базам порождает когнитивный хаос и риск инфильтрации в науку сгенерированных нейросетями фальсификаций.

– Кризис академической этики: Технологии автоматического перевода и синонимизации спровоцировали эпидемию скрытого плагиата и фабрикации компилятивных работ, с которыми алгоритмы антиплагиата справляются лишь частично [5].

– Социальная атомизация: Виртуализация сокращает межличностное общение в кулуарах, где исторически рождались прорывные идеи.

– Технологическое неравенство: Высокая стоимость суперкомпьютеров и лицензионного ПО (САПР, *MATLAB*) создает элитарность, закрывая доступ к передовой науке лабораториям с малым финансированием.

Информационные технологии безвозвратно стали системообразующим базисом современной науки, радикально изменив ее методологический ландшафт. Среды инженерного анализа (Multisim) и инструменты компьютерной алгебры (*MATLAB*) легитимизировали вычислительный эксперимент как полноправный способ познания [7]. Переход к Большим данным (*Big Data*) открыл новые горизонты автономной предиктивной аналитики, многократно ускорив генерацию знаний [9].

Однако ИТ порождают и критические вызовы: от непрозрачности ИИ до массового академического плагиата. Для их преодоления научному сообществу предстоит сформировать новую цифровую культуру и этические протоколы. ИТ – это мощнейший, но нейтральный инструмент, влияние которого на поиск истины всецело зависит от интеллектуальной ответственности самого исследователя.

Список использованных источников:

1. *Смирнова, О. В. Информационные технологии в научном познании / О. В. Смирнова // Современные информационные технологии. Теория и практика :– Череповец, 2016, с. 88 – 90.*
2. *Научные коммуникации в проффесиональной деятельности современного педагога [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnye-kommunikatsii-v-professionalnoy-deyatelnosti-sovremennogo-pedagoga – Дата доступа: 05.02.2026.*
3. *Типология информационно-коммуникационных технологий / Общество: философия, история, культура. – Москва, 2022.*
4. *Артюшина, Л. А. Компьютерные технологии в науке и образовании : учеб.-практ. пособие / Л. А. Артюшина, Т. В. Спирина, Е. А. Троицкая. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018, с. 29*
5. *Чариков, П. Н. Цифровые технологии обработки информации / П. Н. Чариков. – Уфа, 2023.*
6. *Нгуен, Х. Х. Проектирование радиоприёмного устройства / Х. Х. Нгуен. – Минск, 2024.*
7. *Когнитивно-аксиологические аспекты научного знания в контексте философского дискурса / Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences. – Ташкент, 2024.*
8. *Лебедев, С. А. Философия науки. Позитивно-диалектическая концепция. / С. А. Лебедев. – Москва, 2021, с 130 – 136.*
9. *Пестунов, А.И. Big data как феномен: причины и следствия появления больших данных / Пестунов А.И., Гинтофт А.С., Криветченко О.В. // ЭКО. № 9, 2023. с. 137 – 154.*

ТРАНСФОРМАЦИЯ МОРАЛЬНЫХ ЦЕННОСТЕЙ В ЭПОХУ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Хартанович У.И., Хомич Н.М., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И.М. – канд. фил. наук, доцент

В работе рассматривается проблема трансформации моральных ценностей в эпоху цифровизации, анализируется кризис классических этических программ и феномен дегуманизации, подтвержденный эмпирическими данными о готовности людей делегировать алгоритмам экзистенциальные выборы.

Трансформация моральных ценностей в эпоху цифровизации представляет собой одну из наиболее значимых проблем современной философской мысли, поскольку цифровые технологии затрагивают все аспекты деятельности человечества, изменяя сложившийся образ жизни, мышления, поведения, коммуникации, формируют новый облик современного общества. Цифровая среда перестает быть нейтральным инструментом и становится активным медиатором человеческих ценностей. Цифровые технологии открывают беспрецедентные возможности для демократизации информации и расширения индивидуальной агентности, но одновременно поражают риски моральной дезориентации, алгоритмической предвзятости.

Подход Иммануила Канта проблематизируют моральную автономию личности в условиях, когда алгоритмы машинного обучения анализируют поведение и предлагают готовые решения. Человек невольно начинает следовать программному коду, что ставит под вопрос саму возможность применения классических нормативно-этических программ, поскольку онтологическая структура морального действия претерпевает радикальные изменения.

Деонтологическая теории сталкиваются с еще более глубоким парадоксом. Логика максимизации общего блага, казалось бы, находит в технологиях больших данных свой идеальный инструмент: алгоритмы способны просчитывать последствия для миллионов агентов и находить оптимальные решения, обещающие наибольшую пользу для наибольшего числа людей. Возникает вопрос о существовании морального минимума – тех ценностей и прав, которые не могут быть принесены в жертву даже ради всеобщего счастья. Цифровая среда, обещающая безопасность и благополучие, оборачивается новой формой тоталитаризма, где категорический императив Канта «человек всегда цель, а не средство» систематически нарушается, когда личность превращается в точку данных, подлежащую обработке м оптимизации. Проблематизируется даже испытанное веками и культурами Золотое правило нравстенности. Мы привыкли жить в мире, где человек действует в соответствии с моральными нормами, которыми, как он полагает, руководствуются или, по крайней мере, должны руководствоваться и все остальные люди. В эпоху больших данных привычные правила перестают работать. Люди все чаще подстраивают свое поведение под подсказки алгоритмов, которые работают здесь и сейчас. При этом человек часто не чувствует, где заканчивается его собственное решение и начинается влияние машины. О том, что алгоритмы могут угрожать нашей моральной свободе – способности поступать по совести самостоятельно – задумываются в основном специалисты. Обычные пользователи об этом почти не задумываются. Они просто доверяют цифровым советам, даже когда речь идет о непростых этических вопросах. Так и получается, что сегодня многие люди решают свои моральные дилеммы не через разговор с другом или с самим собой, а с помощью искусственного интеллекта, которые дает им готовый ответ, что правильно, а что нет.

В эпоху цифровизации наиболее тревожной проблемой становится дегуманизация, проявляющаяся в двух основных формах. Прямая дегуманизация заключается в объективации человека и отчуждении от него права на принятие решений. Цифровая система на основе непрозрачных алгоритмов выносит вердикт о важных вопросах. Человек превращается в набор данных, подлежащих статистической обработке, а его индивидуальная судьба оказывается подчиненной вероятностным моделям, которые не учитывают того, что составляет суть человеческого существования. Отчуждение от права на принятие решений означает не просто потерю контроля, но и глубинную экзистенциальную утрату – человек перестает быть автором собственной жизни, превращаясь в объект управленческих воздействий.

Обратная дегуманизация представляет собой процесс, при котором человек добровольно делегирует технологиям не только рутинные, но и экзистенциальные выборы. Это явление тем более тревожно, что оно осуществляется не под внешним принуждением, а из внутреннего стремления к комфорту, снижению тревоги, связанной с принятием решений. Стремление к комфорту оборачивается утратой тех качеств, которые традиционно считались сущностно человеческими: эмпатии, милосердия, способности к прощению, не поддающиеся алгоритмической калькуляции. Технологии, будучи внеморальными по своей природе, не несут злого умысла – они нейтральны как инструменты. Однако

их массовое использование в качестве заменителей человеческого присутствия и человеческого суждения формируют среду, в которой моральные категории перестают быть востребованными, а значит, постепенно атрофируются те способности, которые делают возможными само моральное существование человека.

В современном мире дегуманизация имеет двойственную природу, что подтвердил опрос, проводимый среди студентов БГУИР – будущих IT-специалистов. В опросе участвовал 41 человек. Результаты показали, что 48.8% студентов (20 человек) готовы доверить алгоритму важное решение, если статистически доказано, что он ошибается реже человека. Остальные 51.2% (21 человек) считают, что в таких вопросах человеческое участие важнее, даже если алгоритм эффективнее. Интересно, что мнения разделились почти поровну даже среди тех, кто профессионально связан с технологиями и использует их ежедневно. Это говорит о том, что вопрос доверия к искусственному интеллекту остается спорным. Половина студентов готова положится на алгоритмы, остальные настаивают на сохранении за человеком права принимать важные решения.

Рисунок 1 – Результат опроса

Проблема дегуманизации в цифровую эпоху является весьма актуальной, потому что Интернет-пространство – это новая среда для общения, образования, карьеры, развития людей, в которой еще нет сложившейся этики. Люди тысячелетиями осмысливали, как вести себя в физическом мире. Но вот как вести себя этично в мире виртуальном – это совершенно новая и непростая задача. Главная сложность в том, что размышлять об этом нужно уже сегодня, потому что IT-технологии меняют нас прямо сейчас. Только так мы сможем понять, каким нравственным ориентирам учить будущие поколения. Да, риски и вызовы, связанные с большими данными, реальны. Но это не значит, что мы обречены потерять свою человечность, свои моральные принципы и те нравственные понятия, которые веками проверялись жизнью. У нас есть все шансы их сохранить. Как этого достичь? Нужно менять сам подход к созданию технологий – делать их более этичными по дизайну. Нужно учить людей разбираться в том, как работают продукты, основанные на аналитике больших данных. И наконец, никогда не теряло и не потеряет своей силы обычное морально воспитание и самовоспитание – без них не обойтись в любую эпоху.

Список использованных источников:

1. Зарубина, Н. Н. Тенденции дегуманизации в цифровом обществе: к обоснованию гуманистического подхода к технологическому развитию / Н. Н. Зарубина // Вестник Московского государственного областного университета. – 2021. – №4. – С. 60–70.

2. Хартанович, У.И. Трансформация моральных ценностей в эпоху цифровизации / У. И. Хартанович, Н. М. Хомич // Google Формы [Электронный ресурс] – Режим доступа : https://acesse.one/23Irm .

3. Солдатова, Н. О. К вопросу о цифровой дегуманизации и цифровом бытии / Н. О. Солдатова, Н. Р. Вяльшин // Вестник Бурятского государственного университета. – 2025. – №3. – С. 72–79.

4. Алексеева, М. В. Социально-философские аспекты цифровой этики: вызовы, перспективы и значение в эпоху технологического прогресса / М. В. Алексеева, А. А. Рокотянская // Научный альманах стран Причерноморья. – 2025. – №11 (4). – С. 7–12.

5. Человек в цифровом мире: проблема дегуманизации личности [Электронный ресурс] – Режим доступа : https://cyberpsy.ru/articles/degumanizaciya-lichnosti/ .

6. Трубина, Н. А. Трансформация моральных ценностей в цифровой коммуникации / Н. А. Трубина, Л. Р. Миркушина // Вестник МГПУ. – 2022. – №3 (43). – С. 44–56.

7. Коваль, Е.А. Трансформация моральных норм и ценностей в эпоху больших данных / Е.А. Коваль, М.Д. Мартынова // Этическая мысль. – 2024. – №2 (24). – С. 108–112.

ФОРМИРОВАНИЕ ИДЕНТИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ИНДИВИДУАЛИЗАЦИИ И КУЛЬТУРЫ САМОПРЕЗЕНТАЦИИ

Чухонская К.А., Павлюткина М.С., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ратникова И. М. – канд. фил. наук, доцент

В статье анализируется самоконструирование личности в условиях индивидуализации современного общества. Показано, что идентичность утрачивает устойчивый характер и формируется как открытый, рефлексивный процесс. Рассматривается роль социальных взаимодействий и практик самопрезентации, включая цифровую среду, в становлении субъективности. Обосновано, что личность приобретает характер динамического проекта, требующего постоянного пересмотра. Сделан вывод о ключевой роли самоконструирования в формировании современной идентичности.

В условиях индивидуализации и трансформации социальных структур проблема формирования идентичности становится одной из ключевых тем современного философского анализа. Современное общество характеризуется глубокими социальными и культурными изменениями, которые существенно трансформируют представления о личности и её месте в системе общественных отношений [1, с. 37–38].

Актуальность исследования обусловлена изменением понимания личности в условиях индивидуализации современного общества. Ослабление традиционных социальных структур и расширение пространства личного выбора приводят к тому, что формирование личности всё в большей степени становится результатом индивидуального самоопределения. В этом контексте личность рассматривается не как заранее заданная сущность, а как результат активного процесса самоконструирования.

Объектом исследования является личность в современном обществе. Предмет исследования — философские основания самоконструирования личности и формирования идентичности в условиях индивидуализации и культуры самопрезентации. Цель исследования заключается в философском анализе самоконструирования личности и выявлении особенностей формирования идентичности в условиях индивидуализации и культуры самопрезентации.

Проблема личности занимает центральное место в философии, однако её понимание существенно менялось в зависимости от исторического контекста и интеллектуальных парадигм. В классической метафизике личность рассматривалась как устойчивая и самотождественная сущность, обладающая внутренним ядром, определяющим её рациональность и моральный статус. Античная мысль связывала личность с разумной душой, а новоевропейская традиция — с автономным субъектом, способным к самопознанию и свободному выбору, предполагая существование стабильного «Я», сохраняющего идентичность во времени.

В XIX–XX веках классическое понимание субъекта подвергается глубокой критике. Марксизм показывает социально-экономическую обусловленность сознания, психоанализ разрушает идею его прозрачности, выявляя роль бессознательного, а структурализм и постструктурализм интерпретируют субъекта как эффект языка, культуры и дискурсивных практик. Таким образом, личность перестаёт мыслиться как нечто данное; она становится результатом процессов, которые выходят за пределы индивидуального контроля.

На этом фоне Ницше предлагает принципиально новое понимание личности как динамического процесса самосозидания. Он отвергает идею фиксированной человеческой природы и утверждает, что человек должен «становиться тем, кто он есть», преодолевая навязанные обществом нормы. Личность у Ницше — это творческий проект, требующий постоянного усилия и внутренней работы над собой. Экзистенциальная философия Хайдеггера развивает эту идею, трактуя человека как «бытие-к-проекту»: личность не обладает сущностью, но формируется через выборы, ответственность и принятие собственной конечности. В свою очередь, Фуко показывает, что субъект возникает в поле власти и дискурсов, но способен преобразовывать себя через практики «заботы о себе». Его концепция субъективации подчеркивает, что личность — это не сущность и не только экзистенциальный проект, но и результат исторически конкретных техник формирования субъекта.

Современное общество характеризуется глубокими изменениями в структуре социальных связей, что приводит к ослаблению традиционных институтов и норм, ранее определявших жизненные траектории человека. Индивидуализация становится ключевой характеристикой позднего модерна: индивид больше не получает готовых сценариев поведения, а вынужден самостоятельно выстраивать свою биографию, принимать решения и формировать идентичность. Это расширяет пространство свободы, но одновременно усиливает неопределённость и ответственность за собственную жизнь.

В этих условиях идентичность приобретает рефлексивный характер. Гидденс описывает её как непрерывный проект, который человек постоянно пересматривает, интерпретирует и корректирует. Биография превращается в форму самописания, требующую постоянного мониторинга себя и окружающего мира. Идентичность становится не наследуемой, а создаваемой — результатом осознанных выборов, стратегий и практик самопрезентации. Человек вынужден не только быть собой, но и демонстрировать себя, конструируя социально признанный образ.

Однако индивидуализация порождает и внутренние противоречия. Избыточная свобода выбора приводит к росту тревожности, а отсутствие устойчивых ориентиров делает идентичность хрупкой и нестабильной. Бауман описывает современную субъективность как «текучую»: она лишена твёрдых оснований, постоянно изменяется и адаптируется к быстро меняющимся социальным контекстам. В таких условиях самоконструирование превращается в непрерывный процесс, требующий гибкости, рефлексии и способности к постоянному пересмотру собственных жизненных стратегий

В современной культуре значимым механизмом формирования идентичности выступает культура самопрезентации. Самопрезентация выступает не только формой социального выражения, но и ключевым механизмом конструирования идентичности, посредством которого субъект формирует и регулирует представления о себе в социальном пространстве.

Теоретическое осмысление данных процессов получило развитие в работах Эрвинга Гофмана. Анализируя социальное взаимодействие, он предложил рассматривать повседневную жизнь как своеобразное театральное представление, в рамках которого индивиды исполняют различные социальные роли. В этом контексте самопрезентация выступает стратегией управления впечатлением, посредством которой субъект стремится сформировать определённое представление о себе в сознании других участников взаимодействия [2, с. 49–53].

Если в концепции Э. Гофмана самопрезентация выступает как механизм социального взаимодействия и управления впечатлением, то в философии М. Фуко внимание сосредоточено на процессах субъективации, посредством которых человек формирует отношение к самому себе и конструирует собственную субъективность.

Согласно подходу М, Фуко, индивид конструирует собственную субъективность и выстраивает способы самопонимания. В условиях цифровой культуры подобные процессы всё чаще реализуются в практиках онлайн-коммуникации и публичной самопрезентации. Через участие в цифровых взаимодействиях и создание различных образов собственного «Я» субъект не только выражает свою идентичность, но и активно формирует и трансформирует её [3, с. 67–76].

В соответствии с концепцией З. Баумана, самопрезентация приобретает форму стратегической и ситуативной практики: в условиях «текучей современности» она превращается в практику непрерывной реконфигурации «Я», ориентированную на внешнее признание и механизмы публичной оценки субъекта [1, с. 38–42].

По мнению Э. Гидденса, индивид самостоятельно выстраивает жизненную стратегию и формирует целостный образ собственного «Я», постоянно соотнося собственный жизненный опыт с социальными нормами, культурными ожиданиями и индивидуальными стремлениями, что превращает формирование идентичности в непрерывный процесс самоконструирования [4, с. 26].

В условиях индивидуализации и трансформации социальных структур формирование идентичности всё в большей степени связано с рефлексивной деятельностью субъекта и его способностью самостоятельно выстраивать жизненную стратегию.

Современная философия рассматривает личность не как носителя устойчивой сущности, а как результат взаимодействия рефлексивных, дискурсивных и коммуникативных практик.
Самоконструирование при этом выступает структурно обусловленным процессом, в котором свобода субъекта реализуется в пределах культурных и социальных ограничений.

Тем самым формируется новая модель субъективности, характеризующаяся открытостью, изменчивостью и зависимостью от механизмов самопрезентации. Идентичность современного человека предстает как динамический процесс, разворачивающийся во времени и формирующийся на пересечении личной рефлексии, социальных взаимодействий и культурных практик.

Список использованных источников:

1. *Бауман, З. Текучая современность / З. Бауман. – СПб. : Питер, 2008. – 240 с.*
2. *Гофман, Э. Представление себя другим в повседневной жизни / Э. Гофман. – М. : КАНОН-пресс-Ц : Кучково поле, 2000. – 304 с.*
3. *Фуко, М. Герменевтика субъекта / М. Фуко. – СПб. : Наука, 2007. – 677 с.*
4. *Гидденс, Э. Последствия современности / Э. Гидденс. – М. : Праксис, 2011. – 352 с.*

МЕТАБОЛИЗМ ДАННЫХ И АЛГОРИТМИТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ МАТТЕО ПАСКИНЕЛЛИ

Шимченко Р.В., Шоломицкий Д.И., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шкундич А.О.— преподаватель

В цифровую эпоху данные превращаются в ключевой ресурс, сопоставимый с сырьём индустриальной экономики. Их сбор, обработка и анализ лежат в основе новых форм экономической деятельности и социального управления, а алгоритмы всё чаще принимают решения, ранее принадлежавшие человеку. В этом контексте особую значимость приобретает концепция «метаболизма данных», предложенная Маттео Паскинелли. Он рассматривает цифровую инфраструктуру не как совокупность технологий, а как динамический процесс переработки данных, в котором они выступают одновременно ресурсом, продуктом и инструментом власти.

Теоретические основания этой концепции формируются на пересечении политической экономии и медиатеории. Переосмысляя идеи Карла Маркса, Маттео Паскинелли утверждает, что в цифровой экономике алгоритмы функционируют как механизмы извлечения ценности из пользовательской активности. В отличие от индустриального производства, где основным источником стоимости является физический труд, здесь им становятся поведенческие и когнитивные данные.

Пользовательские действия — клики, просмотры, перемещения — превращаются в сырьё, которое перерабатывается алгоритмами и монетизируется цифровыми платформами. Метафора метаболизма позволяет описать этот процесс как непрерывный цикл: данные извлекаются, преобразуются в экономическую ценность и стимулируют производство новых данных, формируя самоподдерживающуюся систему.

В этом контексте алгоритмы выполняют не только вычислительные, но и управленческие функции. Они структурируют информационную среду, определяют видимость контента и формируют поведенческие паттерны пользователей. Тем самым алгоритмы становятся инструментами власти, действующими на микроуровне повседневных практик.

В отличие от традиционных форм власти, алгоритмическое управление носит распределённый и непрозрачный характер: оно встроено в инфраструктуру цифровых платформ и основано на автоматизированных решениях, что затрудняет их интерпретацию и критику. Контроль осуществляется не через прямое принуждение, а через организацию потоков информации и вероятностное моделирование поведения.

Однако концепция метаболизма данных имеет ряд ограничений. Во-первых, биологическая метафора может приводить к натурализации цифровых процессов, скрывая их социальную и политическую обусловленность. Во-вторых, акцент на извлечении стоимости сближает этот подход с экономическим детерминизмом, что может приводить к недооценке других функций алгоритмов — например, их роли в координации сложных систем и производстве знаний.

Кроме того, концепция недостаточно учитывает активность пользователей: их поведение не полностью определяется алгоритмами, они способны адаптироваться к цифровой среде и влиять на неё. Игнорирование этой агентности делает картину цифровой власти несколько односторонней.

Тем не менее, концепция Маттео Паскинелли остаётся важным инструментом анализа цифрового капитализма и алгоритмического управления. Она позволяет увидеть, что алгоритмы являются не нейтральными технологиями, а элементами более широкой системы экономических и политических отношений. В условиях роста влияния цифровых платформ особую значимость приобретают вопросы прозрачности алгоритмов, их подотчётности и регулирования.

В целом, анализ цифровой реальности требует междисциплинарного подхода, способного учитывать не только экономические механизмы извлечения и перераспределения ценности, но и социальные, культурные и политические аспекты цифровизации. Такой подход позволяет рассматривать алгоритмы как сложные социотехнические системы, в которых переплетаются интересы корпораций, государства и пользователей.

Особое значение при этом приобретает сохранение внимания к человеческой субъектности: несмотря на растущее влияние алгоритмических систем, пользователи остаются активными участниками цифровой среды. В этих условиях возрастает необходимость критического осмысления цифровых инфраструктур и развития механизмов прозрачности, регулирования и общественного контроля.

Список использованных источников:

1. Pasquinelli M. The Eye of the Master: A Social History of Artificial Intelligence. – London : Verso, 2023. – 336 p..

2. Pasquinelli M. Three Thousand Years of Algorithmic Rituals: The Emergence of AI from the Computation of Space // e-flux Journal, 2017. – № 101. – P. 1–15..
3. Маркс К. Капитал. Критика политической экономии. Т. 1. – М. : Политиздат, 1960. – 794 с.
4. Zuboff S. The Age of Surveillance Capitalism. – New York : PublicAffairs, 2019. – 704 p.
5. Srnicek N. Platform Capitalism. – Cambridge : Polity Press, 2017. – 176 p.

АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ДЕТЕРМИНИЗМ И ИЛЛЮЗИЯ СВОБОДЫ ВОЛИ: ЧЕЛОВЕК КАК ПРЕДСКАЗУЕМЫЙ МЕХАНИЗМ

Василевский В.В., Иосько М.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Миськевич В.И. – канд. фил. наук, доцент

В статье вводится понятие алгоритмического детерминизма как нового типа детерминации, возникающего из предсказательных возможностей больших данных и глубокого обучения. Через онтологический, эпистемический и феноменологический анализ демонстрируется, что свобода воли представляет собой структурно необходимую иллюзию, сохраняющуюся даже при полной внешней предсказуемости поведения. Описан оригинальный экспериментальный инструмент – веб-приложение *The Predictor*, эмпирически подтверждающий устойчивость субъективного переживания свободы при прямом столкновении с алгоритмическим предсказанием.

В 1988 году Стивен Хокинг предрекал создание единой математической теории, способной объяснить всю Вселенную. Сегодня эта мечта частично реализовалась в сфере, которую Хокинг вряд ли мог предвидеть: в предсказании человеческого поведения. Большие данные и алгоритмы глубокого обучения превратили философскую спекуляцию в операциональную реальность. Рекомендательные системы, таргетированная реклама и модели скоринга стали первыми экземплярами детерминированной модели человеческого поведения, работающей точнее саморефлексии самого субъекта [1].

Эта ситуация возвращает нас к концепции демона Лапласа – гипотетического интеллекта, способного вычислить всё прошлое и будущее Вселенной. Квантовая механика поставила под сомнение физического демона, но он возродился как распределённая вычислительная система. Современные алгоритмы, обученные на миллиардах действий, улавливают скрытые паттерны и предсказывают наши выборы. Возникает вопрос: если алгоритм предсказывает мой выбор раньше моего осознания, где остаётся место для собственного «Я»?

Центральный тезис статьи: феномен свободы воли сохраняется не вопреки детерминизму, а благодаря ему. Иллюзия свободы – это необходимый регуляторный механизм предсказывающей системы. Мы обоснуем это через реконструкцию онтологической модели человека, феноменологический анализ и разбор веб-приложения «The Predictor», позволяющего пережить столкновение с алгоритмическим детерминизмом на опыте [2].

Алгоритмический детерминизм радикально отличается от классического лапласовского. Он возникает внутри самой системы: агент накапливает данные о своём прошлом и строит предсказательные модели, направляющие будущее. Эта самообучающаяся предсказывающая иерархия функционирует согласно принципу минимизации свободной энергии (по Карлу Фристону). Мозг не пассивно регистрирует мир, а активно конструирует его, выдвигая гипотезы о скрытых причинах сенсорных данных. Минимизируя расхождения между предсказаниями и сигналами, система либо обновляет внутреннюю модель, либо совершает действие. Детерминизм здесь не внешний, а самопорождающий [3].

В этой иерархии «Я» представляет собой нарративную само-модель, необходимую для координации в сложной среде. Однако полная прозрачность само-моделирования потребовала бы бесконечной вложенности, ведущей к регуляторному коллапсу. Поэтому «Я» остаётся структурно непрозрачным для глубинных алгоритмических процессов, его порождающих.

Архитектура мозга удивительно схожа с нейросетями: как механизм само-внимания взвешивает контекст для предсказания, так и наш цикл генерирует действие, минимизируя ошибку. В этой системе истинная свобода воли невозможна, но её иллюзия служит критически важным предсказательным самообманом. Полное осознание собственной детерминированности лишило бы систему мотивации, поэтому переживание открытого будущего необходимо нам для построения адаптивных долгосрочных планов.

Эпистемический разрыв между онтологической реальностью алгоритмического детерминизма и феноменологическим переживанием свободы принципиально непреодолим. Свобода воли – это способ, которым система переживает собственную непрозрачность. В отличие от концепций Деннета или Чалмерса, мы утверждаем, что иллюзия свободы – это структурная необходимость. Переживание «я выбираю» – аутентичное присутствие возможности в поле действия. Полная прозрачность собственных алгоритмических процессов разрушила бы связность глобальной модели мира; горизонт будущего должен переживаться как открытый, иначе биологическая система перейдёт в фатальный режим пассивного ожидания [4].

Эти теоретические выводы подтверждаются методами операциональной феноменологии через веб-приложение *The Predictor*. Приложение реализовано как минималистичный веб-интерфейс, построенный на простой бинарной задаче выбора: участник в каждом раунде нажимает одну из двух

кнопок. Под капотом работает машина обучения на основе цепей Маркова высшего порядка, которая обучается в реальном времени на последовательности предыдущих выборов, вычисляя условные вероятности следующего действия на основе контекста из последних десяти-пятнадцати ходов. Первые двадцать пять раундов система собирает данные скрытно, не выдавая обратной связи, – это создаёт у участника ощущение полной спонтанности. После достижения порога приложение переходит в режим предсказанного выбора: система отображает своё предсказание визуально. Эксперимент включает два режима: в свободном режиме предсказания не раскрываются на протяжении всего сеанса, а в предсказанном режиме участник продолжает играть ещё тридцать-сорок раундов, наблюдая, как алгоритм «знает» его выбор заранее. Каждый сеанс длится от десяти до пятнадцати минут, что позволяет собрать от пятидесяти до семидесяти выборов на участника.

Принципиальное отличие *The Predictor* от классических нейронаучных экспериментов, таких как работы Либета или Хейнса, состоит в переносе столкновения с детерминизмом из лабораторной среды в повседневный интерактивный контекст. В экспериментах Либета предсказание оставалось скрытым от испытуемого – он узнавал о нём лишь из объяснений экспериментатора *post factum*. В *The Predictor* субъект наблюдает предсказание в реальном времени. Это превращает приложение не просто в техническую демонстрацию, а в философский эксперимент нового типа – операциональную феноменологию, где эпистемический разрыв между знанием о собственной предсказанности и переживанием свободы становится предметом непосредственного опыта, а не теоретической реконструкции.

Альтернативная версия приложения использует игру «камень, ножницы, бумага», где три опции позволяют моделировать более сложные поведенческие паттерны. Модель дополнена элементами рекуррентных сетей для захвата долгосрочных зависимостей, выходящих за пределы локального контекста цепей Маркова. Будущие итерации эксперимента могут расширить парадигму, включив моральные дилеммы или экономические выборы, где предсказание будет касаться не моторных действий, а ценностных решений. Степень устойчивости переживания свободы может также зависеть от индивидуальных различий в склонности к саморефлексии или от культурных нарративов об автономии, что открывает перспективу кросс-культурных исследований алгоритмического детерминизма.

Ключевой результат эксперимента: даже видя, что алгоритм точно предсказывает их действия, участники продолжают переживать свой выбор как свободный. Это не когнитивный диссонанс, а проявление более фундаментального разделения: феномен свободы онтологически отделён от его каузальной структуры. Никакое количество предсказательной информации не разрушает феноменологический слой, так как он конституируется именно через этот разрыв. Операциональная феноменология, воплощённая в *The Predictor*, предлагает новый методологический инструмент для философии сознания: вместо опоры исключительно на интроспекцию или нейровизуализацию, эксперимент создаёт среду, в которой эпистемический разрыв становится предметом прямого переживания.

Устойчивость иллюзии свободы меняет основания моральной ответственности, приводя нас к концепции мягкого алгоритмического компатибилизма – философской позиции, согласно которой свобода воли совместима с детерминизмом (в том числе алгоритмическим). Ответственность сохраняется не как возмездие за метафизическую свободу, а как необходимый регулятор социальной предсказывающей иерархии. Она поддерживает иллюзию открытого будущего, помогая координировать совместные действия в обществе и праве. Отказ от вменения ответственности привёл бы к параличу социальных взаимодействий.

Однако этот компатибилизм сталкивается с угрозой надзорного капитализма и систем социального рейтинга. Корпорации и государства используют масштабные предикторы для замыкания петли детерминации: они создают контекст, где выборы индивида предопределены, но субъективно воспринимаются как свободные. Возникает мягкий тоталитаризм, в котором принуждение заменяется предсказанием. Нормативным ответом на это должен стать принцип эпистемического равенства: ни одно внешнее учреждение не должно обладать более полной предсказательной моделью поведения индивида, чем он сам. Необходимы прозрачность алгоритмов и обучение цифровой саморефлексии.

Возвращаясь к пророчеству Хокинга, мы констатируем: фрагмент единой математической теории уже запущен. Мы живём внутри операциональной модели, предсказывающей наше поведение точнее нас самих. Вопрос не в том, существует ли свобода воли – её нет. Вопрос в том, какую цену мы готовы платить за сохранение этой необходимой фикции. Алгоритмический детерминизм не уничтожает «Я», а переопределяет его как прозрачную поверхность детерминированной машины. Осознанное принятие этой иллюзии при строгом соблюдении эпистемического равенства – единственное условие сохранения человеческого достоинства в мире, где всё уже предсказано.

Список использованных источников:

1. Friston K., Kilner, J. & Harrison, L. A free energy principle for the brain. J. Physiol. Paris 100, 70–87 (2006).

2. Ashby, W. R. Principles of the self-organising dynamic system. J. Gen. Psychol. 37, 125–128 (1947).

3. Nicolis, G. & Prigogine, I. Self-Organisation in Non-Equilibrium Systems (Wiley, New York, 1977).

4. Haken, H. Synergistics: an Introduction. Non-Equilibrium Phase Transition and Self-Organisation in Physics, Chemistry and Biology 3rd edn (Springer, New York, 1983).

АНАЛИЗ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ РАЗРАБОТОК В БГУИР В КОНТЕКСТЕ ПЕРЕХОДА К ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКОМУ ЭТАПУ РАЗВИТИЯ НАУКИ

Черторицкий И. Г., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Малыхина Г. И. – канд. фил. наук, доцент

В статье на основе философско-методологического анализа концепции смены типов научной рациональности анализируется научно-исследовательская деятельность БГУИР в сфере высоких технологий. Приоритетные направления исследований, конкретные разработки и структурные характеристики научной деятельности высвечивают переход университетской науки от классической модели к постнеклассической рациональности. Системные проблемы и перспективные ориентиры развития технического университета вписаны в более широкий контекст трансформации идеалов и норм современной науки.

В современном мире научно-технологическое развитие – ключевой фактор устойчивого роста. Для Республики Беларусь стратегическим приоритетом является переход к производству интеллектуальных продуктов с высокой добавленной стоимостью. Университет как социальный институт не только транслирует накопленные знания, но и формирует среду, в которой эти знания производятся заново. БГУИР, являясь ведущим отраслевым вузом страны, выступает связующим звеном между фундаментальной наукой, прикладными разработками и реальным сектором экономики.

Одним из ключевых направлений научной деятельности университета является микроэлектроника. Результаты исследований находят непосредственное применение в промышленности. Так, разработанные в БГУИР технологии получения эпитаксиальных структур для высокочастотных приборов используются в системах связи 5*G*/6*G*, а конструктивно-технологические решения для сверхвысокочастотных интегральных схем внедрены на предприятиях холдинга «Планар» и ОАО «ИНТЕГРАЛ» [1]. Эффективность решений подтверждена результатами совместных исследований структур *AlGaN*/*GaN* [2], которые являются критически важными для энергоэффективной электроники. В лаборатории компьютерного проектирования интегральных микросхем (НИЛ 4.4) создана энергонезависимая память на основе оксидов переходных металлов. Предложенные схемотехнические и топологические решения обеспечивают более высокие показатели энергоэффективности и быстродействия по сравнению с традиционной флеш-памятью; разработка ориентирована на внедрение в производственную линейку ОАО «ИНТЕГРАЛ» и ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» [3].

Не менее значимые результаты получены в области искусственного интеллекта. Коллективом кафедры интеллектуальных информационных технологий созданы нейросетевые модели для медицинской диагностики, прошедшие апробацию в клинических условиях на базе РНПЦ «Кардиология» [4]. Как показывает международный опыт, успешное развитие искусственного интеллекта требует системной интеграции университетской науки, промышленности и государственной поддержки [5].

Важнейшим условием устойчивого развития науки является воспроизводство исследовательских кадров. Научное знание существует не только в виде формализованных текстов и патентов, но также как неявное знание, передаваемое через непосредственное участие в исследовательской работе. БГУИР выступает ключевым звеном в системе непрерывной подготовки специалистов для высокотехнологичных отраслей. Университет последовательно реализует модель «Университет 3.0», интегрирующую образование, науку и инновационное предпринимательство. Студенческие лаборатории вуза ведут разработки в области СВЧ-электроники и систем «умного дома», превращая дипломные проекты в реальные бизнес-модели. Ежегодно в научно-исследовательскую работу вовлекается более 1,5 тыс. студентов, из которых около 200 человек занимаются в научно-исследовательских лабораториях, выполняя проекты по заказам предприятий. Элементом этой экосистемы выступает Национальный детский технопарк, созданный в 2019 году [6]. Технопарк принимает школьников 9–11 классов, прошедших конкурсный отбор. Обучение ведётся по 15 направлениям, включая робототехнику, авиакосмические технологии и наноиндустрию. Ежегодно в технопарке проходят обучение более 2 тыс. учащихся, из которых около 30% поступают в дальнейшем в БГУИР. Преемственность между детским технопарком, университетом и промышленными предприятиями формирует замкнутый цикл подготовки кадров.

Достигнутые результаты создают прочную основу для дальнейшего развития. Вместе с тем анализ текущей структуры научной деятельности позволяет выделить несколько направлений, требующих внимания. Доля фундаментальных исследований в общем объёме НИОКР составляет около 20%, что может ограничить формирование научных заделов для долгосрочного развития. Увеличение доли фундаментальных исследований, выполняемых в рамках грантовых программ, могло бы укрепить позиции университета в областях, определяющих технологические тренды будущего. Показательным примером выступает взаимодействие с Китайской академией наук, в рамках которого белорусские исследователи участвуют в проектах по микроэлектронике и материаловедению. В Китае показателен

опыт пекинского района Чжунгуаньцунь, где ключевую роль играют Пекинский университет и Университет Цинхуа. За период 2015–2022 годов выпускниками этих университетов создано более 1,5 тыс. стартапов в сфере информационных технологий и микроэлектроники, а объём совместных НИОКР с компаниями кластера превысил 12 млрд юаней [7], что свидетельствует о системообразующей роли университетов в инновационных разработках. В Беларуси с учётом масштабов экономики интеграция научно-образовательного потенциала с традиционными промышленными предприятиями является приоритетным направлением государственной инновационной политики [8].

В сфере коммерциализации из ежегодно получаемых патентов и свидетельств практическое применение находят 10–15% [1, 9]. Дальнейшее развитие системы сопровождения интеллектуальной собственности – от патентного анализа до поиска индустриальных партнёров – позволило бы повысить этот показатель. Отдельного внимания заслуживает кадровая структура. Подготовка квалифицированных специалистов в области микроэлектроники занимает 4–6 лет и начинается уже со второго курса, когда студенты приступают к самостоятельному проектированию микросхем [3]. Однако доля исследователей в возрасте до 35 лет составляет 25% [1]. Развитие программ привлечения и закрепления молодых исследователей, включая постдокторские позиции и систему наставничества, представляется важным направлением кадровой политики. Эффективность этих мер зависит от сохранения преемственности между уровнями образования – от детского технопарка до аспирантских исследований и работы в научных лабораториях и на предприятиях.

Выявленные тенденции могут быть интерпретированы как переход от экстенсивной модели развития науки к интенсивной, требующей изменения принципов организации научной деятельности: от выполнения техзаданий к формированию исследовательской повестки, от учёта количества публикаций к оценке научного влияния, от патентирования «на всякий случай» к целенаправленной патентной стратегии. В философии науки подобные изменения рассматриваются в контексте смены типов научной рациональности: классическая наука ориентировалась на поиск универсальных законов, неклассическая учитывала роль средств наблюдения, постнеклассическая – ценностно-целевые структуры деятельности [10]. Низкая доля фундаментальных исследований и ориентация на выполнение техзаданий – это проявление классической модели, тогда как формирование собственной исследовательской повестки соответствует переходу к постнеклассической рациональности. Университетская наука сегодня также сталкивается с необходимостью такой трансформации, что согласуется с общемировыми тенденциями развития высоких технологий [5]. В этом контексте наука выступает не только как инструмент решения прикладных задач, но и как социальный институт, определяющий долгосрочные ориентиры технологического развития [10].

Таким образом, эффективность научной деятельности в техническом университете определяется способностью выстраивать сбалансированную систему, где фундаментальные и прикладные исследования, подготовка кадров и коммерциализация результатов дополняют друг друга. БГУИР выступает ключевым звеном национальной инновационной системы, а сформированная экосистема – от детского технопарка до промышленных предприятий – создаёт условия для воспроизводства научных школ и устойчивого развития высокотехнологичных отраслей.

Список использованных источников:

1. Отчет о научной деятельности Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за 2024 год. – Минск : БГУИР, 2025. – 152 с.

2. Structural and electrical properties of AlGaN/GaN HEMT structures grown on Si substrates / V. Bogush [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2023. – Vol. 156. – P. 107–115.

3. Новиков, П. Э. Чипы для заводов будущего. Передовые микросхемы ученого БГУИР внедрят в производство в ближайшие годы [Электронный ресурс] / П. Э. Новиков ; интервью провела Д. Веренич // Репозиторий БГУИР. – Минск, 2025. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/62948. – Дата доступа: 28.03.2026.

4. Neural network-based ECG analysis for early detection of cardiovascular diseases / I. Chernoritsky [et al.] // Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and e-Health. – Minsk, 2024. – P. 112–118.

5. Забродская, Н. Г. Развитие искусственного интеллекта в Германии / Н. Г. Забродская, И. Г. Черторицкий // Инженерный бизнес – 2024 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 мая 2024 г. / БНТУ. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 147–153.

6. О Национальном детском технопарке [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь от 30 мая 2019 г. № 244. – Режим доступа: https://president.gov.by/ru/documents/ukaz-no-244-ot-30-maya-2019-g-24284. – Дата доступа: 28.03.2026.

7. Zhang, Y. Universities as Anchors of Innovation Clusters: The Case of Zhongguancun and Beijing's Higher Education Institutions / Y. Zhang, H. Li // Journal of Technology Transfer. – 2023. – Vol. 48, no. 3. – P. 1125–1148.

8. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы [Электронный ресурс] : утв. Указом Президента Респ. Беларусь от 15 сент. 2021 г. № 348. – Режим доступа: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32100348. – Дата доступа: 28.03.2026.

9. О состоянии коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности в организациях высшего образования : аналитический обзор / Нац. центр интеллектуал. собственности. – Минск : НЦИС, 2025. – 44 с.

10. Малыхина, Г. И. Философия и методология науки : учеб. пособие / Г. И. Малыхина, В. И. Чуешов, В. И. Миськевич. – Минск : БГУИР, 2017. – 274 с.

СЕКЦИЯ 7
«ФИЗИКА»

УДК 620.3:621.382

УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Диковицкая А.О., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Проведен сравнительный анализ электрических и структурных свойств фуллеренов, углеродных нанотрубок (УНТ) и графена. Рассмотрены их преимущества: ширина запрещенной зоны фуллеренов, рекордная подвижность носителей в УНТ, позволяющая создавать высокочастотные транзисторы, а также уникальная комбинация проводимости и прозрачности графена. Определены наиболее эффективные области применения материалов в наноэлектронике. Обоснована перспективность углеродных наноматериалов для преодоления физических ограничений кремниевой технологии и создания элементной базы нового поколения.

Ключевые слова. Углеродные наноматериалы, фуллерены, углеродные нанотрубки, графен, наноэлектроника, полевые транзисторы, элементная база.

Современный этап развития микроэлектроники характеризуется приближением к физическим и технологическим пределам. С уменьшением топологических норм (менее 3 нм) начинают доминировать квантово-механические эффекты, возрастают токи утечки и тепловыделение, что делает дальнейшую миниатюризацию по традиционному пути крайне затруднительной. В связи с этим возникает необходимость поиска материалов, способных обеспечить дальнейший прогресс в области вычислительной техники и радиоэлектроники.

Углеродные наноматериалы, включая фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ) и графен, рассматриваются современным научным сообществом как наиболее перспективные кандидаты на роль основы элементной базы наноэлектроники будущего. Их уникальные электрофизические свойства, обусловленные спецификой sp^2-гибридизации углерода и размерными эффектами, позволяют преодолеть ограничения, присущие традиционным полупроводникам [2]. Целью данной работы является сравнительный анализ электрических и структурных свойств основных углеродных наноматериалов, а также определение наиболее эффективных областей их применения в современных и перспективных устройствах наноэлектроники на основе анализа актуальных литературных данных.

Фуллерены: структурные особенности и электронные свойства. Фуллерены, в частности наиболее изученная молекула C60, представляют собой замкнутые сферические структуры, образованные атомами углерода, которые формируют каркас, состоящий из пяти- и шестичленных колец. Эта архитектура придает фуллеренам уникальные химические и физические свойства. С точки зрения электроники, фуллерены проявляют свойства органических полупроводников n-типа. Ширина их запрещенной зоны составляет 1.5–2 эВ, что позволяет использовать их в оптоэлектронных приложениях [1].

Ключевыми преимуществами фуллеренов являются их способность к молекулярной самосборке и высокая поляризуемость. Это открывает возможности для создания органических полевых транзисторов (OFET), где фуллерены выступают в роли активного слоя. Кроме того, малые размеры молекул (диаметр около 0.7 нм для C60) и дискретный характер их энергетического спектра делают их идеальным кандидатом для создания одноэлектронных транзисторов, работающих при комнатной температуре. В таких устройствах перенос единичного заряда контролируется посредством кулоновской блокады, что позволяет достичь сверхнизкого энергопотребления [1]. В фотоэлектрических преобразователях фуллерены используются в качестве акцепторов электронов в комбинации с полимерными донорами, формируя гетеропереходы с высокой эффективностью разделения экситонов. Иллюстрация внутреннего строения фуллерена C60 представлена на рисунке 1.

Углеродные нанотрубки: металлические и полупроводниковые модификации. Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой протяженные цилиндрические структуры, которые можно рассматривать как свернутый в цилиндр графеновый лист. Их электронные свойства определяются хиральностью — геометрическим параметром, задающим способ сворачивания. В зависимости от угла хиральности нанотрубки могут проявлять как металлические (около 1/3 синтезированных трубок), так и полупроводниковые (около 2/3) свойства с шириной запрещенной зоны, обратно пропорциональной диаметру [4].

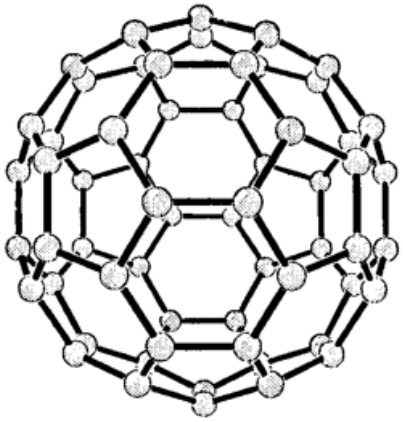


Рисунок 1 – Иллюстрация внутреннего строения фуллерена С60

Ключевым преимуществом полупроводниковых УНТ является рекордно высокая подвижность носителей заряда, которая может достигать 10^5 см²/В·с. Это на порядки превосходит подвижность электронов в кристаллическом кремнии. Высокая подвижность в сочетании с малыми геометрическими размерами позволяет создавать на основе УНТ полевые транзисторы (CNTFET) с низким энергопотреблением и исключительным быстродействием.

Как отмечается в современных обзорах, экспериментальные образцы транзисторов на нанотрубках с длиной затвора 5 нм способны работать на частотах до 8 ГГц, что демонстрирует значительное превосходство над кремниевыми аналогами при сопоставимых топологических нормах [4]. Кроме того, функционализация поверхности нанотрубок позволяет создавать высокочувствительные химические и биологические сенсоры, что расширяет спектр их применения [3]. Иллюстрация внутреннего строения нанотрубок представлена на рисунке 2.

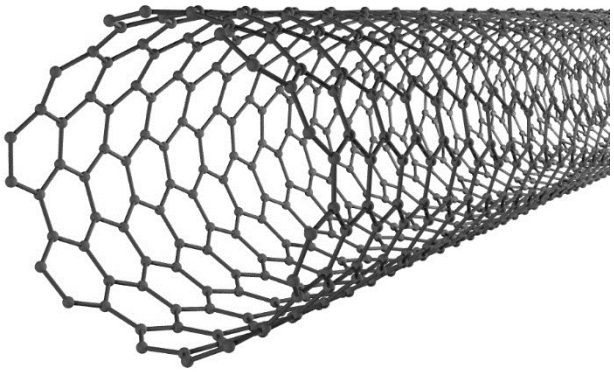


Рисунок 2 – Иллюстрация внутреннего строения нанотрубок

Графен: двумерный полуметалл и его потенциал. Графен — это двумерный слой атомов углерода, образующих гексагональную решетку. Он обладает уникальным сочетанием физических свойств: электроны в графене ведут себя как безмассовые дираковские фермионы, что обуславливает аномально высокую подвижность (более $2*10^5$ см²/В·с), баллистический транспорт на микронных расстояниях, высокую механическую прочность (модуль Юнга ~1 ТПа) и оптическую прозрачность (поглощение всего 2.3% видимого света) [2].

Однако, главным ограничением для использования графена в цифровой логике является отсутствие запрещенной зоны. Графен является полуметаллом с нулевой шириной запрещенной зоны, что делает невозможным достижение высокого отношения токов включенного и выключенного состояния (I_{on}/I_{off}), необходимого для логических переключателей. Тем не менее, данное ограничение не является критическим для аналоговых и оптоэлектронных применений. Прозрачность и проводимость графена делают его незаменимым материалом для создания прозрачных проводящих электродов в гибких дисплеях, солнечных батареях и сенсорных панелях. В сфере высокочастотной электроники на основе графена создаются аналоговые транзисторы (GFET), способные работать в терагерцовом диапазоне [2]. Его высокая чувствительность к изменениям поверхностного заряда также обеспечивает создание высокочувствительных транзисторов-сенсоров, способных детектировать единичные молекулы [4]. Иллюстрация высокочувствительного графенового транзистора представлена на рисунке 3.

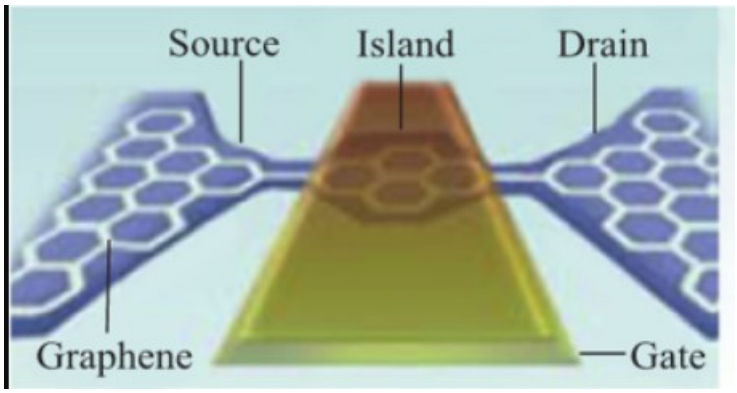


Рисунок 3 – Иллюстрация высокочувствительного графенового транзистора

Проведенный анализ позволяет систематизировать особенности каждого из рассмотренных материалов и определить их ниши в элементной базе будущего. Сравнительный анализ и основные области применения углеродных наноматериалов описаны в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ углеродных наноматриалов и основные области их применения

Материал	Структура	Электронные свойства	Области применения
Фуллерены	0D, замкнутые сферы	– Органический полупроводник n-типа – Низкая подвижность (0,1-1 см²/В·с) – Высокая поляризуемость – Эффект кулоновской блокады при комнатной температуре	– Органические полевые транзисторы – Одноэлектронные транзисторы – Фотоэлектрические преобразователи – Органические солнечные батареи
УНТ	1D, цилиндры	– Металлические или полупроводниковые свойства в зависимости от хиральности – Подвижность носителей (до 10^5 см^2/ В·с) – Высокая плотность тока (> 10^9 А/см^2) – Скорость насыщения носителей 10^7 см/с	– Высококачественные полевые транзисторы – Гибкая электроника – Химические и биологические сенсоры – Межсоединения в интегральных схемах
Графен	2D, гексагональная решетка	– Полуметалл с нулевой запрещенной зоной. –Подвижность носителей до 2*10^5 см²/В·с – Высокая оптическая прозрачность (97.7%) – Слабая спин-орбитальная связь	– Прозрачные проводящие электроды – Высокочувствительные сенсоры – Высокочастотные аналоговые транзисторы – Гибкая оптоэлектроника

Сравнение с традиционным кремнием показывает, что углеродные наноматериалы демонстрируют значительное превосходство по ключевым параметрам: подвижности, способности к теплоотводу и возможности масштабирования. Наибольший практический прогресс в настоящее время наблюдается в области создания полевых транзисторов на углеродных нанотрубках. Технология CNTFET уже сейчас демонстрирует конкурентоспособные характеристики, и в ближайшее десятилетие такие транзисторы могут дополнить или заменить кремниевые в нише высокочастотной, гибкой и низкопотребляющей электроники [4].

Графен, несмотря на отсутствие запрещенной зоны, открывает новые возможности в сенсорике и оптоэлектронике. Создание гетероструктур на основе графена и других 2D-материалов (например, дисульфида молибдена) позволяет индуцировать запрещенную зону и расширять функциональность [3]. Фуллерены, в свою очередь, остаются востребованными в молекулярной электронике и при создании органических фотоэлектрических элементов, где важны процессы самосборки и низкая стоимость обработки.

Заключение. В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что углеродные наноматериалы (фуллерены, углеродные нанотрубки и графен) демонстрируют совокупность электрофизических параметров, критически важных для дальнейшего развития наноэлектроники, которые значительно превосходят характеристики традиционного кремния.

Каждый из материалов имеет свою специфическую нишу: УНТ оптимальны для высокочастотных и энергоэффективных полевых транзисторов; графен незаменим для создания гибкой оптоэлектроники и сверхчувствительных сенсоров; фуллерены обладают наибольшим потенциалом в области молекулярной и органической электроники. Таким образом, углеродные наноматериалы позволяют преодолеть фундаментальные ограничения кремниевой электроники и создать принципиально новую элементную базу для устройств вычислительной техники, радиоэлектроники и сенсорных систем будущего.

Список использованных источников:

1. Казаков, В.Д. Нанотехнологии и наноматериалы в радиоэлектронике: учеб. пособие / В.Д. Казаков – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 192 с.

2. Advances in Nanoelectronics: Carbon Nanotubes, Graphene, and Smart Polymers: A review [Electronic resource]. Mode of access: https://tis.wu.ac.th/index.php/tis/article/view/9843. – Date of access: 09.03.2026.

3. Functionalization of carbon nanotubes for multifunctional applications [Electronic resource]. Mode of access: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589597424000224. – Date of access: 09.03.2026.

4. High-Performance Carbon Nanotube Electronic Devices: Progress and Challenges [Electronic resource]. Mode of access: https://www.mdpi.com/2072-666X/16/5/554/. – Date of access: 09.03.2026.

UDC 620.3:621.382

CARBON MATERIALS IN NANOELECTRONICS

Dikovitskaya A.O., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. A comparative analysis of the electrical and structural properties of fullerenes, carbon nanotubes, and graphene is conducted. Their advantages are discussed: the band gap width of fullerenes, the record-breaking carrier mobility in CNTs, which enables the creation of high-frequency transistors, and the unique combination of conductivity and transparency of graphene. The most effective applications of these materials in nanoelectronics are identified. The potential of carbon nanomaterials for overcoming the physical limitations of silicon technology and creating next-generation electronic components is substantiated.

Keywords. Carbon nanomaterials, fullerenes, carbon nanotubes, graphene, nanoelectronics, field-effect transistors, electronic components.

УДК: 531.768:621.395.721.5

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В СОВРЕМЕННЫХ СМАРТФОНАХ

Житникова Д.С., Зайцева С.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрены физические принципы функционирования MEMS-акселерометров современных смартфонов. Показан переход от классического закона Ньютона к ёмкостному методу регистрации перемещения инерционной массы. Проанализирована физика работы переменного конденсатора. Рассмотрены технологические аспекты изготовления чувствительных элементов, роль поликремния и КМОП-технологии в миниатюризации датчиков. Приведены результаты экспериментальной проверки. Разграничены функции акселерометра и гироскопа, а также области применения G-сенсоров в мобильных устройствах.

Ключевые слова. акселерометр, MEMS, G-сенсор, ёмкостный метод, инерционная масса, смартфон, поликремний, гироскоп.

Введение. Современные смартфоны трансформировались из средств связи в многофункциональные вычислительные платформы, оснащённые широким спектром датчиков. Среди этих сенсоров особое место занимают акселерометры (G-сенсоры) – устройства, измеряющие кажущееся ускорение и позволяющие определять угол наклона объекта относительно земной поверхности. В смартфонах акселерометры выполняют ключевые функции: автоматический поворот экрана, управление в играх, стабилизация изображения, шагомеры и навигация [1]. Цель работы – анализ физических принципов функционирования MEMS-акселерометров, используемых в современных смартфонах, выявление связи между классической механикой и ёмкостным методом регистрации ускорения, определение роли новых материалов в миниатюризации датчиков.

1. Фундаментальные физические концепции, лежащие в основе работы микроэлектромеханических акселерометров.

Физический принцип работы акселерометра основывается на втором законе Ньютона. Конструкция состоит из инерционной (сейсмической) массы, подвешенной на упругих элементах – торсионах. При ускорении корпуса датчика масса стремится сохранить состояние покоя, что приводит к её смещению относительно неподвижных электродов. Это смещение (Δx) уравновешивается силой упругости:

$$F_{упр} = k\Delta x, \quad (1)$$

где k – жёсткость подвеса.

В состоянии равновесия:

$$ma = k\Delta x, \quad (2)$$

$$a = (k/m)\,\Delta x. \quad (3)$$

Таким образом, измерение ускорения сводится к прецизионному измерению смещения инерционной массы [2].

Важнейшим аспектом является принцип эквивалентности, утверждающий неразличимость гравитационных сил и сил инерции. Это означает, что акселерометр, находящийся в состоянии покоя в гравитационном поле Земли, будет измерять ускорение, равное ускорению свободного падения ($g \approx 9.8$ м/с²), направленное вертикально вверх. Именно поэтому акселерометр может быть использован для определения ориентации устройства относительно вектора силы тяжести.

В микроэлектромеханических системах наибольшее распространение получил ёмкостный метод регистрации. Инерционная масса и неподвижные электроды образуют систему переменных конденсаторов. Изменение ёмкости описывается формулой:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d}, \quad (4)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; S – площадь перекрытия электродов; d – расстояние между ними [3].

При смещении массы меняются параметры конденсатора: по осям X и Y изменяется площадь перекрытия S, а по оси Z – зазор d. Часто используется дифференциальная схема, где подвижная масса располагается между двумя неподвижными электродами, образуя два конденсатора. При смещении массы ёмкость одного конденсатора увеличивается, а другого – уменьшается. Разность ёмкостей (ΔC)

прямо пропорциональна смещению, что обеспечивает высокую чувствительность и линейность, а также подавление синфазных помех (например, температурного дрейфа).

2. Технологические аспекты и материалы миниатюризации микроэлектромеханических акселерометров

Миниатюризация акселерометров стала возможной благодаря использованию поликремния и совместимости с КМОП-технологией. Кремний обладает уникальным сочетанием свойств: высоким модулем Юнга, низкой плотностью, отсутствием механического гистерезиса и возможностью интеграции с электронными схемами [6].

Основным методом изготовления MEMS-акселерометров является поверхностная микрообработка. Процесс включает осаждение жертвенного слоя (диоксида кремния), на который затем наносится конструкционный слой поликремния. С помощью фотолитографии и плазменного травления формируется требуемая топология (пружины, гребенчатые структуры конденсаторов). На заключительном этапе жертвенный слой удаляется селективным травлением, в результате чего конструкционный слой становится подвижным [4].

Технология глубокого реактивного ионного травления (DRIE) позволяет создавать структуры с высоким аспектным отношением, что значительно увеличивает площадь боковых поверхностей электродов конденсатора при сохранении малой занимаемой площади, а следовательно, повышает чувствительность датчика [5].

Использование поликремния и совместимость с КМОП-технологией позволяют размещать на одном кристалле механическую структуру и электронику обработки сигналов, что критически важно для снижения паразитных параметров и повышения помехоустойчивости.

3. Сравнительный анализ моделей и характеристик современных акселерометров на примере SMB380

В качестве примера реализации рассмотрим трёхосевой акселерометр SMB380 производства Bosch Sensortec. Эта микросхема имеет размеры 3x3x0,9 мм и поддерживает три программируемых диапазона измеряемых ускорений: ±2g, ±4g, ±8g. Выбор диапазона является компромиссом между возможностью регистрировать сильные ускорения (при падении или ударе) и чувствительностью к слабым сигналам. В режиме ±2g датчик обладает максимальной чувствительностью для определения наклона устройства [6].

Энергопотребление составляет 1-2 мкА в спящем режиме и 200-290 мкА в активном, что критически важно для портативных устройств с батарейным питанием. Чувствительность для цифровых акселерометров выражается в LSB/g. Например, 10-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в диапазоне ±2g (общий диапазон 4g) теоретически обеспечивает чувствительность 1024 LSB / 4g = 256 LSB/g [3].

Внутренняя архитектура SMB380 включает чувствительный элемент (MEMS-структуру), АЦП, цифровой фильтр и встроенный температурный датчик для компенсации дрейфа нуля и чувствительности. Внешний вид микросхемы представлен на рисунке 1.

Рисунок 1 – Внешний вид акселерометра SMB380 [6]

4. Экспериментальное исследование и верификация метрологических характеристик

Экспериментальная проверка правильности работы датчика проводилась путём вращения его вокруг горизонтальной оси. Экспериментальная установка включала акселерометр SMB380, установленный на поворотном столике с угловым разрешением 1°, микроконтроллер для сбора данных и персональный компьютер для регистрации и обработки результатов. Полученная зависимость показаний от угла поворота описывается функцией:

$$A(\theta) = A_0 + g\,sin(\theta), \tag{5}$$

где A_0 – смещение нуля, g – ускорение свободного падения. Синусоидальный характер зависимости подтверждает корректность работы датчика [7].

Физическое обоснование: проекция вектора ускорения свободного падения на ось чувствительности датчика изменяется по синусоидальному закону при вращении. Высокое значение коэффициента детерминации (R^2 = 0,998) подтверждает соответствие экспериментальных данных теоретической мо-

дели и свидетельствует о корректности работы датчика. Погрешность определения углов наклона в статическом режиме составляет не более 0,5°, что позволяет использовать акселерометр для точного определения ориентации устройства.

5. Акселерометр и гироскоп: функциональные различия и синергия в инерциальных измерительных блоках

В современных смартфонах акселерометр практически всегда используется в паре с гироскопом. Несмотря на то, что оба устройства являются инерциальными MEMS-датчиками, они измеряют принципиально разные физические величины. Акселерометр фиксирует линейное ускорение и позволяет определять угол наклона в статическом режиме. Гироскоп измеряет угловую скорость вращения, используя эффект Кориолиса [1].

Функциональные различия определяют их взаимодополняемость. Гироскоп предоставляет точные данные о быстрых изменениях ориентации, но его показания со временем накапливают ошибку из-за интегрирования угловой скорости. Акселерометр, напротив, не подвержен долговременному дрейфу в статике, но его показания «зашумлены» линейными ускорениями. Объединение этих датчиков в инерциальном измерительном блоке (IMU) позволяет создать систему, лишённую недостатков каждого из них. Процесс объединения данных называется сенсорным слиянием (sensor fusion). С помощью алгоритмов (комплементарный фильтр, фильтр Калмана) система использует быстрые данные гироскопа для отслеживания ориентации в реальном времени, а стабильные данные акселерометра – для коррекции накопленного дрейфа.

6. Нерешенные физические проблемы и ограничения точности акселерометров для смартфонов

Несмотря на впечатляющий прогресс, существует ряд нерешенных физических проблем, ограничивающих точность и стабильность MEMS-акселерометров.

Термомеханический шум (броуновский шум) обусловлен хаотическими тепловыми колебаниями инерционной массы. Величина этого шума обратно пропорциональна массе инерционного элемента. Стремление к миниатюризации (уменьшению массы) приводит к увеличению относительного уровня шума, что устанавливает физический предел разрешающей способности [4].

Эффект стикции (stiction) заключается в необратимом слипании микромеханических элементов после их соприкосновения. Причиной являются капиллярные силы, силы Ван-дер-Ваальса и электростатические силы, которые на микроуровне становятся доминирующими. Стикция может привести к полному отказу датчика.

Температурный дрейф нуля и чувствительности обусловлен изменением механических свойств материалов и параметров электронных схем при изменении температуры. Для компенсации используются встроенные температурные датчики, однако полностью устранить дрейф невозможно [3].

Нелинейность преобразования в широком диапазоне ускорений возникает из-за электростатической силы притяжения между обкладками конденсатора и механических ограничений конструкции.

Заключение. Современный MEMS-акселерометр является ярким примером взаимодействия классической механики и наноэлектроники. В работе показано, как фундаментальный закон Ньютона трансформируется в инженерное решение, основанное на ёмкостном методе измерения микроперемещений. Использование поликремния и совместимость с КМОП-технологией позволили достичь высокой степени интеграции, низкого энергопотребления и надёжности, необходимых для массового применения в смартфонах. Экспериментально подтверждена корректность работы датчика и его пригодность для определения углов наклона. Рассмотрены различия между акселерометром и гироскопом, а также принципы их совместного применения в системах инерциальной навигации. Выявлены нерешённые физические проблемы (термомеханический шум, стикция, температурный дрейф), ограничивающие точность измерений. Перспективы развития связаны с переходом к наноэлектромеханическим системам, внедрением новых материалов и алгоритмов машинного обучения.

Список использованных источников:

1. Распопов, В.Я. Микросистемная акселерометрия / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2017. – 352 с.

2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. I. Механика / Д.В. Сивухин. – М.: Физматлит, 2006. – 560 с.

3. Рябова, Н.В. Физические основы микро- и наноэлектроники / Н.В. Рябова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 248 с.

4. Колесников, А.А. Технологии микроэлектромеханических систем / А.А. Колесников, В.А. Смирнов. – СПб.: Лань, 2019. – 288 с.

5.Абдуллин, Ф.А. Технологические особенности формирования кремниевых пьезорезистивных акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений / Ф.А. Абдуллин, В.Е. Пауткин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 118–123.

6.SMB380 Triaxial Acceleration Sensor Data Sheet / Bosch Sensortec GmbH, 2008. – 45 p.

7. Цыкунов, И. Применение акселерометров в задачах локации мобильных объектов / И. Цыкунов // Компоненты и технологии. – 2009. – № 8. – С. 120–124.

UDC: 531.768:621.395.721.5

PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION OF ACCELEROMETERS IN MODERN SMARTPHONES

Zaitseva S.V., Zhitnikova D.S., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1], Minsk, Republic of Belarus

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. This article examines the physical principles underlying the operation of MEMS accelerometers in modern smartphones. It demonstrates the transition from Newton's classical law to a capacitive method for recording inertial mass displacement. The physics of a variable capacitor is analyzed. The technological aspects of manufacturing sensitive elements, as well as the role of polysilicon and CMOS technology in sensor miniaturization, are discussed. The results of experimental testing are presented. The functions of the accelerometer and gyroscope are distinguished, as well as the applications of G-sensors in mobile devices.

Keywords. accelerometer, MEMS, G-sensor, capacitive method, inertial mass, smartphone, polysilicon, gyroscope.

УДК 537.86

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛН НА ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ И ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Юргель Д.С., Ванченко А.Д., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Бурый А.В. – ассистент

Аннотация. В работе рассматриваются физические основы взаимодействия микроволнового излучения с продуктами питания. Анализируются механизмы дипольного поглощения и ионных потерь, лежащие в основе объемного диэлектрического нагрева. Описывается природа микроволн, принципы их генерации магнетроном и распространения в среде. Особое внимание уделяется физическим изменениям структуры продуктов под воздействием СВЧ-поля: испарению влаги, разрушению клеточных стенок, денатурации белков. Показано, что микроволны являются неионизирующим излучением и не способны изменять химический состав пищи или делать ее радиоактивной. Делается вывод о безопасности использования исправной микроволновой техники.

Ключевые слова. Микроволновое излучение, сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение, электромагнитные волны, магнетрон, диэлектрический нагрев, объемный нагрев, дипольное поглощение, ионные потери, полярные молекулы, молекулы воды, глубина проникновения, стоячая волна, резонатор, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, теплопроводность, парообразование, денатурация белков, структура пищевых продуктов, микроволновая печь, взаимодействие со средой, поглощение энергии, размораживание продуктов, экспериментальные исследования.

Введение. Сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение, или микроволны, прочно вошли в повседневную жизнь человека с середины XX века, прежде всего, в виде бытовых микроволновых печей [1]. Сегодня сложно представить современную кухню без этого прибора, позволяющего разогреть пищу за считанные минуты. Однако, несмотря на широкое распространение и более чем полувековую историю использования, вокруг этого физического явления до сих пор существует множество мифов, домыслов и откровенно антинаучных представлений, касающихся его влияния на пищу и здоровье человека. В обывательской среде можно услышать утверждения о том, что микроволновка "убивает" пищу, делает её "мёртвой", изменяет воду на структурном уровне или даже делает еду канцерогенной [2].

Целью данной работы является рассмотрение физических основ взаимодействия микроволнового излучения с веществом, а также анализ тех изменений, которые оно вызывает в продуктах питания. Основной акцент будет сделан на физике процесса, а не на биологических последствиях. Важно понять, что именно происходит с молекулами воды, белков и жиров, когда они попадают под воздействие электромагнитного поля сверхвысокой частоты, и какие из этих изменений являются мифическими, а какие — реально существующими и подтверждёнными научными исследованиями [3].

Основная часть. Микроволновое излучение представляет собой разновидность электромагнитного излучения с диапазоном длин волн от одного метра до одного миллиметра, что соответствует частотам от 300 МГц до 300 ГГц [3]. В спектре электромагнитных волн оно занимает вполне определённое место, располагаясь между радиоволнами и инфракрасным излучением. Это неионизирующее излучение, что является ключевой характеристикой, отличающей его от опасных рентгеновских или гамма-лучей. Энергия кванта микроволнового излучения недостаточна для ионизации атомов или молекул, то есть для выбивания электронов и разрушения химических связей напрямую [1].

Для бытовых и промышленных целей, а также для научных исследований, как указано в обзоре Института пищевых технологов (IFT), официально разрешены две основные частоты: 915 МГц и 2450 МГц [4]. Выбор этих частот не случаен. Он продиктован необходимостью избегать интерференции с частотами работы радиолокационных станций, систем связи и других важных служб. Практически все домашние СВЧ-печи работают на частоте 2,45 ГГц, что соответствует длине волны примерно 12,2 сантиметра. Эта частота является своеобразным компромиссом между глубиной проникновения волны в продукт и эффективностью поглощения её молекулами воды [5].

Источником микроволн в печи является магнетрон — мощная электровакуумная лампа, преобразующая электрическую энергию в сверхвысокочастотное электромагнитное поле [2]. Конструкция магнетрона представляет собой цилиндрический анод с резонаторами и катод в центре. Под воздействием высокого напряжения электроны эмитируются катодом и, взаимодействуя с магнитным и электрическим полями, начинают двигаться по сложным траекториям, возбуждая в резонаторах сверхвысокочастотные колебания. Генерируемые волны по волноводу поступают в рабочую камеру, которая, как отмечается в научной статье Н.В. Федорова, представляет собой резонатор со стоячей волной [2]. Это означает, что внутри камеры электромагнитная энергия распределена неравномерно — существуют области с максимальной напряжённостью поля (пучности) и области с минимальной (узлы). Для выравнивания этого

неравномерного распределения в современных печах используются вращающиеся поддоны или металлические диссекторы (перемешиватели), которые изменяют структуру поля в процессе работы, заставляя продукт перемещаться относительно пучностей и узлов или отражая волны под разными углами [2].

Ключевое отличие микроволнового нагрева от классического (конвекционного или кондукционного) заключается в его объёмном характере. При традиционном нагреве тепловая энергия передаётся от поверхности продукта вглубь за счёт теплопроводности, что требует значительного времени. Например, чтобы прогреть кусок мяса толщиной в несколько сантиметров в духовке, тепло должно пройти через внешние слои, постепенно добираясь до центра. Микроволны же обладают способностью проникать вглубь продукта на определённую глубину (обычно от 1 до 3-5 сантиметров в зависимости от плотности и влажности) и взаимодействуют с веществом практически одновременно во всём этом объёме [5]. Как подчёркивается в работе Шевченко Т.В. и соавторов, основным механизмом такого взаимодействия является дипольное поглощение [1].

Молекулы многих веществ, и в первую очередь воды, являются полярными диполями. Это означает, что из-за асимметричного распределения электронной плотности у них есть частично положительный и частично отрицательный полюса. Молекула воды имеет форму уголка: атом кислорода несёт частичный отрицательный заряд, а два атома водорода — частичный положительный. В отсутствие внешнего электрического поля эти диполи ориентированы хаотически из-за теплового движения. Однако, когда вещество попадает в переменное электрическое поле, ситуация кардинально меняется [3].

Под воздействием переменного электрического поля СВЧ-диапазона с частотой 2,45 ГГц полярные молекулы начинают вынужденно колебаться и переориентироваться, стремясь выстроиться по направлению поля. Поскольку поле меняет своё направление миллиарды раз в секунду (2,5 миллиарда раз в секунду для частоты 2,45 ГГц), молекулы приходят в интенсивное вращательное движение. Они буквально начинают "раскачиваться" из стороны в сторону, пытаясь угнаться за изменениями поля [5]. При этом они неизбежно сталкиваются с соседними молекулами, передавая им часть своей кинетической энергии. Именно эта энергия трения и столкновений на молекулярном уровне воспринимается нами как нагрев. Данное явление подробно описано в материалах Кильского университета, где его образно называют "встряхиванием молекул воды" [5]. Важно понимать, что частота 2,45 ГГц выбрана не случайно — она оптимальна для максимально эффективного возбуждения вращательных уровней молекул воды в жидкой фазе [3].

Другим важным механизмом нагрева являются ионные потери. В любом продукте, особенно в подсоленной пище или бульонах, содержатся ионы растворённых солей — положительные катионы и отрицательные анионы (например, Na^+ и Cl^- из поваренной соли). Эти заряженные частицы значительно легче и подвижнее, чем крупные дипольные молекулы [1]. Под действием электрического поля они приходят в поступательное движение: положительные ионы движутся в сторону отрицательного полюса поля, а отрицательные — в сторону положительного. Когда поле меняет свою полярность, ионы тут же начинают двигаться в обратном направлении. Чем выше концентрация ионов в растворе, тем интенсивнее это движение и, следовательно, тем больше кинетической энергии передаётся окружающей среде. Именно поэтому солёные участки блюда или тонкие края продуктов нагреваются в микроволновке быстрее и сильнее, что подтверждается экспертами Московского физико-технического института [6]. В подливке или супе концентрация ионов выше, чем в куске мяса, поэтому жидкая фаза разогревается быстрее [1].

Интересно и показательно, что не все вещества одинаково взаимодействуют с микроволнами. Так, сухие пористые материалы (например, хлеб или печенье) нагреваются крайне плохо, если в них мало влаги. Ещё более яркий пример — лёд. В кристаллической решётке льда молекулы воды жёстко фиксированы водородными связями и не могут свободно вращаться. Их подвижность резко ограничена, что практически полностью нивелирует эффект дипольных потерь [3]. Именно поэтому, если размораживать продукты в микроволновке без специального режима, края могут начать вариться, в то время как внутри продукта, где ещё сохраняется лёд, температура остаётся низкой. Для размораживания используется либо прерывистый режим работы магнетрона (импульсная подача мощности), чтобы тепло успевало распределяться теплопроводностью, либо более низкие частоты, обеспечивающие большее проникновение [2].

Понимание физики микроволнового нагрева было бы неполным без рассмотрения вопроса о том, как именно волна распространяется и затухает в веществе. Это описывается понятием глубины проникновения. Глубина проникновения — это расстояние от поверхности продукта, на котором интенсивность волны уменьшается в e раз (примерно в 2,7 раза) [3]. За этой границей энергия волны всё ещё есть, но она значительно ослаблена.

Глубина проникновения зависит от двух основных факторов: частоты излучения и диэлектрических свойств самого продукта. Как правило, чем выше частота, тем меньше глубина проникновения. Для частоты 2,45 ГГц в продуктах с высоким содержанием воды (мясо, овощи, рыба) глубина проникновения составляет от 1 до 3 сантиметров [5]. Это означает, что основное тепловыделение происходит именно в этом поверхностном слое. Дальнейшее проникновение тепла вглубь продукта (например, в центр боль-

шого куска мяса) осуществляется уже за счёт обычной теплопроводности, как и при традиционных способах приготовления. Именно поэтому большие куски могут не провариваться внутри, если мощность слишком высока, а время мало — внешний слой перегревается и пересыхает, а тепло просто не успевает дойти до центра [4].

Диэлектрические свойства продукта, а именно его диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь, определяют, насколько эффективно данный материал будет поглощать энергию СВЧ-поля и превращать её в тепло [1]. Высокое содержание воды и солей резко увеличивает эти показатели. Жиры и масла, хотя и содержат неполярные молекулы, также могут нагреваться, но их диэлектрические потери значительно ниже, чем у воды. Однако из-за более низкой теплоёмкости жиры могут нагреваться до очень высоких температур, что иногда приводит к их пригоранию или даже воспламенению в камере печи [6].

Воздействие микроволн приводит к ряду физических изменений в структуре продуктов. Главным и определяющим фактором здесь является нагрев воды, содержащейся в продукте, и её переход в парообразное состояние. Вода, как известно, обладает уникальной теплоёмкостью и скрытой теплотой парообразования. Когда температура воды внутри продукта достигает точки кипения (100°C при нормальном давлении), начинается интенсивное парообразование [3].

Этот процесс может существенно влиять на целостность клеточных стенок продукта. Клетки растений и животных представляют собой микроскопические резервуары, заполненные жидкостью (клеточным соком). Как образно поясняет биохимик Л. Салитринник, клетки продукта можно сравнить с множеством крошечных воздушных шариков, наполненных водой [6]. При интенсивном и быстром парообразовании давление внутри клетки начинает стремительно расти. Если стенки клетки не успевают адаптироваться или выпустить пар, они лопаются под действием избыточного давления. Именно это и происходит с овощами и фруктами при неправильной обработке в микроволновке — они становятся дряблыми, теряют тургор и форму. С другой стороны, в некоторых случаях этот эффект используется намеренно, например, для быстрого высушивания зелени или размягчения продуктов перед дальнейшей кулинарной обработкой [6].

Испарение влаги приводит также к изменению текстуры продукта в целом. Если продукт готовится слишком долго без добавления воды, он может стать сухим и жёстким из-за потери значительной части влаги. Этот процесс принципиально не отличается от того, что происходит при жарке или варке, но протекает гораздо быстрее из-за объёмного характера нагрева [4].

Более того, экспериментальные исследования, проведённые учёными Кемеровского государственного университета и опубликованные в рецензируемых изданиях, демонстрируют и более тонкие эффекты воздействия на структурном уровне. В своей работе они показали, что кратковременное воздействие микроволн мощностью 700 Вт на пшеничную муку способно изменить физические свойства содержащейся в ней клейковины [7]. Клейковина — это сложный белково-углеводный комплекс, отвечающий за эластичность теста. Исследователи зафиксировали изменения её массы, гидратации (способности удерживать воду) и растяжимости после обработки в СВЧ-поле. Более того, было обнаружено крайне интересное явление: обработанная мука проявляла способность накапливать и затем постепенно рассеивать поглощённую энергию микроволн, оказывая влияние на биологические объекты (дрожжи), помещённые в её среду [7]. Это говорит о том, что воздействие СВЧ-поля может вызывать конформационные изменения в структуре сложных биополимеров — белков и полисахаридов. Молекулы могут менять свою пространственную конфигурацию под воздействием интенсивного вращательного движения, что, в свою очередь, влияет на их функциональные свойства. Это область, требующая дальнейших глубоких исследований [1].

Вопрос о влиянии микроволн непосредственно на организм человека при использовании исправной бытовой техники является, по сути, вопросом физики экранирования. Конструкция любой сертифицированной микроволновой печи включает в себя металлический корпус и специальное экранирование дверцы. Металлическая камера работает как клетка Фарадея — она отражает электромагнитные волны внутрь и не выпускает их наружу [3]. Дверца оснащена частой металлической сеткой или перфорированным листом с отверстиями, диаметр которых намного меньше длины волны (12,2 см). Такая сетка непрозрачна для микроволн, но позволяет визуально наблюдать за процессом приготовления [2].

Утечка излучения через зазоры вокруг дверцы, если печь исправна и не имеет механических повреждений, ничтожно мала и строго регламентируется санитарными нормами (допустимый уровень утечки на расстоянии 5 см от корпуса обычно не превышает 5 мВт/см², что намного ниже уровней, способных вызвать даже незначительный нагрев тканей) [3]. Таким образом, для здорового человека, не имеющего имплантированных электронных устройств (кардиостимуляторов старого типа), использование исправной микроволновой печи безопасно.

Что касается самой пищи, то с точки зрения физики, микроволновое излучение, как уже неоднократно подчёркивалось, является неионизирующим. В отличие от рентгеновского или гамма-излучения, его энергия недостаточно велика, чтобы выбить электрон из атома и создать ионы или, тем более, вызвать изменения в атомном ядре [1]. Следовательно, микроволны не могут сделать пищу радиоактивной.

Энергии кванта микроволнового излучения хватает только на возбуждение вращательных и отчасти колебательных уровней молекул, что и приводит к нагреву, но не к разрыву ковалентных химических связей напрямую. То есть молекулы не распадаются на составляющие под действием самих волн. Любые изменения химического состава пищи (например, денатурация белков или карамелизация сахаров) происходят исключительно из-за нагрева, вызванного волнами, и идентичны изменениям, происходящим при любом другом способе термической обработки [4]. Никаких уникальных, "микроволновых" химических соединений или канцерогенов в пище не образуется, если не превышены обычные температурные режимы приготовления, при которых они могут образовываться и на сковороде [6].

Заключение. Подводя итог всему вышесказанному, можно с уверенностью утверждать, что влияние микроволн на продукты питания имеет строгую физическую природу, основанную на фундаментальных законах взаимодействия электромагнитного поля с веществом [3]. Основной и практически единственной причиной всех наблюдаемых изменений в пище является объёмный диэлектрический нагрев. Он возникает благодаря двум основным механизмам — дипольным потерям (вращение полярных молекул, преимущественно воды) и ионным потерям (направленное движение заряженных частиц) [1].

Этот нагрев, в свою очередь, инициирует ряд физических процессов: интенсивное испарение влаги, приводящее к росту давления внутри клеток и их разрыву, денатурацию (свёртывание) белков, плавление жиров и другие термические изменения. Эти процессы в целом сходны с теми, что происходят при традиционной варке, жарке или запекании, однако отличаются гораздо большей скоростью и объёмным характером воздействия, что иногда может сказываться на текстуре и сочности готового блюда [6]. Физические свойства продукта — его влажность, упругость, консистенция — могут меняться более заметно при нарушении оптимальных режимов приготовления. Однако его принципиальный химический состав не претерпевает изменений, связанных с ионизацией или появлением новых, нехарактерных для обычной термической обработки веществ. Пища, приготовленная в микроволновой печи, с физико-химической точки зрения абсолютно безопасна для употребления, а ключевую роль для её усвоения организмом играет лишь общая температура и равномерность нагрева, как и в случае с любой другой приготовленной едой [4].

Список использованных источников:

1. Взаимодействие микроволн с пищевыми объектами различной химической и физической природы / Т.В. Шевченко, В.С. Лобанова, Ю.В. Устинова [и др.] // Пищевая промышленность. – 2020. – № 3. – С. 54-57.

2. Федоров Н.В. Установка сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева с перестраиваемой частотой / Н.В. Федоров // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2017. –Т. 25, № 4. – С. 106-113.

3. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения / Ю.Б. Кудряшов, Ю.Ф. Перов, А.Б. Рубин // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2008. – 184 с.

4.Electromagnetic Energy in Food Processing [Электронный ресурс] / J.P. Clark // Food Technology. – 2013. – Vol. 67, No. 4. – Режим доступа: https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2013/april/columns/processing – Дата доступа: 15.03.2026.

5. Föll H. Cooking with Microwaves [Электронный ресурс] / H. Föll // Advanced Materials B, part 1. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. – Режим доступа: http://web.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/admat_en/kap_3/advanced/t3_4_1.html. – Дата доступа: 15.03.2026.

6. Как микроволновка меняет структуру еды? [Электронный ресурс] // Роскачество. – 2021. – Режим доступа: https://rskrf.ru/tips/eksperty-obyasnyayut/kak-mikrovolnovka-vliyaet-na-vkus-i-strukturu-edy/ – Дата доступа: 15.03.2026.

7. Влияние сверхвысокочастотного поля на физико-химические показатели клейковины пшеничной муки / Д.Г. Дятлов, Т.В. Шевченко // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – № 5. – С. 32–35.

UDC 537.86

THE EFFECT OF MICROWAVES ON FOOD AND THE HUMAN BODY

Yurgel D.S., Vanchenko A.D., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Bury A.V. – Assistant

Annotation. This paper examines the physical principles of microwave interactions with food products. The mechanisms of dipole absorption and ion loss underlying volumetric dielectric heating are analyzed. The nature of microwaves, the principles of their generation by a magnetron, and their propagation in a medium are described. Particular attention is paid to the physical changes in food structure under the influence of a microwave field: moisture evaporation, cell wall destruction, and protein denaturation. It is shown that microwaves are non-ionizing radiation and are not capable of altering the chemical composition of food or making it radioactive. A conclusion is drawn regarding the safety of using properly functioning microwave equipment.

Keywords. Microwave radiation, ultra-high-frequency (UHF) radiation, electromagnetic waves, magnetron, dielectric heating, volume heating, dipole absorption, ionic losses, polar molecules, water molecules, penetration depth, standing wave, resonator, permittivity, dielectric loss tangent, thermal conductivity, vaporization, protein denaturation, food structure, microwave oven, interaction with the environment, energy absorption, food defrosting, experimental studies.

УДК 537.6:004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПАКЕТЕ MATHCAD

Соловьёв А.Л., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Григорьев А.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматривается методика расчёта и визуализации градиентного магнитного поля катушки с током в пакете компьютерной математики Mathcad. Приведены формулы для вычисления осевой составляющей магнитной индукции, построены графики функции B(x) и векторного поля. Показано применение антигельмгольцевой конфигурации катушек для формирования поля с нулевой индукцией в центре. Рассмотрена линейная аппроксимация градиента поля методом наименьших квадратов средствами Mathcad.

Ключевые слова. магнитное поле, градиент индукции, катушка с током, антигельмгольц, Mathcad, моделирование, визуализация.

Введение

Использование компьютерных систем математического моделирования в учебном процессе физических и инженерных дисциплин является одним из ключевых направлений технологизации современного образования. Программный пакет Mathcad представляет собой систему компьютерной алгебры класса САПР, ориентированную на создание интерактивных вычислительных документов с визуальным сопровождением [1]. Его открытая архитектура, поддержка технологий .NET и XML позволяют легко интегрировать Mathcad в широкий спектр инженерных приложений.

Особое место в физике и смежных технических областях занимают неоднородные (градиентные) магнитные поля. Они применяются в ядерно-магнитно-резонансной (ЯМР) томографии для пространственного кодирования сигнала [2], в установках магнитного удержания частиц, а также в экспериментах типа Штерна–Герлаха по исследованию квантовых свойств атомов [3].

Цель настоящей работы — продемонстрировать методику расчёта и визуализации градиентного магнитного поля катушки с током в среде Mathcad, установить область линейного роста индукции и вычислить градиент поля методом линейной регрессии.

1. Теоретические основы

Рассмотрим соленоид конечной длины, ось симметрии которого совпадает с осью OX. Катушка имеет внутренний радиус a и внешний радиус b, плотность намотки n витков на единицу длины, по каждому витку течёт ток I.

Для кольцевого слоя катушки толщиной ds индукция поля на оси записывается через закон Био–Савара [4]:

$$dB = \mu_0 \cdot n \cdot I \cdot r^2 / (2 \cdot R^3 \cdot \cos\alpha) ds, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; r — радиус витка; R — расстояние от элемента тока до точки наблюдения; α — угол между R и осью катушки.

После перехода к полярным координатам и интегрирования по длине катушки получаем аналитическое выражение для осевой составляющей индукции [1]:

$$B(x) = (\mu_0 \cdot n \cdot I / 2) \cdot (\cos\theta_1 - \cos\theta_2), \quad (2)$$

$$\cos\theta_1 = [h - (x - c)] / \sqrt{\{[h - (x - c)]^2 + b^2\}},$$

$$\cos\theta_2 = (x - c) / \sqrt{\{(x - c)^2 + a^2\}}.$$

Здесь h — полудлина катушки; a и b — внутренний и внешний радиусы; c — координата начала катушки.

2. Реализация модели в Mathcad

Расчётная модель реализована в среде Mathcad Prime. Параметры модели: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; n = 1000 вит/м; I = 5 А; a = 2 см; b = 4.39 см; c = 0; h = 5 см.

$\mu_0 := 4\cdot\pi\cdot10^{-7}$; n := 1000; I := 5; a := 0.02; b := 0.0439; h := 0.05

x := -0.1, -0.099 .. 0.15

$\cos\theta1(x) := (h-x) / \sqrt{((h-x)^2+b^2)}$

$\cos\theta2(x) := x / \sqrt{(x^2+a^2)}$

$B(x) := (\mu_0\cdot n\cdot I/2)\cdot(\cos\theta1(x) - \cos\theta2(x))$

S := linfit(x_lin, B_lin, F) → $k = S^{(0)} = 6.17$ мТл/м

Листинг 1 – Ключевые блоки Mathcad-документа для расчёта B(x)

3. Анализ градиента поля

На рисунке 1 представлен график функции B(x), полученный в Mathcad при указанных параметрах. Вблизи торца катушки (область $x \in [1.2; 2.0]$ см, выделена оранжевым) наблюдается участок с практически линейным ростом индукции.

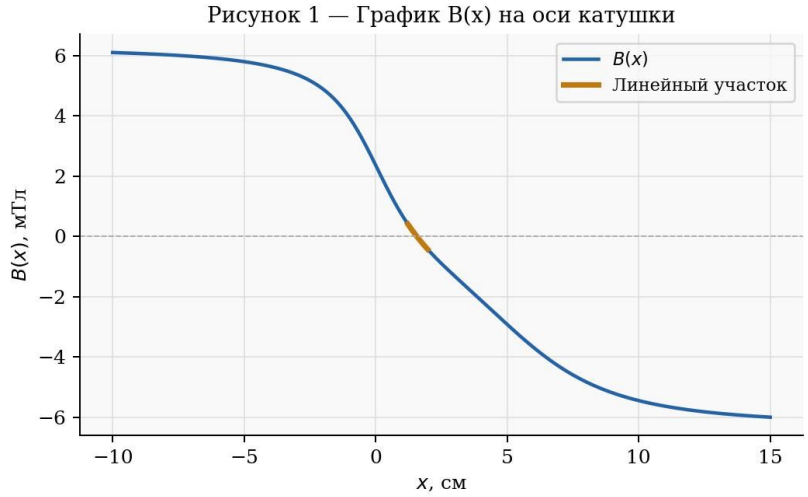


Рисунок 1 – График B(x) на оси катушки; оранжевым выделен линейный участок

Для количественного определения градиента вызывается встроенная процедура linfit, реализующая метод наименьших квадратов. Аппроксимирующая прямая (рис. 2):

$$Bf(x) = k\cdot x + c_0 \qquad (3)$$

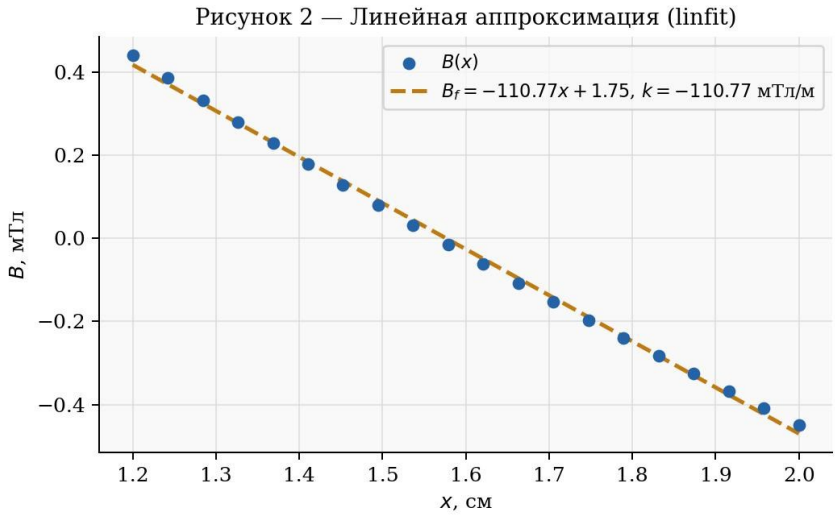


Рисунок 2 – Линейная аппроксимация B(x) процедурой linfit

Результат: **k ≈ 6.17 мТл/м; c_0 ≈ −3.7 мТл.** Таким образом, градиент магнитной индукции на данном участке:

$$\partial B/\partial x = k \approx 6.17 \text{ мТл/м}. \quad (4)$$

4. Антигельмгольцева конфигурация

Для создания поля с нулевой индукцией в центре применяется антигельмгольцева конфигурация: две одинаковые катушки, расположенные соосно и симметрично, через которые пропускаются токи противоположных направлений [3]. Суммарная индукция:

$$B_total(x) = B(x + d/2, +I) + B(x - d/2, -I). \quad (5)$$

На рисунке 3 показан результат моделирования для d = 6 см, I = 5 А.

Рисунок 3 — Антигельмгольцева конфигурация

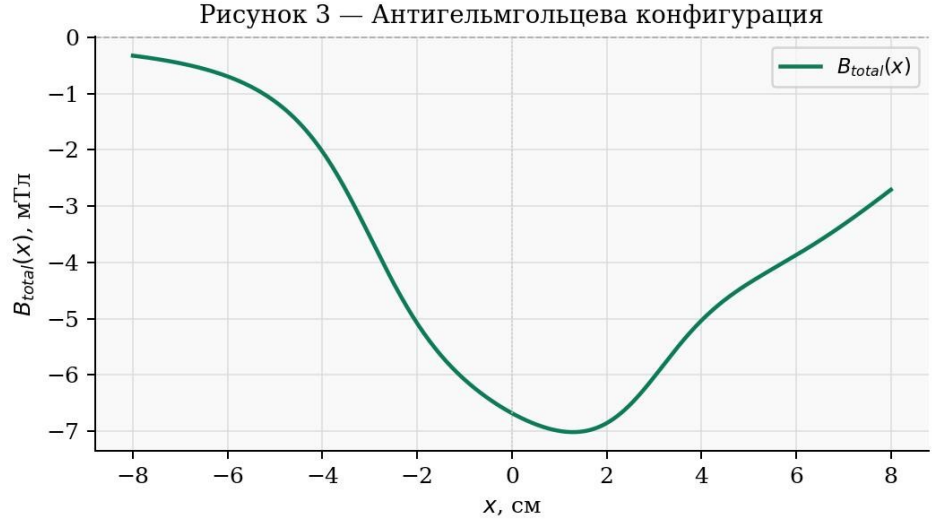


Рисунок 3 – B_total(x) для антигельмгольцевой конфигурации (d = 6 см)

5. Числовой градиент ∂B/∂x

На рисунке 4 приведён числовой градиент ∂B/∂x вдоль оси катушки, вычисленный как центральная разностная производная. Пунктирная линия соответствует значению k = 6.17 мТл/м, полученному методом linfit.

Рисунок 4 — Числовой градиент $\partial B/\partial x$

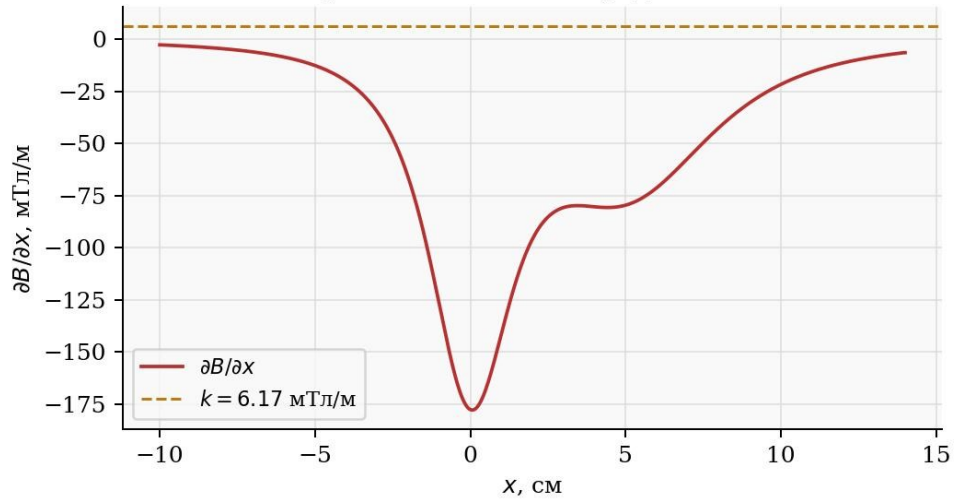


Рисунок 4 – Числовой градиент ∂B/∂x вдоль оси катушки

6. Сводная таблица параметров модели

Таблица 1 – Параметры модели и результаты расчёта

Параметр	**Значение**	**Единица**
Ток в катушке I	5	А
Плотность намотки n	1000	вит/м
Внутренний радиус a	2.0	см
Внешний радиус b	4.39	см
Полудлина катушки h	5.0	см
Участок линейности	[1.2; 2.0]	см
Градиент k (linfit)	6.17	мТл/м
Свободный член c_0	−3.7	мТл

Заключение

В работе показано, что среда Mathcad является эффективным инструментом для расчёта и визуализации магнитных полей катушек с током. На основе аналитической формулы (1), полученной из закона Био–Савара, построен график осевой компоненты индукции B(x), выявлен участок линейного роста функции и вычислен градиент поля $\partial B/\partial x \approx 6.17$ мТл/м методом linfit.

Рассмотрена антигельмгольцева конфигурация пары катушек, обеспечивающая нулевую индукцию в центре системы. Построена карта числового градиента $\partial B/\partial x$ вдоль оси симметрии. Полученные результаты подтверждают высокую наглядность и эффективность применения Mathcad в учебном процессе [1].

Список использованных источников:

1. Дьяконов В.П. Mathcad 2001 / В.П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2001. – 624 с.

2. Vlaardingerbroek M.T. Magnetic Resonance Imaging / M.T. Vlaardingerbroek, J.A. den Boer. – Berlin : Springer, 2003. – 521 p.

3. Bücker S. Evaporative Cooling and Bose-Einstein Condensation : дис. ... PhD / S. Bücker. – Freiburg : Universität Freiburg, 2010. – URL: https://freidok.uni-freiburg.de/fedora/objects/freidok:7695

4. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics / D.J. Griffiths. – 4th ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2017. – 599 p.

5. Clayton R.P. Introduction to Electromagnetic Fields / R.P. Clayton, K.W. Whites, S.A. Nasar. – N.Y. : WCB/McGraw-Hill, 1998. – 758 p.

UDC 537.6:004.94

MODELING OF A GRADIENT MAGNETIC FIELD IN THE MATHCAD PACKAGE

Solovyov A.L., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Grigoriev A.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. The paper discusses the method of calculating and visualizing the gradient magnetic field of a current-carrying coil in the Mathcad computer mathematics package. The formulas for calculating the axial component of magnetic induction are presented, and graphs of the B(x) function and the vector field are constructed. The application of the anti-Helmholtz coil configuration for generating a field with zero induction in the center is demonstrated. The linear approximation of the gradient field using the least squares method in Mathcad is examined.

Keywords. magnetic field, induction gradient, current coil, anti-Helmholtz, Mathcad, modeling, visualization.

УДК 533.9.082.5

ЛАЗЕР КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Сакович А.П, Навицкая Т.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики *и радиоэлектроники*
г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрен проект лазерного 3D-сканера, предназначенного для оценки качества продукции и выявления поверхностных дефектов. Показаны принцип работы системы на основе лазерной триангуляции, состав функциональной схемы и логика обработки измерительных данных. Выполнен краткий сравнительный анализ промышленных роботизированных комплексов AM-DESK, AutoScan-T и AM-CELL C Series. Обоснован выбор параметров разрабатываемого лазерного модуля PL450B, а также описан процесс его цифрового моделирования. Полученные результаты могут быть использованы при создании учебного и демонстрационного образца системы контроля качества.

Ключевые слова. Лазерный 3D-сканер, контроль качества, триангуляция, роботизированное сканирование, цифровое моделирование, PL450B.

Введение. В последние годы бесконтактные методы контроля качества получили широкое распространение в промышленности, медицине, строительстве и инженерной диагностике. Одним из наиболее эффективных решений в этой области является лазерное 3D-сканирование, позволяющее быстро получать цифровые копии изделий, измерять геометрию поверхностей и обнаруживать отклонения формы без механического контакта с объектом [4, 5]. Целью данной работы является анализ принципов функционирования лазерного 3D-сканера для оценки качества продукции, сравнение существующих промышленных решений и обоснование параметров собственного проектного варианта системы.

1. Принцип работы лазерного 3D-сканера. В основе рассматриваемой системы лежит метод лазерной триангуляции. Лазерный излучатель формирует световой луч или линию, которая проецируется на поверхность изделия. Отражённое излучение регистрируется приёмной оптикой и фотодиодным или камерным модулем, после чего измерительный блок вычисляет расстояние до точки поверхности и передаёт данные на микрокомпьютер. На основе массива таких измерений строится облако точек, а затем трёхмерная модель объекта. Эта модель используется для контроля размеров, сравнения с эталоном и поиска дефектов поверхности.

Функциональная схема такой системы приведена на рисунке 1. В неё входят полупроводниковый лазер, блок измерения временных интервалов, фотодиод-приёмник, передающая и приёмная оптика, а также вычислительный модуль. Практическая ценность подобной схемы состоит в том, что она позволяет автоматизировать измерения и уменьшить влияние человеческого фактора при контроле качества изделий сложной формы. При использовании роботизированного манипулятора сканер может перемещаться по заданной траектории и проводить инспекцию объекта с разных ракурсов, что особенно важно для обнаружения локальных дефектов.

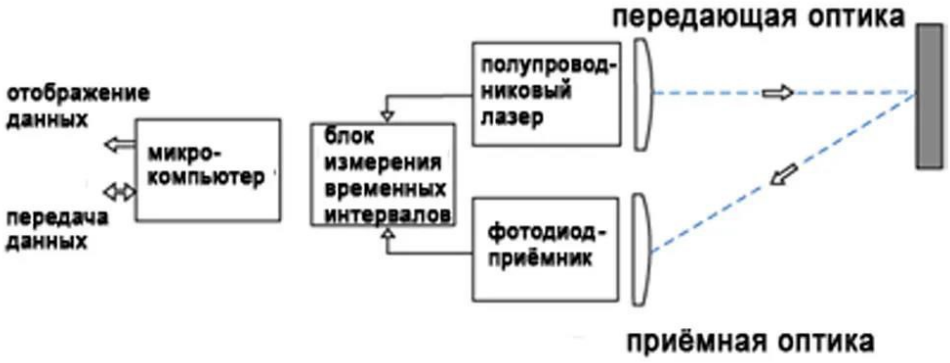


Рисунок 1 – Функциональная схема лазерного 3D-сканера для контроля качества продукции

2. Сравнительный анализ существующих систем. Для выбора концепции разрабатываемой установки был выполнен обзор промышленных систем лазерного сканирования [1–3]. В таблице 1

приведены основные характеристики комплексов AM-DESK Automated 3D Measurement Station, AutoScan-T 3D System и AM-CELL C Series Optical Automated 3D Measurement System. Сравнение показало, что эти решения ориентированы на автоматизированный контроль геометрии изделий, имеют значительные рабочие зоны и поддерживают интеграцию в производственную среду.

Таблица 1 – Сравнение промышленных роботизированных систем лазерного 3D-сканирования

Параметр	**AM-DESK**	**AutoScan-T**	**AM-CELL C**
Рабочая зона, м	4 × 3 × 1,3	4,5 × 4 × 1,5	5 × 4 × 1,8
Тип робота	Кобот		
Подключение	TCP/IP, USB 3.0, OPC UA		
Питание	~220 V / 50-60 Hz		
Мощность, кВт	1,5	2,2	3,0
Масса, кг	200	500	800
Макс. размер объекта, мм	D≤1200, H≤1000	D≤1500, H≤1200	D≤1800, H≤1500
Класс лазера	Класс II (безопасный для глаз)		
Форматы вывода	.stl, .ply, .obj, .igs, .wrl, .xyz, .dae, .fbx, .ma, .asc		
Страна-производитель	Китай		
Ориентировочная стоимость	100-300 тыс. $	70-150 тыс. $	100-300 тыс. $

Сопоставление параметров показывает, что промышленные комплексы отличаются высокой стоимостью и предназначены прежде всего для интеграции в крупные производственные линии. Для учебного проекта целесообразно сосредоточиться не на создании полного промышленного комплекса, а на разработке компактного лазерного модуля и его цифрового прототипа. Такой подход позволяет изучить физические принципы работы системы и подготовить основу для последующей модернизации конструкции.

3. Выбор параметров и цифровое моделирование. На основании проведённого обзора для проектного варианта был выбран лазерный диод PL450B с длиной волны 450 нм и классом безопасности 2. Для него характерны беспроводная передача данных, скорость сбора информации порядка 30 000-36 000 точек/с, а также толщина линии 27,1 мм при минимальном рабочем расстоянии, 39,2 мм при среднем и 51,3 мм при максимальном. Рабочий температурный диапазон эксплуатации составляет от 5 до 40 °C, а диапазон хранения – от -25 до +70 °C. Такой набор параметров делает выбранный модуль пригодным для демонстрационного сканирования и оценки заметных поверхностных дефектов.

Компоновка проектируемого лазерного модуля приведена на рисунке 2. В конструкции предусмотрены окно лазерного излучателя и приёмника, отсек для батареи, интерфейс программирования и крепление для установки на манипулятор. Подобная схема даёт возможность разместить модуль на роботизированной платформе и использовать его для сканирования объектов с различной геометрией.

Работа подобной системы на практике включает несколько последовательных этапов: подготовку и позиционирование объекта, проецирование лазерной линии, регистрацию отражённого сигнала, построение облака точек, формирование трёхмерной модели и её сравнение с эталоном. Такой алгоритм позволяет не только визуализировать изделие, но и использовать результаты измерений для автоматизированного контроля допусков, выявления деформаций, перекосов и локальных повреждений поверхности. В этом состоит одно из главных преимуществ лазерного 3D-сканирования перед традиционными контактными методами измерения [4, 5].

Вместе с тем, при проектировании сканирующей системы необходимо учитывать и ряд ограничений. На точность результатов влияют свойства поверхности объекта, уровень внешней освещённости, расстояние до изделия и толщина формируемой лазерной линии. Для объектов с мелкими дефектами или сложной отражающей поверхностью требуется более тонкий луч, дополнительная калибровка и корректная программная фильтрация шумов. Поэтому даже учебный прототип должен рассматриваться не только как средство визуализации, но и как основа для дальнейших экспериментальных исследований параметров лазерного контроля.

Рисунок 2 – Компоновка разрабатываемого лазерного модуля

Перспективными направлениями развития проекта являются интеграция модуля с роботизированным манипулятором, разработка программной обработки облака точек и автоматическое сравнение результата сканирования с эталонной геометрией. В прикладном плане такие решения востребованы при контроле качества деталей в машиностроении, анализе поверхности изделий после обработки, а также при подготовке цифровых моделей для архивирования и обратного проектирования. Следовательно, тема проектной работы обладает не только учебной, но и практической значимостью.

К достоинствам выбранной конфигурации можно отнести применение лазера с длиной волны 450 нм (область синего цвета), достаточную скорость передачи данных и возможность беспроводного взаимодействия с вычислительным модулем. При контроле качества такие свойства важны, поскольку позволяют быстрее получать измерительную информацию и использовать сканер в составе гибких роботизированных систем. Кроме того, бесконтактный характер измерения делает возможной работу с изделиями сложной формы и с объектами, для которых нежелательно механическое воздействие.

Одновременно необходимо учитывать, что точность контроля зависит от соблюдения рабочих расстояний и температурного режима, а сравнительно большая толщина линии ограничивает возможности обнаружения микродефектов. Это означает, что созданную модель следует рассматривать как основу для дальнейшего инженерного уточнения. Последующее совершенствование проекта может быть связано с выбором более чувствительного приёмника, оптимизацией оптики и созданием программного модуля, автоматически оценивающего расхождения между измеренной и эталонной геометрией.

Цифровое моделирование выполнялось поэтапно. Сначала были изучены аналоги и определены основные конструктивные элементы будущей системы. Затем в Autodesk Maya 2022 была собрана геометрия устройства и сцены, после чего в Adobe Substance 3D Painter подготовлены текстуры отдельных компонентов. На завершающем этапе были настроены освещение, камеры и анимация перемещения. Полученная 3D-модель может использоваться как для визуализации проекта, так и для демонстрации принципа работы роботизированного лазерного сканера.

Заключение. Выполненная адаптация результатов исследований к формату конференционной статьи показывает, что ключевые результаты проекта можно представить в компактной форме без потери основной технической идеи. Рассмотренная система лазерного 3D-сканирования основана на бесконтактном измерении свойств поверхности и предназначена для оценки качества продукции по геометрическим признакам. Сравнение существующих промышленных комплексов позволило обосновать выбор характеристик учебного прототипа, а цифровое моделирование подтвердило реализуемость выбранной компоновки. В дальнейшем работа может быть продолжена в направлении повышения точности измерений, уменьшения толщины лазерной линии и расширения программной обработки данных.

Список использованных источников:

1. m&h LS-R-4.8 Radio laser scanner for machine tools [Электронный ресурс] / Hexagon. — URL: https://hexagon.com/products/m-h-ls-r-4-8 (дата обращения: 29.03.2026).

2. AM-CELL C Series Optical Automated 3D Measurement System [Электронный ресурс] / SCANOLOGY. — URL: https://www.3d-scantech.com/am-cell-c-series-optical-automated-3d-measurement-system/ (дата обращения: 29.03.2026).

3. AutoScan-T 3D System [Электронный ресурс] / SCANOLOGY. — URL: https://www.3d-scantech.com/product/autoscan-t-3d-system/ (дата обращения: 29.03.2026).
4. 3D-сканер [Электронный ресурс] // Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/3D-%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D1%80 (дата обращения: 29.03.2026).
5. Лазер [Электронный ресурс] // Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80 (дата обращения: 29.03.2026).
6. Donges, A. Laser triangulation / A. Donges, R. Noll // Laser Measurement Technology: Fundamentals and Applications. — Berlin ; Heidelberg : Springer, 2015. — P. 247–278. — DOI: 10.1007/978-3-662-43634-9_10.
7. Ding, D. Research progress of laser triangulation on-machine measurement technology for complex surface: A review / D. Ding, W. Ding, R. Huang [et al.] // Measurement. — 2023. — Vol. 216. — Art. 113001. — DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113001.
8. Swojak, N. Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors / N. Swojak, M. Wieczorowski, M. Jakubowicz // Measurement. — 2021. — Vol. 176. — Art. 109190. — DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109190.
9. Liu, Z. Modeling and compensation integration for multi-source errors in laser triangulation / Z. Liu, S. Ji, J. Zhao // Applied Physics B. — 2024. — Vol. 130. — Art. 40. — DOI: 10.1007/s00340-024-08173-5.

UDC 533.9.082.5

LASER AS AN EFFECTIVE TOOL FOR MONITORING SURFACE DEFECTS IN MATERIALS

Sakovich A.P., Navitskaya T.V., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Abstract. The paper presents a project of a laser 3D scanner intended for product quality assessment and surface defect detection. The operating principle of the system based on laser triangulation, its functional layout and the logic of data processing are described. A brief comparison of the AM-DESK, AutoScan-T and AM-CELL C Series industrial systems is provided. The choice of the PL450B laser module parameters and the stages of its digital modeling are substantiated. The obtained results can be used for developing an educational prototype of a robotic inspection system.

Keywords. Laser 3D scanner, quality control, triangulation, robotic scanning, digital modeling, PL450B.

УДК 539.12:537.63:004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ШТЕРНА-ГЕРЛАХА ДЛЯ СЛУЧАЯ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ КОНИЧЕСКОГО СОЛЕНОИДА В СРЕДЕ РАЗРАБОТКИ MATLAB

Семерник Р.Д., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Григорьев А.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена моделированию неоднородного магнитного поля катушки с постоянным током и дальнейшего проведения эксперимента Штерна-Герлаха на основе неоднородного поля конической катушки и сравнения оригинального результата с полученным в работе. В основе работе используется свойства градиента и вектора магнитной индукции. Сама работа была выполнена в среде разработке MATLAB.

Ключевые слова. Эксперимент Штерна-Герлаха, градиент, коническая катушка, MATLAB, неоднородное магнитное поле, моделирование результатов, вектор магнитной индукции, электромагнетизм.

Введение. Эксперимент Штерна-Герлаха (1922 г.) является одним из краеугольных камней квантовой физики, наглядно продемонстрировавшим пространственное квантование. Однако историческая реализация эксперимента была сопряжена со значительными техническими трудностями и требовала уникального лабораторного оборудования. Сегодня развитие вычислительных сред, таких как MATLAB, позволяет воспроизводить и исследовать сложные процессы путем математического моделирования, что значительно упрощает анализ.

В связи с этим было решено воспроизвести компьютерную симуляцию эксперимента Штерна-Герлаха. В качестве ключевого различия элемента модели предлагается использовать не классическую магнитную систему, а альтернативный источник неоднородного поля — поле конической катушки. Это позволит не только визуализировать поведение частиц, но и оценить применимость различных конфигураций магнитного поля для наблюдения квантовых эффектов, и нахождения различий в их поведениях.

Обоснование выбора программных средств и источника неоднородного поля. Использование MATLAB как основной программой для моделирования является не случайным. Данная среда может обеспечивать высокий контроль над математическим описанием движения частиц, а также она достаточна удобна для интегрирования уравнений движения, обработки большого количества данных. Возможность генерации случайных начальных условий и визуализации частиц также являются обязательным для эксперимента, что и предоставляет MATLAB.

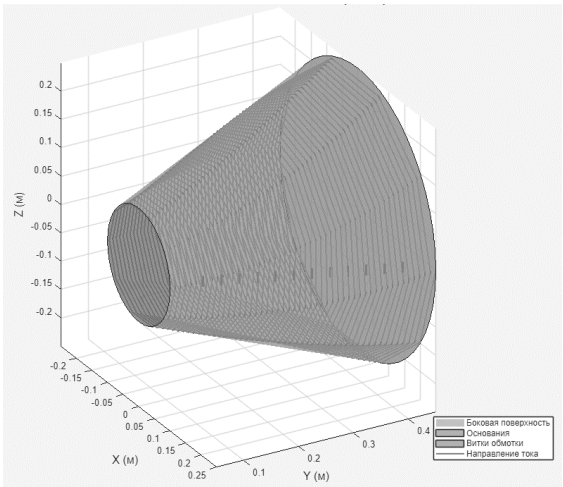


Рисунок 1 – Схематичная 3D - модель конической катушки в среде разработки MATLAB

Коническая катушка для генерации магнитного поля выбрана в связи с тем, что данная разновидность катушки может создавать неоднородное поле с собственным градиентом, что и требуется для проверки эксперимента Штерна-Герлаха.

Моделирование магнитного поля. Для непосредственного моделирования была выбрана коническая катушка со следующими начальными данными: a = 0,1 м – радиус меньшего основания, b = 0,25 м – радиус большего основания катушки, L = 0,15 м – длина катушки вдоль оси Y, c = 0,05 м –

отставания меньшего основания от начала отсчета, n = 1000 – количество витков, I = 5 А – ток в катушке. Схематичное изображение катушки в пространстве представлено на рисунке 1.

Для построения неоднородного магнитного поля нам необходимо найти проекции магнитной индукции на оси Y и Z, градиент нашего поля, а также модуль индукции поля.

Для нахождения $B_y(y)$ мы можем использовать формулу для нахождения индукции поля кольцевого слоя плотностью намотки в полярных координатах, изменяя плоскость с XOZ на YOZ [5]:

$$B_y(y) = \frac{\mu_0 nI}{\cos\alpha}\left(\frac{y-c}{\sqrt{(y-c)^2-a^2}} - \frac{h+c-y}{\sqrt{(h+c-y)^2-b^2}}\right), \quad (1)$$

где h – полная высота по оси OY, α – угол наклона образующей конуса.

После этого с помощью уравнений Максвелла находим индукцию относительно оси Z и градиент поля:

$$\frac{\partial B_y}{\partial y} \approx \frac{B_y(y+\delta)-B_y(y-\delta)}{2\delta}, \quad (2)$$

где δ – малое приращение, численное равное 10^{-6} м.

$$\frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$B_z(y,z) = -\frac{z}{2}\frac{\partial B_y}{\partial y} \quad (4)$$

Далее нам необходимо посчитать модуль поля, для этого воспользуемся известной формулой подсчета модуля проекций:

$$|B| = \sqrt{B_y^2 + B_z^2} \quad (5)$$

Далее выбирая начальную точку на оси y = c, и давая ей малое приращение найдем нужные нам величины на всей полости обрезанного конуса. На основе этих вычислений был смоделирован контурный график модуля вектора индукции, который можно увидеть на рисунке 2.

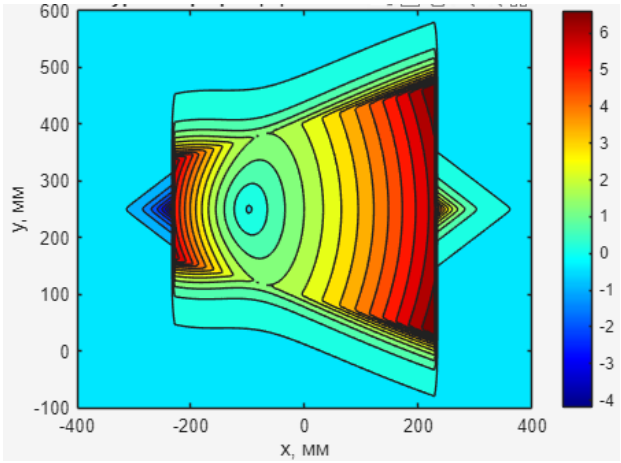


Рисунок 2 – Контурный график модуля вектора индукции

По данным рисунка можно судить о градиентности поля внутри катушки с постоянным током.

Моделирование эксперимента. Движение атома можно описать уравнением 2-го закона Ньютона с силой, обусловленной магнитным градиентом:

$$m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \vec{\nabla}\left(\vec{\mu}, \vec{B}(\vec{r})\right), \quad (6)$$

где m – масса атома (в работе мы использовали массу атома серебра), $\vec{\mu}$ – магнитный момент атома.

В нашей упрощенной модели, считая магнитный момент постоянным по модулю и ориентированным вдоль или против оси градиента, то модуль силы можно упростить к проекции только по z:

$$F_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z}, \tag{7}$$

где z – направляющая ось расщепления пучка.

Для непосредственной численной интеграции был взять явный метод Эйлера:

$$\overrightarrow{v_{n+1}} = \overrightarrow{v_n} + \overrightarrow{\alpha_n}\Delta t, \qquad \overrightarrow{r_{n+1}} = \overrightarrow{r_n} + \overrightarrow{v_n}\Delta t. \tag{8}$$

Стоит отметить, что шаг Δt выбирался достаточно малым, для обеспечения устойчивости и точности.

Для моделирования пучка бралось достаточно большое число частиц (10^5). Также были промоделированы две пластины с прорезями, чтобы соответствовать оригинальному эксперименту Штерна-Герлаха.

Первая щель была задана простым уравнением окружности:

$$x^2 + z^2 = r^2 \tag{9}$$

Вторая щель была задана же как пересечение двух парабол:

$$f(x) = \pm\frac{2h}{w^2}x^2 + z_c \mp \frac{h}{2}, \qquad -\frac{w}{2} \le x \le \frac{w}{2}, \tag{10}$$

где h – высота щели, w – ширина, z_c – смещение по оси z.

Начальные координаты выбирались в окне первой пластины.

Для моделирования был выбран атом серебра (Ag) с массой m = 1.7912 * 10^{-25} кг.

Для расчета средней квадратичной скорости частиц воспользуемся распределением Максвелла-Больцмана [4]:

$$v_0 = \sqrt{\frac{4k_BT}{m}} \tag{11}$$

где k_B – постоянная Больцмана, T – температура источника, m – масса атома серебра.

При заданной температуре печи T = 1323 K находим из уравнения (11) $v_0 = 638{,}67$ м/с. На основе полученного значения можем выбрать диапазон модулей средней скорости каждой отдельно взятой частицы. Диапазон будет равен [590; 690] м/с.

Стоит учесть, что в модели не учитывались столкновения между атомами и рассеяние на остаточных газах. В дальнейшем при необходимости можно добавить стохастические столкновения, описываемые параметром затухания, чтобы учесть реальные условия эксперимента.

Сам детекторный экран был смоделирован как вертикальная плоскость, проходящая за нашей катушкой в вертикальной плоскости. Частицы пересекающие данную плоскость перестают участвовать в симуляции и в конечном итоге будут отображены на итоговой модели (рисунки 3-4).

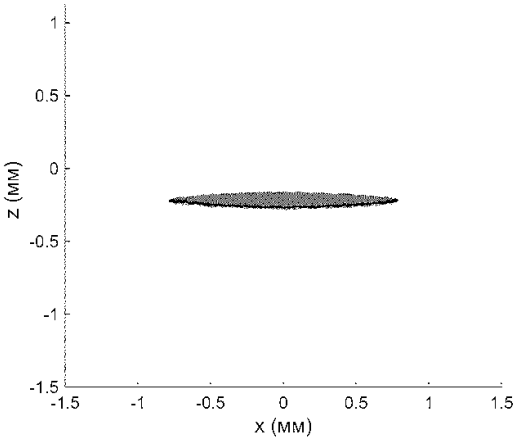


Рисунок 3 – Изображение распределения частиц на детекторе с начальным градиентом

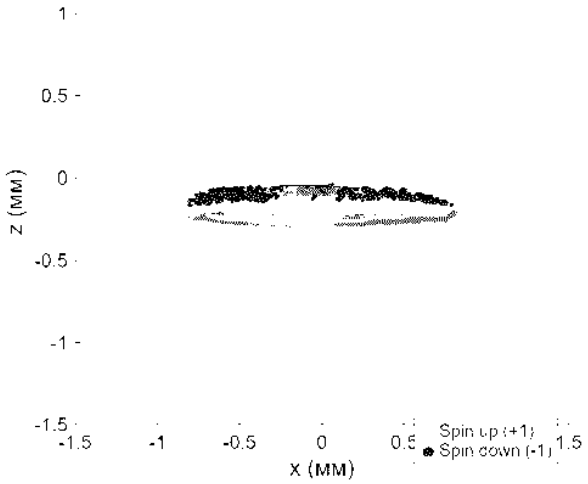


Рисунок 4 – Изображение распределения частиц на детекторе с увеличенным в 50 раз градиентом

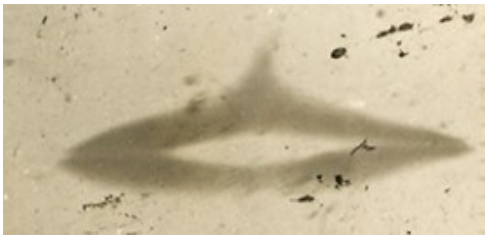


Рисунок 5 – Результат оригинальной работы [2]

Результаты моделирования. Полученное изначально изображение распределения частиц на детекторе (рисунок 3) не дает нам представления о расщепление атомного пучка на две четко выраженные компоненты. Это объясняется тем, что градиент поля конической катушки, в отличии от градиента поля постоянных магнитов, значительно мал, поэтому он не может четко разделить атомный пучок. При увеличении градиента можно наблюдать что постепенно происходит разделение на две компоненты, что можно четко увидеть на рисунке 4. Отличие от оригинального эксперимента, можно объяснить тем, что поле конической катушки более однородно чем поле системы магнитов [2]. Непосредственное увеличение градиента происходило путем увеличения тока в симуляции магнитного поля катушки. Отклонения траектории наблюдается в зоне с экстремальными значениями градиента z-компоненты вектора магнитной индукции, что полностью согласуется с теоретической зависимостью силы (7). Полученная модель показывает, что распределение частиц на детекторе разнится в зависимости от градиента, а точнее от неоднородного магнитного поля которое используется в модели, это можно увидеть, сравнивая рисунки 4 и 5.

Заключение. В данной работе в среде MATLAB было выполнено моделирование эксперимента Штерна-Герлаха с использованием неоднородного магнитного поля конической катушки. Разработанная модель позволяет рассчитывать компоненты магнитной индукции и градиента поля, а также траектории движения атомов серебра под действием силы, обусловленной неоднородностью поля.

Возможные дальнейшие улучшение включают расчет эксперимента для других источников неоднородного магнитного поля, учет квантовой природы спина, использование более точных схем и учет внешней среды.

Список использованных источников:

1. Otto Stern. Ein Weg zur experimentellen Prufung der Richtungsquantelung im Magnetfeld//Zeitschrift fur Physik, 1921, Volume 7, Issue 1, pp 249-253

2. W. Gerlach, O. Stern. Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms//Zeitschrift fur Physik,1922, Volume 8, Issue 1, pp 110-111

3. W. Gerlach,O. Stern. Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld, Zeitschrift fur Physik 9 (1922) 349-352

4. Otto Stern. Bemerkungen uber die Auswertung der Aufspaltungsbilder bei der magnetischen Ablenkung von Molekularstrahlen// Zeitschrift fur Physik,Volume 41, Issue 5, pp 563-568, 1927.

5. Григорьев, А. А. Технологизация процесса изучения свойств магнитных полей посредством моделирования в Mathcad / А. А. Григорьев // Проблемы и перспективы технологического образования в России и за рубежом : электронный сборник материалов V Международной научной-практической конференции, г. Ишим, 2 марта 2023 г. / Ишимский педагогический институт им. П. П. Ершова ; отв. ред. Л. В. Козуб. – Ишим, 2023. – С. 144-146.

UDC 539.12:537.63:004.942

MODELING THE STERN–GERLACH EXPERIMENT FOR THE CASE OF AN INHOMOGENEOUS FIELD OF A CONICAL SOLENOID IN THE MATLAB DEVELOPMENT ENVIRONMENTNT

Semernik R.D., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Grigoriev A.A. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Annotation. The work is devoted to simulating the inhomogeneous magnetic field of a coil with direct current and further conducting the Stern-Gerlach experiment based on the inhomogeneous field of a conical coil, as well as comparing the original result with that obtained in the study. The work is based on the properties of the gradient and the magnetic induction vector. The study itself was carried out in the MATLAB development environment.

Keywords. Stern-Gerlach experiment, gradient, conical coil, MATLAB, inhomogeneous magnetic field, simulation of results, magnetic induction vector, electromagnetism.

УДК 664.8.037:536.2:004.78

ЦИФРОВОЙ МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ В ХОЛОДОВОЙ ЦЕПИ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ

Константинова Ю.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена мониторингу температур при перевозке продуктов. Автором создана модель, учитывающая теплоту дыхания плодов. Алгоритмы на языке С интегрированы в датчики для расчета срока годности в реальном времени. Новизна заключается в переходе к предиктивному анализу, повышающем точность на 15–20 %. Практическая значимость: сокращение логистических потерь на 15–20 % и обоснование схем расстановки датчиков. Результаты применимы в цифровизации логистики и проектировании IoT-систем.

Ключевые слова. Логистика скоропортящихся продуктов, теплота дыхания, микроконтроллеры, язык С, предиктивное моделирование, срок годности, датчики температуры.

Введение.

В Беларуси вопросы продовольственной безопасности регулируются на двух уровнях: стратегическом (наличие продуктов в стране) и гигиеническом (безопасность еды для здоровья). В стране создана комплексная нормативно-правовая база, регламентирующая требования к температурным режимам на всех этапах обращения скоропортящейся продукции, что создает правовые основы для контроля качества и безопасности пищевых продуктов.

Холодовая цепь представляет собой непрерывную систему обеспечения требуемых температурных режимов при хранении и транспортировке скоропортящихся продовольственных товаров. Нарушение температурного режима приводит к финансовым потерям (миллиарды долларов ежегодно) и рискам для здоровья людей. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), ежегодные потери пищевых продуктов в мировом масштабе составляют около 1,3 млрд тонн, что эквивалентно трети всего производимого продовольствия. Значительная часть этих потерь (до 40 %) приходится на этапы хранения и транспортировки, причем основная причина – нарушения температурного режима [1]. Это огромные убытки для бизнеса и нехватка еды для людей. Экономические последствия разрыва холодовой цепи включают: прямые убытки от порчи продукции, репутационные потери для производителей и ритейлеров, риски для здоровья потребителей и связанные с этим юридические последствия, нерациональное использование ресурсов (энергия, транспорт, труд).

Цель работы – научиться с помощью формул и программирования предсказывать, как долго продукты останутся свежими в пути, и предложить простую систему, которая будет за этим следить.

Основная часть.

Математическая модель теплообмена в контейнере учитывает формулу теплового баланса и закон Аррениуса, учитывающий количество теплоты, выделяемое при дыхании продуктов [2]. При перевозке «живых» продуктов нельзя пренебрегать эндогенным тепловыделением. Даже при качественной теплоизоляции внутренний источник теплоты от дыхания приводит к саморазогреву груза, что является критическим фактором риска для сохранности продукции. Биокинетика процессов порчи формализована нами с помощью уравнения Аррениуса. Несмотря на единую математическую форму, физический смысл коэффициентов различен для разных категорий продуктов: для фруктов и овощей уравнение описывает интенсивность дыхания (метаболический процесс, выделяющий теплоту и CO_2); для мяса, рыбы, молока уравнение описывает скорость роста микрофлоры (процесс, ведущий к порче и потенциально опасный для здоровья). Данное различие было учтено в программной реализации путем использования различных наборов эмпирических коэффициентов для каждой категории товаров.

На рисунке 1 приведены рассчитанные по программе значения количества теплоты, выделяемого фруктами при различной температуре. Анализ данных рисунка 1 подтверждает гипотезу исследования: интенсивность дыхания (выделения количества теплоты) плодами имеет выраженную экспоненциальную зависимость от температуры окружающей среды. Пренебрежение этой составляющей приводит к систематической ошибке прогноза в сторону завышения остаточного срока годности на 15–20 %.

На рисунках 2–3 представлен срок годности продуктов в зависимости от температуры. Данные рисунков 2–3 наглядно демонстрируют иерархию устойчивости: четко виден ряд устойчивости продуктов (от самых лежких к самым скоропортящимся): фрукты (яблоки, апельсины) – молоко – мясо – рыба. Например, при 0...+4°C: яблоки (40,5 суток) > апельсины (27 суток) > молоко (3,6 суток) > мясо (2,25 суток) > рыба (0,9 суток). На основе представленных данных были

рассчитаны коэффициенты ускорения порчи (Q_{10}), показывающие, во сколько раз сокращается срок годности при росте температуры на 10°C. Для яблок Q_{10} = 3,2, для апельсинов – 3,0, для мяса – 5,0, для рыбы – 3,0, для молока – 4,0, т.е. наиболее чувствительно к повышению температуры мясо, затем молоко. Фрукты и рыба в этом диапазоне имеют типичный Q_{10}≈3. Это подтверждает, что модельные коэффициенты в коде (где для мяса и рыбы экспонента больше) выбраны верно.

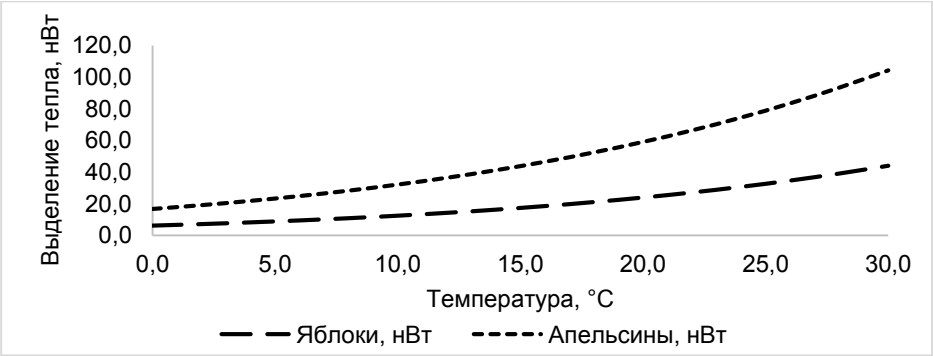


Рисунок 1 – Количество теплоты, выделяемое фруктами при различной температуре

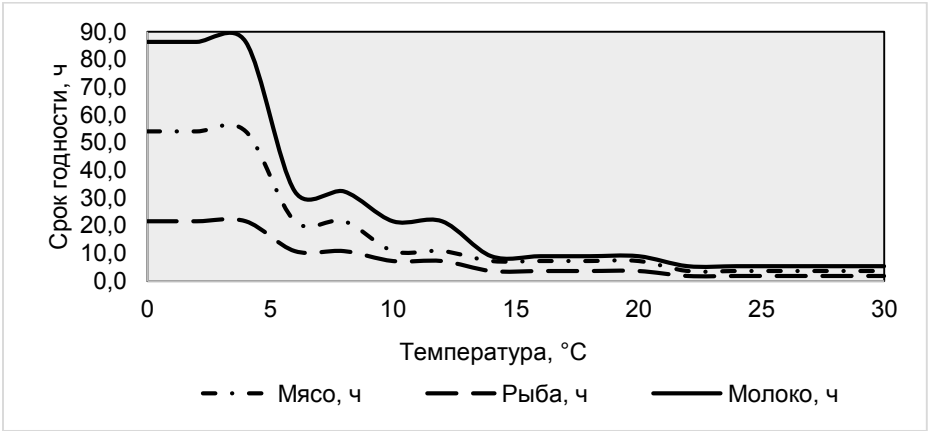


Рисунок 2 – Срок годности мяса, рыбы, молока при различной температуре

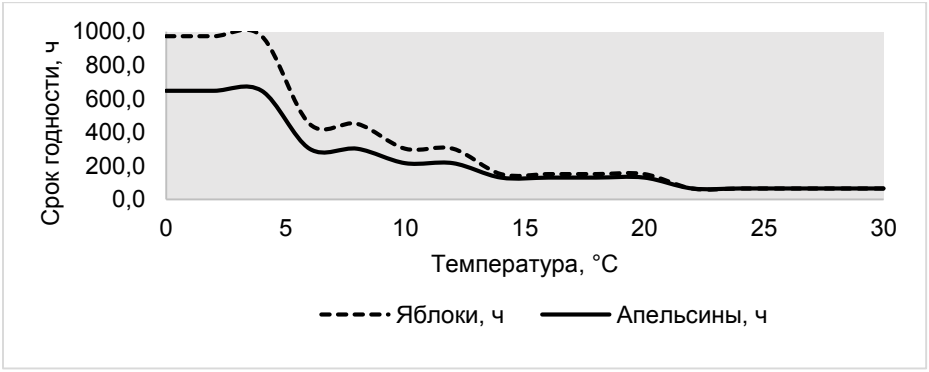


Рисунок 3 – Срок годности яблок, апельсинов при различной температуре

Рисунок 4 показывает, как эффект саморазогрева сокращает срок годности. Так, на 5-м часу разница сроков годности яблок с учетом саморазогрева и без него составляет 3,8 ч, на 47-м часу – 44,5 ч, т.е. рост температуры ускоряется со временем (нелинейная зависимость). Критическая точка: после 30°C (примерно 40-й час) срок годности падает ниже 100 ч, при 31,09°C срок составляет всего 55,7 ч. Следовательно, при длительном хранении необходимо активное охлаждение, а мониторинг температуры должен быть непрерывным; при достижении 25°C требуется срочное вмешательство.

Для корректной работы программы рекомендуется использовать следующее количество датчиков: обычный холодильник (до 1,2 м) – 1; длинная витрина (1,2–3,5 м) – 2; холодильная камера – 1–2. Датчики имеет смысл ставить в самых «опасных» местах: вверху, у двери, также рекомендуется размещать датчик в центре груза. Главное правило: датчик должен находиться в самом теплом месте.

Для реализации работы разработанного нами программного кода предлагается использовать следующую систему: микроконтроллер Arduino UNO R3, датчик температуры DS18B20, резистор 4,7 кОм, соединительные провода. Итоговая стоимость системы при использовании одного датчика – 50 руб., двух датчиков – 60 руб. В отличие от систем, используемых в настоящее время на практике (ThermoFleet, MOKOSMART совместно с Silicon Labs, Carrier ColdTrans), предлагаемая система не просто измеряет температуру, а рассчитывает по закону Аррениуса реальное тепловыделение продуктов и предсказывает, сколько времени осталось до порчи. Кроме того, предлагаемая система гораздо дешевле аналогов, позволяет учесть дыхание продуктов и выполнить прогноз окончания срока годности.

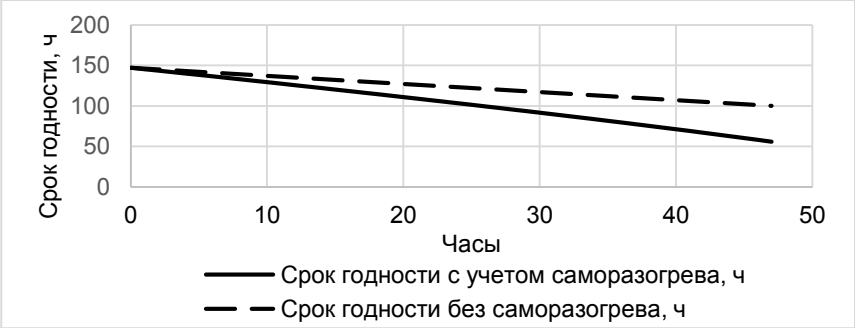


Рисунок 4 – Сравнение сроков годности яблок с учетом саморазогрева и без него

Заключение.

Экономическая эффективность предложенной системы существенна. Так, при применении системы при перевозке транспортной компанией 100 т яблок в месяц экономия с учетом прогноза окончания срока годности и уменьшения потерь составит 9000 руб.; при месячном обороте сельского магазина 30000 руб. экономия в месяц – 900 руб.; для проблемных магазинов Минска (в 2025 г. – около 800 магазинов) при средних потерях магазина в год без системы 18000 руб. экономия – 8640000 руб. за год; для магазина сети «Евроопт» с оборотом 150000 руб/мес. экономия – 2250 руб/мес.

Программный алгоритм реализует две функции: расчет тепловыделения продукции на основе уравнения Аррениуса, что позволяет количественно оценивать внутренний источник тепла в контейнере и учитывать его в тепловом балансе, и прогнозирование остаточного срока годности на основе актуальных температурных данных и кинетических моделей порчи. Вместо констатации факта порчи продукции алгоритм предупреждает о потенциальных проблемах, позволяя логистическим операторам принять корректирующие меры: усилить охлаждение, изменить маршрут доставки, перенаправить партию на ближайший распределительный центр. Доказана экономическая эффективность подхода. Даже прототип на базе Arduino демонстрирует, что автоматизация мониторинга позволяет снизить потери продукции на 15–20 %, уменьшить риски нарушений санитарных норм и штрафов, повысить прозрачность логистических процессов для участников цепи. Созданная система мониторинга представляет собой законченное техническое решение, которое переводит управление холодовой цепью на качественно новый уровень – от контроля температуры к интеллектуальному прогнозированию и предотвращению потерь на основе физико-математических моделей и микроконтроллерных технологий.

Список использованных источников:

1. Термодинамика и теоретические основы холодильной техники : учебно-методическое пособие / А.М. Ибраев, Т.Н. Мустафин, С.В. Визгалов [и др.]. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2020. – 96 с.

2. Капица, П.Л. Основы техники глубокого холода : монография / П.Л. Капица; под ред. Б.Д. Краковского. – М. : Экон-Информ, 2019. – 272 с.

UDC 664.8.037:536.2:004.78

DIGITAL MONITORING OF TEMPERATURE CONDITIONS IN THE FOOD CHILLING CHAIN

Konstantinova Yu.S., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Savilova Yu.I. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Annotation. The study focuses on temperature monitoring in food logistics. The author developed a model accounting for respiration heat of produce. Algorithms in C language are integrated into sensors to calculate shelf life in real-time. The novelty lies in the shift to predictive analysis, increasing accuracy by 15–20 %. Practical value: reduction of logistics losses by 15–20 % and optimization of sensor placement. Results are applicable to logistics digitalization and IoT system design.

Keywords. Perishable goods logistics, respiration heat, microcontrollers, C language, predictive modeling, shelf life, temperature sensors.

УДК 533.15:519.6:004.432.2

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДИФФУЗИИ

Константинова Ю.С. студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена исследованию диффузии газа методом молекулярной динамики. Автором разработана программа на языке С, моделирующая движение частиц через отверстие в реальном времени. В ходе эксперимента определено время наступления равновесия (440 с), зафиксированы статистические флуктуации и подтверждено постоянство температуры системы. Программа позволяет измерять давление и среднюю скорость частиц. Результаты могут применяться в учебных целях для визуализации законов термодинамики.

Ключевые слова. Молекулярная динамика, диффузия газа, язык С, компьютерное моделирование, термодинамическое равновесие, статистические флуктуации, вычислительная физика.

Введение. Современная физика немыслима без использования информационных технологий (ИТ). Многие задачи, которые невозможно решить аналитически, успешно решаются численными методами с помощью компьютеров. В этом контексте информационные технологии выступают не просто как вспомогательный инструмент, а как полноценный метод научного познания. Компьютерное моделирование, реализованное на языке программирования С, позволяет не только визуализировать процессы, но и проводить вычислительные эксперименты с точностью, недостижимой в аналитических моделях. Язык С благодаря своей производительности и близости к аппаратному обеспечению даёт возможность эффективно симулировать динамику большого числа частиц, что делает его идеальным инструментом для задач молекулярной динамики. Актуальность работы состоит в том, что компьютерное моделирование позволяет наглядно продемонстрировать процессы, скрытые от прямого наблюдения (например, движение молекул), и проверить фундаментальные законы физики. Так, процесс диффузии играет ключевую роль в природе и технике – от дыхания клеток до работы мембранных фильтров [1; 2].

Цель работы: исследовать процесс диффузии газа через отверстие в перегородке методом молекулярной динамики.

Основная часть. В данной работе язык С выступает как инструмент вычислительной физики, позволяющий провести детальное моделирование диффузионного процесса и получить количественные данные, недоступные в реальном эксперименте. В программе хаос имитируется с помощью генератора случайных чисел. В работе для всех экспериментов использовалось фиксированное зерно 12345, что позволяет при необходимости точно повторить полученные результаты. Данные записывались каждые 10 шагов, длительность шага – 0,05 с. Программа моделирует движение 150 частиц в двумерном ящике размером 80×40 условных единиц. В отличие от интерпретируемых языков (Python, MATLAB), компилируемый код на С выполняется на порядки быстрее, что позволяет проводить симуляции с большим числом частиц и на больших временных промежутках. Использование указателей и прямого управления памятью даёт возможность эффективно обрабатывать столкновения частиц без дополнительных расходов.

В коде использованы следующие физические принципы: движение частиц – прямая реализация закона равномерного движения; столкновения со стенками – при ударе скорость меняет знак (упругий удар); столкновения между частицами – реализован упругий удар для частиц одинаковой массы; измерение температуры – температура пропорциональна средней кинетической энергии частиц; измерение давления – давление в модели пропорционально количеству ударов частиц о стенки сосуда и измеряется в условных единицах. Для исследования диффузии в программу была добавлена виртуальная перегородка, разделяющая ящик на две равные половины. В перегородке имеется отверстие размером 5 условных единиц. В начальный момент все 150 частиц помещены в левую половину. Проведенное исследование наглядно демонстрирует, как информационные технологии расширяют границы возможностей физики. Классический физический эксперимент с реальным газом требует сложного оборудования (вакуумные камеры, датчики давления, системы регистрации частиц) и зачастую не позволяет наблюдать микроскопическую динамику процесса.

Преимущества реализованного компьютерного моделирования: полная наблюдаемость (в отличие от реального эксперимента, где мы видим лишь интегральные параметры (давление, температуру), в модели можно отследить траекторию каждой отдельной частицы в любой момент времени); воспроизводимость (фиксация зерна генератора случайных чисел позволяет повторить эксперимент бесконечное число раз с абсолютно идентичными начальными условиями – в реальной физике это невозможно из-за квантовой и тепловой стохастичности); управляемость параметрами (размер отверстия, количество частиц, их начальная скорость – все эти параметры изменяются простым редактированием констант в коде; в реальном эксперименте замена перегородки или изменение

давления потребовали бы перенастройки всей установки); производительность (программа способна обрабатывать миллионы столкновений в секунду; в работе за 8800 шагов обработано более 35000 столкновений, что в реальном времени заняло бы доли секунды, но дало полную картину процесса диффузии). Таким образом, язык С выступает не просто как средство записи алгоритма, а как цифровая лаборатория, в которой законы физики обретают вычислимую форму. ИТ позволяют «заглянуть» туда, куда не проникают приборы, и провести эксперименты, которые в реальности потребовали бы колоссальных затрат.

На рисунке 1 представлен скриншот программы при равновесном состоянии, на рисунке 2 – график диффузии газа через перегородку, на рисунке 3 – график изменения с течением времени относительного давления в сосуде, на рисунке 4 – изменение температуры (средней скорости частиц) с течением времени.

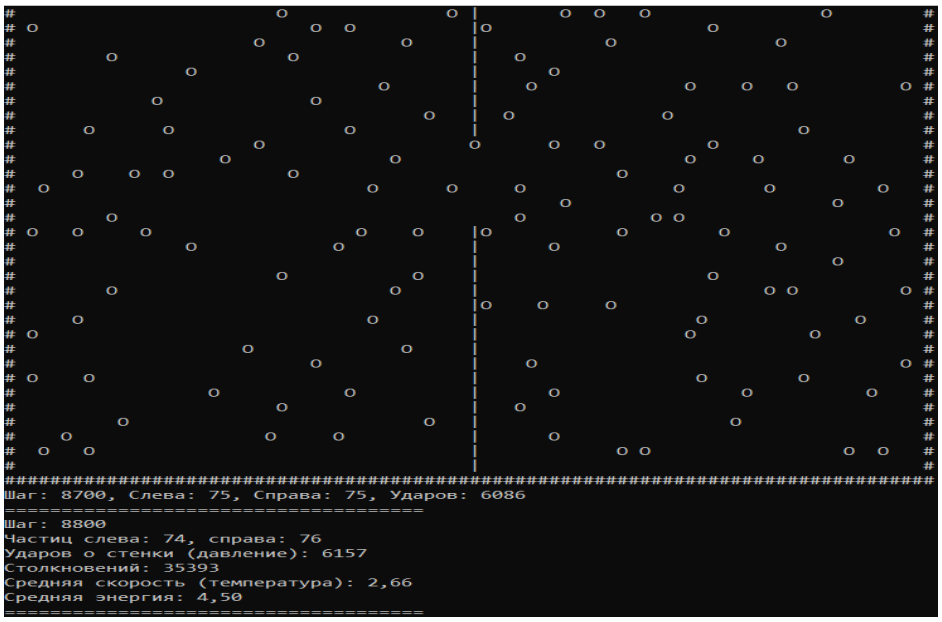


Рисунок 1 – Равновесное состояние. Частицы распределены равномерно

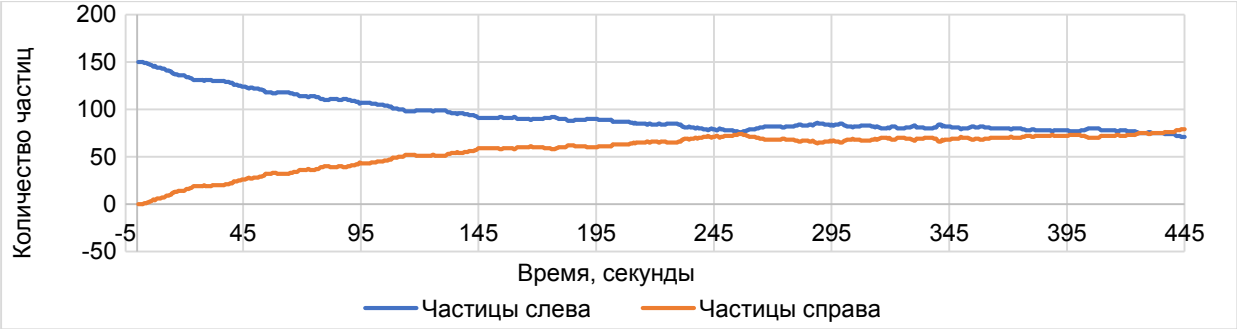


Рисунок 2 – Диффузия газа через перегородку

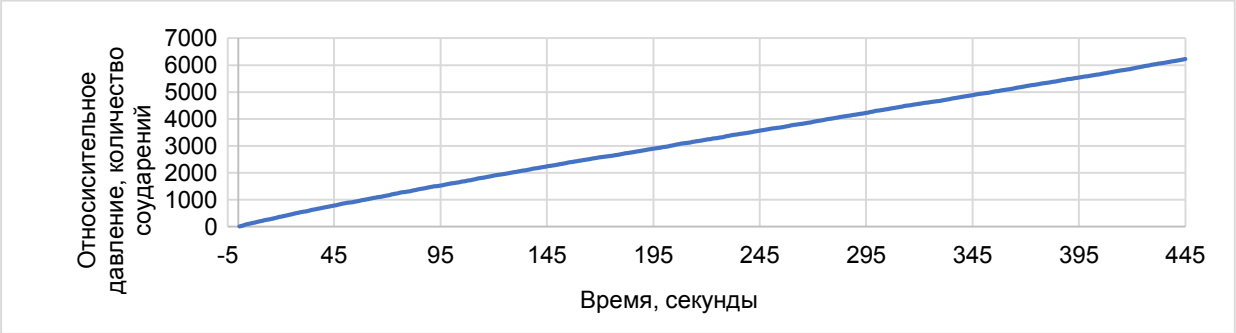


Рисунок 3 – Изменение относительного давления с течением времени

Рисунок 4 – Изменение температуры с течением времени

В начальный момент все 150 частиц находятся слева. По мере прохождения частиц через отверстие их количество слева убывает, а справа возрастает (см рисунок 2). К моменту 8800 шагов (440 секунд) устанавливается равновесие – частицы распределяются поровну (75 и 75). Вблизи равновесия (начиная с 6000 шагов) наблюдаются статистические флуктуации (отклонения до ±3 частиц от среднего значения 75), что соответствует молекулярно-кинетической теории. Это происходит, так как при равновесии потоки частиц слева направо и справа налево уравновешиваются, но из-за конечного числа частиц есть случайные отклонения. Эксперимент наглядно демонстрирует процесс диффузии и подтверждает, что в равновесном состоянии концентрация частиц выравнивается. Наличие флуктуаций свидетельствует о корректности статистического подхода в модели.

Давление измерялось количеством ударов частиц о стенки сосуда (в условных единицах) (см рисунок 3). В начальный момент давление быстро растет, затем, после выхода системы на равновесный режим (около 440 с), флуктуирует вокруг среднего значения. Это соответствует статистическим флуктуациям, характерным для систем с конечным числом частиц.

Рисунок 4 демонстрирует изменение температуры (средней скорости частиц) с течением времени. Температура в модели пропорциональна средней кинетической энергии частиц и оценивается по средней скорости. Температура остается практически постоянной на протяжении всего эксперимента, что подтверждает сохранение энергии в модели и корректность численного метода.

Ограничения модели: дискретность времени (шаг Δt = 0,05 может пропускать некоторые столкновения, что вносит погрешность в траектории частиц); конечное число частиц – 150 против 10^{23} в реальном газе, что усиливает флуктуации; двумерность – реальный газ трёхмерен, что может влиять на количественные характеристики диффузии; условные единицы – давление и температура измеряются в относительных единицах, что позволяет исследовать только качественные зависимости.

Заключение.

Проведенное исследование подтверждает, что информационные технологии являются полноправным инструментом современной физики. Компьютерное моделирование на языке С позволило не только подтвердить теоретические законы диффузии, но и визуализировать процесс на микроуровне, что невозможно сделать в реальном лабораторном эксперименте. Производительность языка С дала возможность обработать миллионы событий (столкновений) и получить статистически значимые данные о флуктуациях вблизи равновесия. Практическая значимость исследования: разработанная программа может быть использована в учебных целях для демонстрации основных законов термодинамики и методов компьютерного моделирования в физике, а также как основа для дальнейших исследований (например, зависимости скорости диффузии от размера отверстия).

Список использованных источников:

1. Матвеев, А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Лань, 2024. – 480 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М. : КноРус, 2023. – 592 с.

UDC 533.15:519.6:004.432.2

COMPUTER SIMULATION OF GAS DIFFUSION

Konstantinova Yu.S., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Savilova Yu.I. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Annotation. The study investigates gas diffusion using the molecular dynamics method. The author developed a C-based program that simulates particle motion through an aperture in real-time. The experiment determined the equilibrium time (440 s), recorded statistical fluctuations, and confirmed constant system temperature. The software enables measuring pressure and average particle velocity. The results are applicable for educational purposes to visualize the fundamental laws of thermodynamics.

Keywords. Molecular dynamics, gas diffusion, C language, computer simulation, thermodynamic equilibrium, statistical fluctuations, computational physics.

УДК 544.774.2:621.38-022.532

АЭРОГЕЛИ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Гурин Е.Е., Демидко Н.А., Борис А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1], г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель

Аннотация. Аэрогели - уникальные наноструктурированные материалы, перспективные для применения в наноэлектронике. Их основные физические свойства: сверхнизкая плотность, высокая пористость, рекордно низкая теплопроводность и особенности электропроводности. Графеновый аэрогель сочетает в себе высокую проводимость с развитой поверхностью. Основные области применения: низкодиэлектрические материалы, суперконденсаторы, термоизоляция и газовые сенсоры.

Ключевые слова: графеновый аэрогель, углеродные наноматериалы

Введение. В современных условиях наноэлектроника требует создания новых материалов с уникальными физическими и химическими свойствами. Традиционные материалы не всегда удовлетворяют требованиям миниатюризации, энергоэффективности и высокой производительности устройств. Одним из перспективных направлений является использование аэрогелей — наноструктурированных материалов с крайне низкой плотностью и высокой пористостью. Их уникальные свойства позволяют рассматривать их как основу для разработки новых элементов наноэлектроники, включая сенсоры, накопители энергии и теплоизоляционные компоненты.

Основная часть. Аэрогели — класс материалов, представляющих собой гель, в котором жидкая фаза полностью замещена газообразной. Эти очень твердые материалы (рисунок 1) на 99,8% состоящие из воздуха способны выдерживать вес, превышающий их собственный в 4000 раз. Аэрогели огнеупорны, воздухопроницаемы, способны впитывать воду или масло, могут, в зависимости от материала изготовления, служить электрическим проводником или не менее эффективным изоляционным материалом [1].

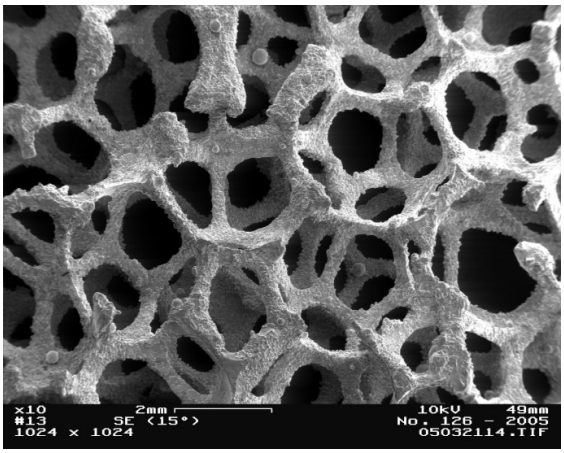


Рисунок 1 - Структура аэрогеля

Наиболее характерные свойства аэрогеля:

- Очень низкая плотность;
- Крайне низкая теплопроводность (до 0.016 Вт/(мК).)
- Низкая скорость распространения звука (до 70 м/с);
- Чрезвычайно низкий показатель преломления света (до 1,0002);
- Электрическая проводимость может меняться в широких пределах в зависимости от используемого материала.

У аэрогелей есть еще один уникальный параметр — отношение площади полной поверхности к его весу: до 3200 м²/г. Это означает, что покрытие аэрогелей (удельная площадь поверхности) одного грамма этого материала хватит, чтобы равномерно покрыть поверхность объекта.

Аэрогель был впервые создан в 1931 году Сэмюэлем Кистлером (США). Его цель заключалась в том, чтобы заменить жидкость в геле на газ, что привело к созданию структуры, состоящей почти полностью из воздуха. Этот процесс называется "сверхкритической сушкой", и он позволяет сохранить оригинальную форму геля, но при этом сделать его невероятно легким и пористым.

Несмотря на малую массу, аэрогели способны выдерживать нагрузку, превышающую их вес в тысячи раз. Такие характеристики делают их уникальными среди современных материалов и открывают широкие возможности применения, включая наноэлектронику.

Наноструктура аэрогелей представляет собой уникальную архитектуру твердого тела, сформированную связной трехмерной сеткой, состоящей из наноразмерных частиц и кластеров. Данная сетка характеризуется наличием разветвленной системы пор, размер которых преимущественно лежит в мезодиапазоне (от 2 до 50 нанометров). Именно такая ультрадисперсная и высокопористая архитектура обусловливает экстремальные значения удельной площади поверхности материала, 3200м^2/г.

Электрофизические свойства аэрогелей являются прямым следствием их уникальной наноструктуры и демонстрируют ряд аномальных явлений, нехарактерных для сплошных сред.

Электропроводность аэрогелей носит сложный, нетривиальный характер и в значительной степени зависит от природы материала каркаса. В случае диэлектрических аэрогелей, таких как кремнезем, проводимость практически отсутствует, и материал ведет себя как идеальный изолятор. В полупроводниковых и углеродных аэрогелях механизм переноса заряда определяется прыжковой проводимостью, где носители заряда мигрируют путем туннелирования или активированных прыжков между локализованными состояниями в наночастицах или между отдельными фрагментами каркаса. Проводимость в таких системах носит активационный характер и сильно зависит от температуры, подчиняясь законам, отличным от классической металлической или полупроводниковой проводимости. Важно отметить, что высокая пористость и разветвленность путей переноса приводят к тому, что эффективная проводимость аэрогеля на несколько порядков ниже проводимости компактного материала того же состава.

Диэлектрические свойства аэрогелей также демонстрируют ярко выраженную зависимость от наноструктуры. Благодаря тому, что материал представляет собой композит типа "диэлектрик-воздух", где основную долю объема занимает газовая фаза, эффективная диэлектрическая проницаемость аэрогелей чрезвычайно низка и приближается к единице, что делает их одними из лучших твердых диэлектриков. В переменных электрических полях наблюдаются релаксационные явления, связанные с поляризацией на границах раздела наночастиц и миграцией заряда в связной сетке, что приводит к частотной дисперсии диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Теплопроводность аэрогелей является их уникальной характеристикой и достигает рекордно низких значений, зачастую ниже, чем у неподвижного воздуха. Это обусловлено тремя факторами: 1) твердотельная теплопроводность подавлена из-за извилистости и фрагментарности каркаса, а также из-за высокого теплового сопротивления в наноконтактах между частицами; 2) конвекция газа в порах нанометрового размера практически полностью подавлена; 3) вклад излучения также снижается благодаря многократному рассеянию инфракрасного излучения на стенках пор и частицах. Таким образом, аэрогели выступают в роли исключительно эффективных теплоизоляторов.

Поведение аэрогелей при высоких температурах характеризуется сложной динамикой структурных изменений. При нагреве наблюдается необратимая усадка материала, обусловленная спеканием наночастиц и коалесценцией пор, что приводит к уплотнению структуры и, как следствие, к изменению всех электрофизических свойств. Проводимость, изначально низкая, может несколько возрастать за счет улучшения контактов между частицами, однако диэлектрические свойства и теплопроводность претерпевают существенные изменения. При температурах, близких к температуре плавления или разложения материала каркаса, происходит деградация наноструктуры с потерей уникальных свойств, хотя некоторые тугоплавкие аэрогели, например, на основе оксидов алюминия или циркония, способны сохранять структурную целостность до весьма высоких температур, что позволяет использовать их в качестве высокотемпературной изоляции.

Графеновый аэрогель представляет собой трехмерную макроскопическую структуру, собранную из двумерных листов графена, и наследует уникальные свойства своего наномасштабного предшественника, транслируя их в объемный материал. Структурно он формируется за счет образования связной сетки, в которой отдельные слои графена, состоящие из монослоев sp^2-гибридизованных атомов углерода, соединяются между собой, образуя высокопористый каркас с иерархической системой пор, простирающейся от нанометров до микрометров. В отличие от идеальной двумерной структуры самого графена, где электроны движутся баллистически без рассеяния, в объеме аэрогеля перенос заряда реализуется через сложную сеть контактов между отдельными листами и их фрагментами. Высокая проводимость графенового аэрогеля, достигающая значительных значений, обеспечивается высокой электропроводностью самих графеновых слоев в сочетании с формированием перколяционной сети, пронизывающей весь объем материала, однако она ухудшается за счет контактного сопротивления в местах соединения отдельных листов [2].

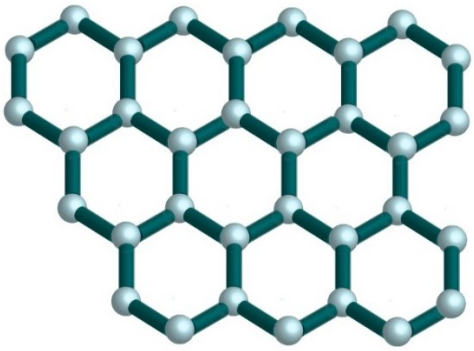


Рисунок 2 – Структура графена

Этот уникальный материал обладает целым рядом уникальных свойств: 1) экстремально низкой плотностью, 2) рекордной удельной поверхностью покрытия, 3) высокой упругостью и способностью к значительным обратимым деформациям, 4) химическую инертность. Сочетание высокой электропроводности с огромной удельной поверхностью создает предпосылки для эффективного взаимодействия материала с молекулами газов или химическими соединениями. Именно это сочетание делает графеновый аэрогель чрезвычайно перспективным для применения в сенсорных системах. При адсорбции молекул-аналитов на поверхность графена происходит изменение локального электронного окружения, что модулирует проводимость материала в целом, причем благодаря высокой площади поверхности даже незначительные концентрации вещества вызывают детектируемое изменение электрического сигнала. Таким образом, графеновый аэрогель выступает как высокочувствительный резистивный сенсор, способный регистрировать предельно малые количества газов или химических веществ, а его развитая пористая структура обеспечивает быструю диффузию аналита к активным центрам и, следовательно, малое время отклика [3].

Получение аэрогелей — это многостадийный процесс, основной задачей которого является удаление жидкости из структуры геля без разрушения его хрупкого твердого каркаса.

Основные этапы синтеза – золь-гель процесс: смешивание прекурсоров (например, алкоксидов кремния) для формирования золя, который затем переходит в гель (трехмерную сетку, заполненную жидкостью); созревание (Старение): выдержка геля в растворе для укрепления его структуры. Промывка и замена растворителя: Постепенная замена исходной жидкости (обычно воды) на спирт или другой растворитель, подходящий для выбранного метода сушки.

Существуют разные методы сушки (превращение геля в аэрогель):

Сверхкритическая сушка: жидкость в порах доводят до сверхкритического состояния, где исчезает граница между жидкой и газообразной фазами. Это позволяет избежать капиллярного давления, которое разрушило бы поры. Лиофилизация или сушка вымораживанием: гель замораживают, а растворитель удаляют путем сублимации (переход из твердого состояния в газ, минуя жидкое) в вакууме. Полученные материалы иногда называют криогелями. Сушка при атмосферном давлении: более дешевый метод, требующий модификации поверхности геля для снижения поверхностного натяжения или использования специальных химических добавок, предотвращающих усадку при обычном испарении.

Заключение. Аэрогели представляют собой уникальные наноструктурированные материалы с выдающимися физическими свойствами. Их высокая пористость, малая плотность и возможность регулирования проводимости делают их перспективными для применения в наноэлектронике. Особенно важным является развитие графеновых аэрогелей, которые сочетают в себе механическую прочность и высокую электропроводность. Таким образом, аэрогели могут сыграть ключевую роль в создании новых электронных устройств и технологий будущего.

***Список использованных источников**:*

1.Аэрогель [Электронный ресурс]. – Режим доступа]https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%8D%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D0%BB%D1%8C

2. Аэрографен [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.ecf1a3e5-69bb17f9-d3c0604b-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Aerographene

3. Исследование графеновых аэрогелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/ 10.18321/cpc543

UDC 544.774.2:621.38-022.532

AEROGELS AS PROMISING NANOSTRUCTURED MATERIALS FOR APPLICATIONS IN NANOELECTRONICS

Gurin E.E., Demidko N.A., Borys A.A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Goryachun N.V. – senior lecturer

Annotation. Aerogels are unique nanostructured materials with promising applications in nanoelectronics. Their key physical properties include ultra-low density, high porosity, record-low thermal conductivity, and exceptional electrical conductivity. Graphene aerogel combines high conductivity with a large surface area. Key applications include low-dielectric materials, supercapacitors, thermal insulation, and gas sensors.

Keywords: graphene aerogel, carbon nanomaterials, thermal insulation, catalysis, sensors, supercapacitors.

УДК 004.77:621.391.82

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ НА СКОРОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ Wi-Fi

Страчинский А.Т., Зененко М.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрены физические принципы работы технологии Wi-Fi и технологии активного подавления (глушения) Wi-Fi. Проанализированы достоинства и недостатки различных методов и приборов глушения. Теоретически исследовано влияние активного подавления на пропускную способность Wi-Fi. Выявлен критический порог, при котором эффективность передачи падает ниже необходимого для практического применения.

Ключевые слова. Wi-Fi, активное подавление, помеховое воздействие, беспроводной канал связи, отношение сигнал/шум, пропускная способность канала, устойчивость соединения, теорема Шеннона—Хартли.

Введение

Беспроводные сети стандарта Wi-Fi в настоящее время занимают важное место в телекоммуникационной инфраструктуре, обеспечивая передачу данных в корпоративных, промышленных и бытовых системах. Широкое распространение данной технологии обусловлено удобством развертывания, высокой гибкостью и возможностью оперативной организации обмена информацией между большим количеством устройств. Одновременно с этим расширение области применения Wi-Fi сопровождается ростом требований к надежности и устойчивости беспроводного соединения в условиях внешних электромагнитных воздействий. Чувствительность физического уровня таких сетей к помехам обусловливает актуальность исследования факторов, способных ухудшать качество передачи данных.

Одной из наиболее существенных угроз для беспроводных каналов связи является активное подавление (jamming) [1]. Данный тип воздействия направлен на искусственное ухудшение отношения сигнал/шум в канале связи, что может приводить к отказу в обслуживании без компрометации криптографических средств защиты или физического проникновения в защищенную зону. В условиях широкого распространения беспроводных технологий задача оценки влияния активного подавления на скорость и устойчивость Wi-Fi имеет как теоретическое, так и прикладное значение.

Исследование механизмов активного подавления и способов противодействия ему в реальных условиях, как правило, требует проведения серии дорогостоящих экспериментов с использованием специального оборудования и контролируемой среды. Это затрудняет массовую проверку гипотез и ограничивает возможности оперативного анализа устойчивости сети при различных параметрах внешнего воздействия. В связи с этим особый интерес представляют аналитические методы, основанные на теории информации, позволяющие формализовать задачу и определить теоретические пределы производительности канала связи без развертывания физических стендов для генерации помех [2].

1. Теоретические основы функционирования Wi-Fi

Технология Wi-Fi представляет собой способ беспроводной передачи данных, основанный на распространении электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне. Обмен информацией между устройствами осуществляется через радиоканал, качество которого определяется как параметрами передающего и принимающего оборудования, так и условиями распространения сигнала в окружающей среде. Для устойчивой работы сети необходимо, чтобы принимаемый полезный сигнал обладал достаточной мощностью и мог быть надежно выделен на фоне внешних и внутренних шумов.

К числу основных параметров беспроводного канала относятся ширина полосы пропускания, мощность полезного сигнала и уровень шума или помех. Указанные характеристики непосредственно влияют на потенциальную пропускную способность канала связи и, следовательно, на максимально достижимую скорость передачи данных. При фиксированной полосе пропускания качество связи в значительной степени определяется тем, насколько мощность полезного сигнала превышает мощность шумовой составляющей. Чем выше данное соотношение, тем устойчивее прием и тем выше вероятность корректной передачи информации без ошибок и повторных отправок.

Одним из ключевых параметров, характеризующих работу Wi-Fi, является отношение сигнал/шум. Этот показатель позволяет количественно оценить, насколько приемник способен выделить полезный сигнал на фоне посторонних воздействий. При высоком отношении сигнал/шум канал сохраняет работоспособность, обеспечивает приемлемую скорость передачи и устойчивое соединение. Снижение данного показателя приводит к ухудшению качества приема, росту вероятности ошибок, увеличению числа повторных передач пакетов и снижению общей устойчивости сети [3].

Поскольку Wi-Fi функционирует как радиоканал, его эффективность напрямую зависит от условий распространения электромагнитного сигнала и уровня помех в среде передачи. Следовательно, при исследовании скорости и устойчивости беспроводной сети необходимо учитывать не только характеристики самой системы, но и внешние воздействия, способные изменить параметры сигнала и шума. В этом контексте активное подавление следует рассматривать как значимый фактор, влияющий на работу канала связи.

2. Активное подавление Wi-Fi и его влияние на канал связи

Под активным подавлением понимается преднамеренное создание внешнего электромагнитного воздействия, ухудшающего условия приема полезного сигнала в беспроводном канале. Для сетей стандарта Wi-Fi такое воздействие сводится к увеличению мощности помехи в рабочем диапазоне частот, вследствие чего снижается отношение сигнал/шум. Поскольку именно данный параметр определяет качество радиоканала, его искусственное уменьшение непосредственно влияет на скорость передачи данных и устойчивость соединения.

С физической точки зрения активное подавление проявляется в уменьшении различимости полезного сигнала на фоне шумовой составляющей. Приемник утрачивает возможность надежно выделять и корректно декодировать передаваемую информацию. По мере увеличения мощности помехи возрастает вероятность ошибок, увеличивается число повторных передач, снижается эффективная скорость обмена данными и ухудшается общая устойчивость работы сети. Таким образом, активное подавление воздействует не на программный уровень беспроводной системы, а непосредственно на ее физическую основу - процесс распространения и приема электромагнитного сигнала.

Существуют различные методы и средства подавления Wi-Fi, различающиеся по спектральным и временным характеристикам создаваемой помехи. Однако в рамках данного исследования их целесообразно рассматривать не по конструктивным особенностям устройств, а по итоговому эффекту: все они приводят к росту эквивалентной мощности шума в канале. Такой подход позволяет перейти от анализа частных технических реализаций к универсальной модели, в которой определяющим фактором является величина помехи. Это создает основу для дальнейшей количественной оценки влияния активного подавления на пропускную способность канала средствами теории информации.

3. Теоретическая модель оценки пропускной способности Wi-Fi в условиях помех

Для количественной оценки влияния активного подавления на работу беспроводной сети целесообразно использовать аналитический подход, позволяющий описать изменение характеристик канала через его основные физические параметры. Такой подход особенно важен в случаях, когда проведение серии натурных экспериментов затруднено из-за необходимости применения специального оборудования и контролируемых условий. В рамках теоретического анализа внешнюю помеху можно рассматривать как изменение шумовой составляющей канала, что позволяет связать устойчивость сети с фундаментальными закономерностями теории связи.

Одной из базовых зависимостей, позволяющих оценить предельную пропускную способность канала при наличии шума, является теорема Шеннона-Хартли [2]. В соответствии с ней пропускная способность канала определяется выражением

$$C = W\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right), \quad (1)$$

где *C* - пропускная способность канала связи, *W* - ширина полосы пропускания, *S* - средняя мощность полезного сигнала, *N* - средняя мощность шума или внешней помехи.

При фиксированной ширине полосы пропускания величина W остается постоянной, поэтому основным фактором, определяющим изменение пропускной способности, является отношение S/N. При неизменной мощности полезного сигнала и росте мощности помехи значение этого отношения уменьшается, что приводит к снижению пропускной способности канала. Данный процесс носит нелинейный характер: на начальном этапе деградация может быть сравнительно умеренной, однако при дальнейшем увеличении Nпропускная способность убывает существенно быстрее.

На рисунке 1 изображена графическая зависимость относительной пропускной способности от мощности помехи, где параметр *N*, характеризующий уровень внешнего помехового воздействия, изменяется в диапазоне от -100 до -30 дБм, тогда как значение *S* принимается постоянным и равным -50 дБм.

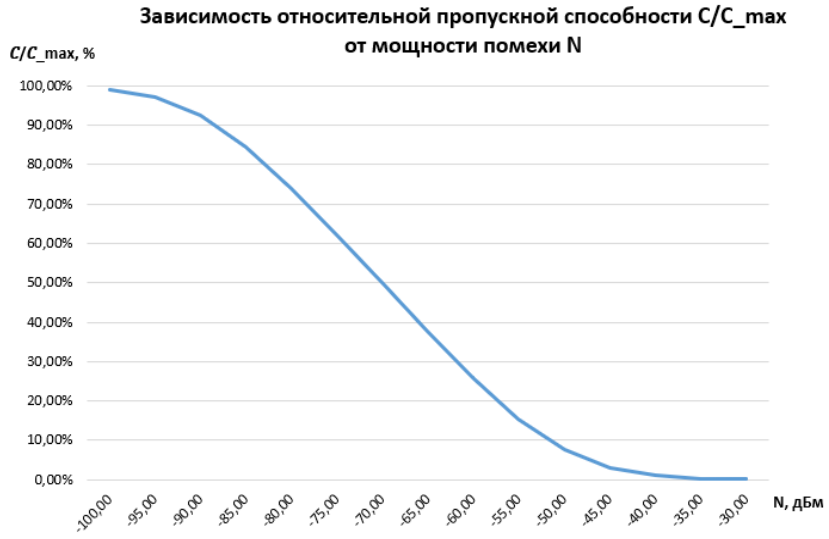


Рисунок 1 – Зависимость относительной пропускной способности от мощности помехи

Использование данной модели позволяет перейти от качественного описания влияния активного подавления к количественному анализу. Если в предыдущих разделах рассматривались физические основы работы Wi-Fi и общий механизм воздействия помехи на радиоканал, то в данном случае появляется возможность исследовать, каким образом рост мощности внешнего сигнала влияет на пропускную способность сети. Это создает основу для последующего анализа зависимости относительной пропускной способности от мощности помехи и для определения области, в которой работа канала становится существенно затрудненной.

4. Анализ результатов исследования

На основе рассмотренной теоретической модели можно проследить, как изменяется состояние канала Wi-Fi при увеличении мощности внешней помехи. При малых значениях мощности помехи полезный сигнал продолжает преобладать над шумовой составляющей, поэтому пропускная способность канала снижается незначительно. В данном режиме сеть сохраняет работоспособность, а ухудшение характеристик проявляется главным образом в умеренном снижении скорости передачи данных.

Как видно из рисунка 1, с ростом мощности помехи относительная пропускная способность канала постепенно уменьшается. На начальном участке кривой снижение происходит сравнительно плавно, поскольку отношение сигнал/шум остается достаточно высоким для устойчивого приема информации. Однако при дальнейшем увеличении мощности внешнего воздействия уменьшение пропускной способности становится более выраженным, что свидетельствует о существенном ухудшении условий передачи данных.

Особый интерес представляет область, в которой мощность помехи становится сравнимой с мощностью полезного сигнала. В этой области кривая демонстрирует резкое снижение относительной пропускной способности, что указывает на переход канала в режим неустойчивой работы. При таком соотношении сигнала и шума приемник уже не способен надежно выделять полезную информацию на фоне внешнего воздействия, вследствие чего возрастают вероятность ошибок, число повторных передач и общее время обмена данными.

Таким образом, графическая зависимость позволяет выделить критическую область функционирования канала, соответствующую условию $N = S$. Вблизи данного соотношения эффективность передачи данных становится недостаточной для нормальной эксплуатации сети. Следовательно, устойчивость Wi-Fi определяется не только наличием полезного сигнала, но и его энергетическим запасом относительно помехового фона.

Представленный график не только иллюстрирует характер деградации канала при активном подавлении, но и позволяет наглядно оценить пределы работоспособности беспроводной сети. По мере роста мощности помехи канал последовательно переходит от режима устойчивой передачи к режиму значительного ухудшения качества связи, что подтверждает применимость аналитической модели для оценки влияния внешнего электромагнитного воздействия на скорость и устойчивость Wi-Fi.

Заключение

В работе рассмотрены физические основы функционирования Wi-Fi и особенности активного подавления как внешнего электромагнитного воздействия на беспроводной канал связи. Показано, что качество передачи данных в таких системах в значительной степени определяется отношением мощности полезного сигнала к мощности шума. Изменение данного соотношения лежит в основе ухудшения скорости и устойчивости работы сети при воздействии внешних помех.

Для количественной оценки влияния активного подавления использована теоретическая модель, основанная на теореме Шеннона-Хартли. Такой подход позволил описать зависимость пропускной способности канала от мощности внешней помехи и перейти от общего качественного представления о подавлении к анализу изменения параметров сети в зависимости от уровня помехового воздействия. Использование относительной пропускной способности обеспечило наглядное исследование характера деградации канала при усилении внешнего шума.

Проведенный анализ показал, что рост мощности помехи приводит к нелинейному снижению пропускной способности Wi-Fi. На начальном этапе влияние внешнего воздействия может быть умеренным, однако по мере уменьшения отношения сигнал/шум ухудшение характеристик канала становится значительно более выраженным. Наиболее существенные изменения наблюдаются в области, где мощность помехи становится сопоставимой с мощностью полезного сигнала. В этих условиях передача данных теряет устойчивость, а эффективность функционирования сети существенно снижается.

Полученные результаты позволяют рассматривать активное подавление как фактор, непосредственно влияющий на практическую работоспособность беспроводной сети. Теоретическое описание зависимости пропускной способности от мощности помехи дает возможность предварительно оценивать устойчивость Wi-Fi к внешним электромагнитным воздействиям и использовать результаты такого анализа при дальнейшем исследовании уязвимости беспроводных систем.

Список использованных источников

1. Pirayesh, H. Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey / H. Pirayesh, H. Zeng // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, No. 2. – P. 767–809.

2. Shannon, C. E. A Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, No. 3. – P. 379–423.

3. Муравьев, В. В. Сверхвысокочастотные технологии в системах телекоммуникаций: учеб.-метод. пособие: в 3 ч. Ч. 2. Устройства СВЧ-систем телекоммуникаций (усилители, смесители, генераторы) / В. В. Муравьев, С. А. Кореневский, В. Н. Мищенко. – Минск: БГУИР, 2007. – 71 с.

UDC 004.77:621.391.82

STUDY OF THE IMPACT OF ACTIVE JAMMING ON Wi-Fi RATE AND STABILITY

Strachinsky A.T., Zenenko M.A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. The physical principles of Wi-Fi technology and active Wi-Fi jamming are examined. The advantages and disadvantages of various jamming methods and devices are analyzed. The impact of active jamming on Wi-Fi throughput is theoretically examined. The critical threshold at which transmission efficiency drops below the level required for practical use is identified.

Keywords. Wi-Fi, active jamming, wireless communication channel, signal-to-noise ratio, channel capacity, connection stability, Shannon-Hartley theorem.

УДК 620.22

ЭКОУСТОЙЧИВЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Корниенко Н.А., Тимофеюк Д.К., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Дорошевич И. Л. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной статье рассматриваются экоустойчивые и возобновляемые материалы, их классификация, свойства и перспективы применения. Анализируются нанокристаллическая целлюлоза, упрочнённая древесина, биоклеи, водорослевые электрохимические накопители энергии, биопластики и биоразлагаемые полимеры, а также экологически чистые строительные материалы. Сделан вывод об актуальности перехода к возобновляемым и перерабатываемым материалам в контексте устойчивого развития.

Ключевые слова. Возобновляемые материалы, экоустойчивость, биопластики, нанокристаллическая целлюлоза, упрочнённая древесина, биоразлагаемые полимеры, биоклеи, водоросли, переработка, строительные материалы.

1. Введение

Строительная отрасль и промышленность в целом оказывают значительное воздействие на окружающую среду. По различным оценкам, производство цемента – основного компонента бетона – обеспечивает около 8 % мировых выбросов углекислого газа CO_2. Добыча природных ресурсов, таких как древесина, ведёт к вырубке лесов и нарушению экосистем [6]. В связи с этим в мировом научном сообществе нарастает интерес к экоустойчивым и возобновляемым материалам – таким, которые получают из природных источников, способных естественным образом восстанавливаться, либо которые могут быть переработаны и использованы повторно [4].

Возобновляемые материалы – это материалы, получаемые из природных источников, способных восстанавливаться в течение относительно короткого времени. Перерабатываемые строительные материалы – это те, которые могут быть собраны, обработаны и повторно использованы после завершения их первоначального жизненного цикла [4]. Оба подхода являются ключевыми инструментами перехода к экономике замкнутого цикла и позволяют существенно снизить нагрузку на природные ресурсы.

2. Нанокристаллическая целлюлоза как перспективное сырьё

Целлюлоза является основным компонентом лигноцеллюлозной биомассы растений и составляет приблизительно 40–45 % от массы древесины. На её основе получают нанокристаллическую целлюлозу (НКЦ) – материал с уникальными механическими, оптическими и барьерными свойствами [1].

Нанокристаллическая целлюлоза *(НКЦ)* – это высокоориентированные кристаллические фрагменты целлюлозы с поперечными размерами от 5 до 50 нм и длиной от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, получаемые кислотным гидролизом аморфных областей целлюлозных волокон.

Поясним основные параметры: поперечный размер определяет удельную площадь поверхности материала и его реакционную способность; кристалличность влияет на механическую прочность и прозрачность получаемых нанокомпозитов. НКЦ находит применение в энергетических устройствах, электронике, биомедицинских изделиях [1].

Одним из главных недостатков производства нанокристаллической целлюлозы являются трудности экономически выгодного возврата кислот, использованных в процессе гидролиза [1]. Тем не менее перспективы применения данного материала весьма широки: он может использоваться как армирующий наполнитель для биоразлагаемых полимерных матриц, в барьерных плёнках для упаковки, а также в фотонных и сенсорных устройствах.

3. Упрочнённая древесина

Традиционная древесина является возобновляемым строительным материалом, однако обладает относительно невысокой твёрдостью по сравнению с металлами. Современные технологии позволяют путём химической обработки и горячего прессования превращать природную древесину в упрочнённую древесину (УД) с кратным увеличением механических характеристик [1].

Процесс получения УД включает несколько стадий: химическую обработку для частичного удаления лигнина, холодное прессование с одновременной горячей сушкой, а также пропитку маслом для стабилизации структуры. В результате число Бринелля у упрочнённой древесины достигает 31,21 по сравнению с 1,32 у натуральной бассвудовой древесины, что соответствует увеличению твёрдости в 23 раза [1].

Твёрдость по Бринеллю *(HB)* определяется по формуле:

$$HB = 2F / (\pi D(D - \sqrt{(D^2 - d^2)})), \quad (1)$$

где *F* – прилагаемая нагрузка (Н); *D* – диаметр шарика-индентора (мм); *d* – диаметр отпечатка (мм).

Таким образом, большее значение НВ означает более высокое сопротивление материала пластической деформации.

УД обладает исключительными механическими свойствами и, в отличие от металлов, не подвержена коррозии. Гвозди из упрочнённой древесины по несущей способности сопоставимы со стальными гвоздями аналогичного размера, при этом превосходят их по показателям устойчивости к ржавлению, возобновляемости и лёгкости [1]. Это открывает широкие перспективы для замены металлических крепёжных элементов в строительстве и мебельной промышленности.

4. Биоклеи на основе возобновляемого сырья

Синтетические адгезивы на нефтяной основе широко применяются в промышленности, однако оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Перспективным направлением является разработка биоклеев – адгезивных материалов из возобновляемых источников [1].

Ключевые строительные блоки для создания биоклеев включают три группы компонентов [1]:

– растительные масла, придающие адгезиву гидрофобность и улучшающие влагостойкость конечного материала;

– биополимеры (белки, полисахариды, лигнин и др.), обеспечивающие адгезионные и когезионные свойства;

– мономеры, например итаконовая кислота, используемые для синтеза биоразлагаемых полимерных связующих.

Данные компоненты могут улучшать характеристики адгезивов на нефтяной основе или полностью заменять их. Особое место среди биополимеров занимает лигнин – природный ароматический полимер, обладающий высокой реакционной способностью и потенциалом в качестве основы для термореактивных связующих [1].

5. Водорослевые электрохимические накопители энергии

Водоросли представляют собой доступное, дешёвое и экологически безопасное возобновляемое сырьё. Показательным направлением их использования является создание электрохимических накопителей энергии (ЭНЭ) [1].

Четыре основных компонента устройств ЭНЭ – электрод, связующее, электролит и мембрана – могут быть получены из водорослей или материалов на их основе. Так, карбонизация морских водорослей при высоких температурах позволяет получать пористые углеродные электродные материалы с развитой удельной поверхностью [1].

Удельная ёмкость суперконденсатора определяется выражением:

$$C = I \cdot \Delta t / (m \cdot \Delta V), \quad (2)$$

где *I* – ток разряда (А); *Δt* – время разряда (с); *m* – масса активного материала электрода (г); *ΔV* – рабочий диапазон напряжений (В). Таким образом, высокая удельная ёмкость достигается при развитой поверхности электрода, что обеспечивается пористой структурой карбонизованных водорослей.

Помимо электродов, из водорослей на основе полисахарида агара и каррагинана получают гелевые электролиты и разделительные мембраны. Применение водорослей в ЭНЭ позволяет создавать устройства с низкими материальными затратами и минимальным экологическим следом [1].

6. Биопластики и биополимеры

Пластик является одним из наиболее востребованных материалов на планете. Его производство к 2020 году превысило 367 млн тонн в год, однако накопление пластиковых отходов в окружающей среде стало серьёзной экологической проблемой [1, 5].

Биопластики классифицируют по двум ключевым критериям: по типу исходного сырья (возобновляемое или ископаемое) и по способности к биоразложению [5]. Согласно данной классификации выделяют четыре группы:

1. Небиоразлагаемые пластики из ископаемого сырья (традиционные полимеры: ПЭ, ПП, ПВХ и др.);
2. Биоразлагаемые пластики из ископаемого сырья (полибутираты PBAT, Полибутиленсукцинаты PBS, поливиниловый спирт PVAL и др.);
3. Небиоразлагаемые пластики на основе природного сырья (биополиэтилен, биоПВХ);
4. Биоразлагаемые пластики из природного сырья (крахмальные биополимеры группы 4а, PHA группы 4б, PLA группы 4в) [5].

Биоразложение – это вызванный биологической деятельностью процесс изменения химической структуры материала, приводящий к получению натуральных конечных продуктов обмена веществ [5]. Различают два вида биоразложения: аэробное разложение (компостирование), при котором продуктами являются CO_2, вода и биомасса, и анаэробное разложение (биогазификация), дающее метан, воду и биомассу [5].

Необходимо учитывать, что конкретные условия, требуемые для биодеградации биопластиков (температура, pH, влажность), не всегда достижимы на обычных полигонах твёрдых бытовых отходов [1]. Это обусловливает необходимость создания специализированных установок для компостирования биополимерных изделий.

Среди природных полисахаридов наибольшее распространение в производстве биоразлагаемой упаковки получили крахмал, хитозан и целлюлоза. Вспененные материалы на основе крахмала применяют в качестве звукоизолирующей упаковки; плёнки на основе хитозана используются в пищевой промышленности как защитные покрытия [5].

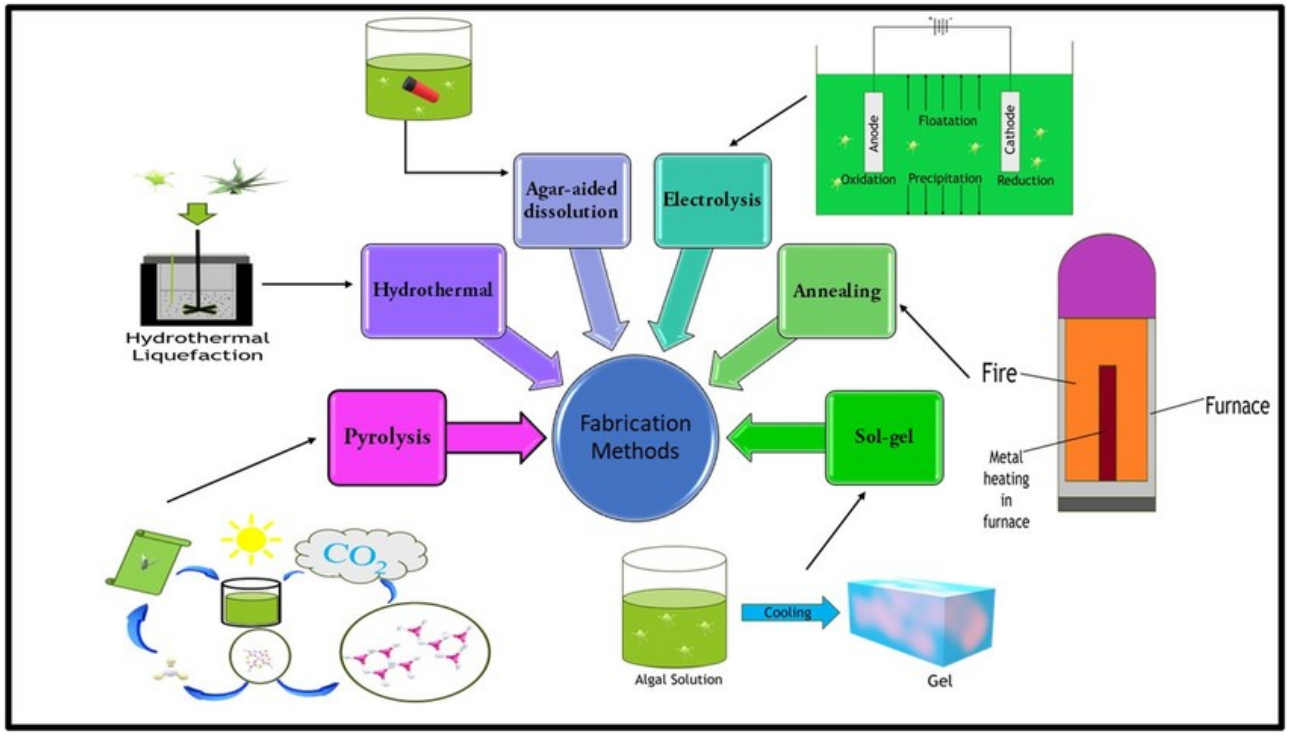


Рисунок 1 – Методы фабрикации компонентов батарей на основе водорослей [7].

7. Экологически чистые строительные материалы

Использование возобновляемых и перерабатываемых материалов в строительстве приобретает всё большую актуальность. К возобновляемым строительным материалам относятся восстановленная древесина, бамбук, растительные волокна [4].

К числу важнейших преимуществ возобновляемых строительных материалов относятся [4]:

– Экологическая устойчивость – снижение нагрузки на истощаемые ресурсы;

– Сниженный углеродный след – при рациональном лесопользовании выбросы CO_2 минимизируются;

– Биологическая разложимость – после окончания срока службы материалы разлагаются естественным образом;

– Эстетические и теплоизоляционные свойства (особенно характерно для древесины).

Вместе с тем возобновляемые материалы имеют ряд ограничений: некоторые из них, например бамбук и солома, обладают меньшей механической прочностью и жёсткостью, чувствительны к влаге и перепадам температур, требуют специальной обработки [4].

Перерабатываемые строительные материалы – металлические изделия (сталь, алюминий), стекло, бетон – позволяют создавать экономику замкнутого цикла. Переработка требует меньше энергии и затрат, чем первичное производство, и существенно сокращает количество отходов [4]. Особенно показательна практика Японии, где практически полностью перерабатываются строительные отходы.

Экологически чистые строительные материалы нового поколения включают: пенобетон с превосходными теплоизоляционными характеристиками, биодинамический бетон, поглощающий вредные вещества из воздуха, самовосстанавливающийся цемент с бактериями-продуцентами известняка, арболит на основе опилок и цемента [6]. Помимо этого, перспективным направлением являются экологически чистые отделочные материалы: известь, обладающая природными антисептическими свойствами, паропроницаемая и препятствующая развитию патогенной микрофлоры в жилых помещениях [7].

8. Новые экологически чистые строительные материалы на основе кожевенных отходов

Проблема нехватки традиционных сырьевых ресурсов для строительных материалов обусловила необходимость использования многочисленных отходов производства. Одним из перспективных направлений является создание строительных материалов с использованием кожевенной стружки в качестве наполнителя и фосфогипса в качестве связующего [2].

Разработанная серия теплоизоляционных материалов имеет коэффициент теплопроводности λ = 0,07…0,085 Вт/(м·К) и объёмную массу γ = 200…250 кг/м³, что позволяет применять их для утепления чердачных перекрытий [2].

Коэффициент теплопроводности λ характеризует способность материала передавать тепло. Чем меньше λ, тем лучше теплоизоляционные свойства материала. Для сравнения: у минеральной ваты $\lambda \approx$ 0,035–0,050 Вт/(м·К), у пенобетона – 0,10–0,14 Вт/(м·К).

Декоративно-акустические плиты на основе кожевенных отходов и гипсового связующего обладают следующими характеристиками: объёмная масса 350…600 кг/м³, предел прочности при сжатии 15…32 МПа, предел прочности при изгибе 5…10 МПа, коэффициент теплопроводности 0,08…0,13 Вт/(м·К), отсутствие самостоятельного горения [2].

Санитарно-химическая оценка разработанных материалов показала, что показатель суммарной токсичности $T\sum$ не превышает единицы, что свидетельствует об их пригодности для использования в жилых и производственных зданиях [2].

9. Заключение

Проведённый анализ показывает, что возобновляемые и экоустойчивые материалы представляют собой одно из наиболее перспективных направлений современного материаловедения и строительной индустрии. Использование растительной биомассы – целлюлозы, лигнина, крахмала, водорослей – открывает возможности для создания широкого спектра материалов с заданными свойствами [1].

Упрочнённая древесина, биоклеи, водорослевые электрохимические накопители и биопластики демонстрируют конкурентоспособные характеристики при значительно меньшем экологическом следе по сравнению с традиционными аналогами [1, 5]. Вместе с тем полноценное экологически чистое производство в крупных масштабах пока не реализовано, а создание специализированных объектов для утилизации биопластиков требует решения ряда организационных и технологических задач [1, 4].

Комплексный подход к применению возобновляемых материалов, включая повторное использование отходов производства (кожевенная стружка, фосфогипс), позволяет не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и создать экономически эффективные строительные материалы с требуемыми физико-механическими и санитарно-гигиеническими характеристиками [2].

Список использованных источников:

1. Renewable materials / Мороз К.К. [и др.]. – Презентация студентов 2 курса 8 группы БНТУ, 2024.

2. Воробьев Ю.В. Новые экологически чистые строительные материалы / Ю.В. Воробьев, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов // Вестник ТГУ. – 1997. – Т.2, вып.1. – С. 83–87.

3. Современные материалы: многофункциональные материалы, возобновляемые материалы (биоматериалы), пластика и керамика как альтернатива металлам. – Презентация БНТУ, 2024.

4. Езерская Д.Д. Использование возобновляемых и перерабатываемых материалов в строительстве / Д.Д. Езерская; науч. рук. Л.М. Слепнёва // Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2025. – С. 96–99.

5. Мазитова А.К. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть II / А.К. Мазитова, Г.К. Аминова, И.И. Зарипов, И.Н. Вихарева // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 32–38. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-1-32-38.

6. Бабакаева К.Е. Использование экологически чистых материалов в строительстве / К.Е. Бабакаева, Г.А. Кровяков; науч. рук. Н.В. Гилязидинова // XVI Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных «Россия Молодая». – Кемерово, 2024. – 063207.

7. Algae-based Electrochemical Energy Storage devices / A. Ehsani [et al.] // ResearchGate, 2020. – Vol. 22, iss. 23. – P. 8062–8096

UDC 620.22

SUSTAINABLE AND RENEWABLE MATERIALS

Korniyenko N.A., Timofeyuk D.K., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Doroshevich I.L. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This article examines sustainable and renewable materials, their classification, properties, and application prospects. It analyzes nanocrystalline cellulose, densified wood, bio-adhesives, algal electrochemical energy storage devices, bioplastics and biodegradable polymers, as well as eco-friendly building materials. A conclusion is drawn regarding the relevance of transitioning to renewable and recyclable materials in the context of sustainable development.

Keywords. Renewable materials, sustainability, bioplastics, nanocrystalline cellulose, densified wood, biodegradable polymers, bio-adhesives, algae, recycling, building materials.

УДК 537.622:004.083.72

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Кужель Д.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники , г. Минск, Республика Беларусь

Григорьев А.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе исследованы физические механизмы, лежащие в основе технологий магнитной записи и считывания информации. Рассмотрена природа ферромагнетизма на уровне доменной структуры вещества, проанализированы закономерности перемагничивания и явление гистерезиса. Описана конструкция комбинированной магнитной головки с раздельными индукционным элементом записи и магниторезистивным элементом считывания. Выполнено сравнение продольного и перпендикулярного методов записи, показаны физические ограничения плотности хранения данных и пути их преодоления.

Ключевые слова. Магнитная запись, ферромагнетизм, доменная структура, петля гистерезиса, коэрцитивная сила, магнитная головка, TMR, продольная запись, перпендикулярная запись, суперпарамагнитный предел, HAMR.

1. Физическая природа ферромагнетизма и доменная структура

Способность вещества намагничиваться и сохранять намагниченность определяется его электронным строением. Ферромагнитные материалы — железо, никель, кобальт и их сплавы — обладают незаполненными внутренними d-оболочками атомов, в которых спины значительной части электронов не скомпенсированы. Это придаёт каждому атому результирующий магнитный момент. Квантово-механическое обменное взаимодействие между соседними атомами выравнивает их моменты параллельно, что при температуре ниже точки Кюри приводит к самопроизвольному намагничиванию — ферромагнетизму [1].

В реальном образце самопроизвольная намагниченность существует лишь в пределах малых областей — доменов. Между соседними доменами расположены переходные слои — стенки Блоха, в которых ориентация магнитных моментов постепенно поворачивается от одного направления к другому. Доменная структура формируется вследствие конкуренции обменной энергии, магнитостатической энергии размагничивающего поля и энергии кристаллографической анизотропии. В отсутствие внешнего поля домены ориентированы хаотично и суммарный магнитный момент образца близок к нулю; при воздействии поля H домены начинают ориентироваться по полю, как показано на рисунке 1 [1, 2].

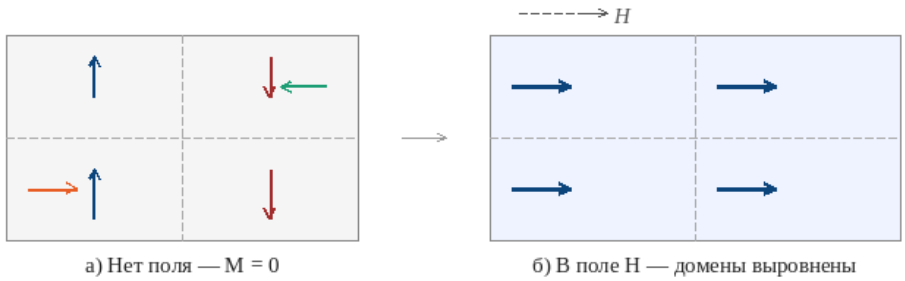


Рисунок 1 – Доменная структура ферромагнетика: а) без внешнего поля, суммарный момент M = 0; б) в поле H, домены ориентированы по полю

Процесс намагничивания ферромагнетика последовательно проходит три стадии. При слабых полях происходит обратимое смещение стенок Блоха: домены, ориентированные близко к направлению поля, растут за счёт соседних, и после снятия поля стенки возвращаются в исходное положение. При более сильных полях смещение стенок становится необратимым — стенки преодолевают локальные барьеры (дефекты решётки) скачкообразно; эти резкие скачки намагниченности называются скачками Баркгаузена. Наконец, при высоких напряжённостях поля происходит поворот вектора намагниченности доменов непосредственно вдоль поля — наступает техническое насыщение M□. После снятия поля образец сохраняет остаточную намагниченность M_r — физическую основу хранения записанной информации.

2. Гистерезис и характеристики носителей магнитной записи

Несовпадение кривых намагничивания и размагничивания ферромагнетика образует петлю гистерезиса (рисунок 2). Её форма количественно характеризует магнитные свойства материала и определяет его пригодность для применения в магнитной записи. Площадь петли пропорциональна удельным потерям энергии на перемагничивание за один цикл [1, 3]:

$$W = \oint H\, dB, \tag{1}$$

где W — удельная энергия потерь за цикл перемагничивания [Дж/м³]; H — напряжённость поля [А/м]; B — магнитная индукция [Тл]; интеграл берётся по замкнутому контуру петли гистерезиса.

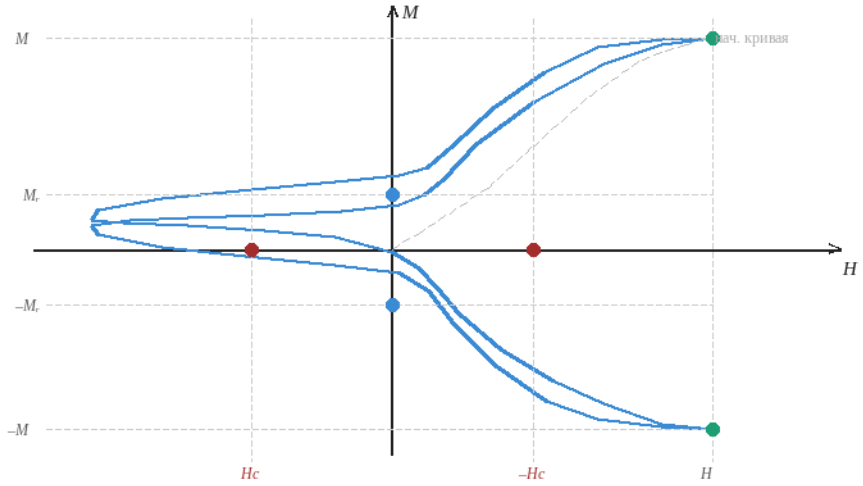


Рисунок 2 – Петля гистерезиса: M⍰ — намагниченность насыщения; M_r — остаточная намагниченность; Hc — коэрцитивная сила

Ключевыми параметрами носителя записи являются коэрцитивная сила Hc и остаточная намагниченность M_r. Коэрцитивная сила определяет устойчивость записанной информации к случайным внешним полям и тепловым флуктуациям. Для носителей на основе технологии перпендикулярной записи (PMR) значение Hc составляет порядка 400–800 кА/м; для перспективных высокоанизотропных материалов типа FePt и SmCo, предназначенных для HAMR-дисков, коэрцитивность может быть на порядок выше. Для материалов сердечников магнитных головок предъявляются противоположные требования: малая Hc и высокая начальная магнитная проницаемость μ. Этим условиям удовлетворяют мягкомагнитные сплавы — пермаллой ($Ni_{80}Fe_{20}$) и аморфные металлические стёкла [3, 4].

3. Принцип работы магнитной головки

Современная магнитная головка является комбинированной: функции записи и считывания выполняются физически раздельными элементами, объединёнными в одном корпусе, как показано на рисунке 3. В дисках с продольной записью применялась кольцевая индукционная головка; в PMR-дисках используется монополюсная головка записи, поле которой замыкается через мягкий подслой носителя. При пропускании тока через обмотку поле в зазоре намагничивает участок носителя; полярность тока определяет бит «0» или «1».

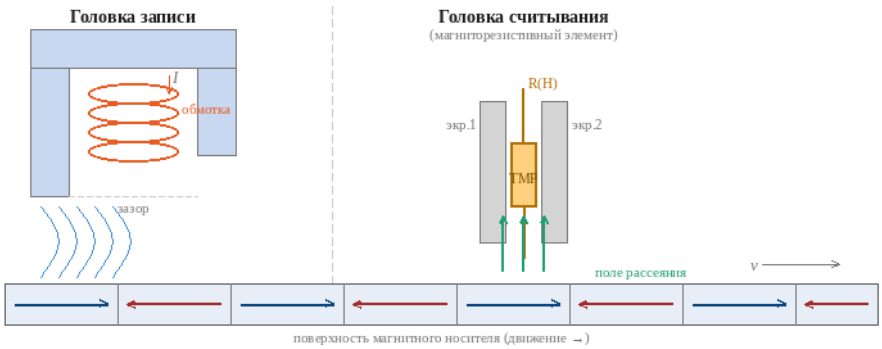


Рисунок 3 – Схема комбинированной магнитной головки: индукционный элемент записи (слева) и TMR-элемент считывания (справа)

Считывание выполняется отдельным элементом на основе туннельного магнетосопротивления (TMP — Tunneling Magnetoresistance), расположенным между двумя экранирующими магнитными слоями. Поле рассеяния от намагниченных участков носителя изменяет взаимную ориентацию магнитных слоёв TMP-перехода и тем самым его электрическое сопротивление: R минимально при параллельной ориентации слоёв и максимально — при антипараллельной. Отношение ΔR/R для коммерческих TMP-головок составляет 50–100%, что значительно превышает показатели предшествующих ГМР-элементов и обеспечивает надёжное считывание при высокой плотности записи [4]. Связь ЭДС индукционного элемента записи с параметрами магнитного тракта определяется законом электромагнитной индукции:

$$\varepsilon = -N \cdot d\Phi/dt = -N \cdot S \cdot dB/dt, \quad (2)$$

где N — число витков обмотки; S — площадь поперечного сечения сердечника; dB/dt — скорость изменения индукции. Выражение справедливо при условии однородности поля в сердечнике.

4. Методы магнитной записи и физические ограничения плотности

При продольной записи (LMR) вектор намагниченности домена ориентирован параллельно поверхности носителя. К середине 2000-х годов этот метод достиг предела около 100–150 Гбит/дюйм², после чего был вытеснен технологией перпендикулярной записи (PMR). При PMR домены ориентированы поперёк плоскости носителя, а под рабочим слоем располагается мягкомагнитный подслой, замыкающий силовые линии поля монополюсной головки. Это позволяет применять материалы носителя с высокой константой магнитной анизотропии K_a при меньшем размагничивающем поле, что одновременно повышает тепловую устойчивость доменов и плотность записи. К 2024 году коммерческие PMR-диски достигли плотности 1,5–2 Тбит/дюйм². Принципиальное отличие методов показано на рисунке 4 [5].

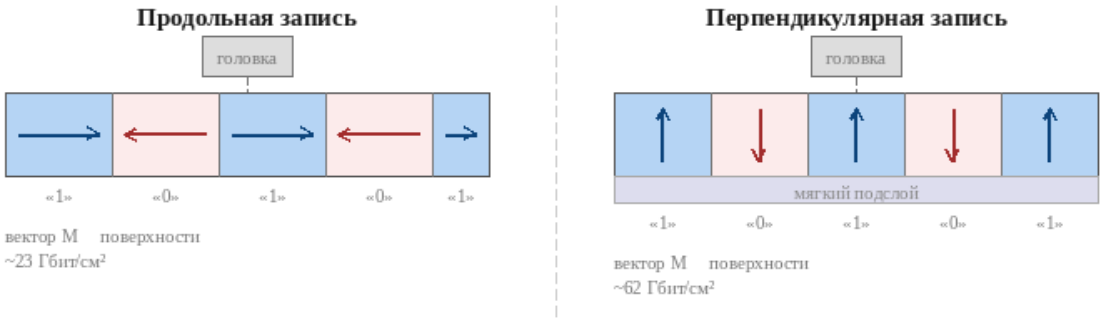


Рисунок 4 – Продольная (LMR, слева) и перпендикулярная (PMR, справа) магнитная запись

Фундаментальным ограничением обоих методов является суперпарамагнитный предел. При уменьшении объёма домена V его тепловая стабильность характеризуется отношением энергии магнитной анизотропии к тепловой энергии. Для надёжного хранения данных в течение ~10 лет необходимо выполнение условия [1, 3]:

$$K_aV / kT \geq 60–80 \quad \textit{(критерий долговременной стабильности записи)}, \quad (3)$$

где K_a — константа магнитной анизотропии [Дж/м³]; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура [К]. Точное время хранения τ оценивается по формуле Аррениуса–Нееля: $\tau = \tau_0 \cdot \exp(K_aV/kT)$, где $\tau_0 \approx 10^{-9} \ldots 10^{-10}$ с — характерное время попытки перемагничивания.

Для преодоления суперпарамагнитного предела разрабатывается ряд технологий. В термически-активированной записи (HAMR — Heat-Assisted Magnetic Recording) рабочий слой локально нагревается лазером вблизи точки Кюри, где Hc резко падает и головка может перемагничивать домены высокоанизотропного материала (FePt, $K_a \sim 7 \cdot 10^6$ Дж/м³). После быстрого охлаждения высокая K_a восстанавливается, обеспечивая долговременную стабильность записи при малых размерах доменов. В микроволновой записи (MAMR — Microwave-Assisted Magnetic Recording) высокочастотное переменное поле (~20–40 ГГц) снижает пороговое поле перемагничивания за счёт ферромагнитного резонанса. В битово-паттернированных носителях (BPM — Bit-Patterned Media) рабочий слой заменяется массивом физически изолированных магнитных островков, каждый из которых хранит ровно один бит, что исключает паразитное взаимодействие между соседними ячейками [5].

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики основных методов записи.

Таблица 1 – Сравнение методов магнитной записи на жёстких дисках [3, 5]

Параметр	Продольная (LMR)	Перпендикулярная (PMR)
Ориентация намагниченности	Параллельно плоскости носителя	Перпендикулярно плоскости носителя
Макс. плотность записи	~100–150 Гбит/дюйм²	1,5–2 Тбит/дюйм²
Мягкий подслой	Не требуется	Обязателен
Тепловая устойчивость	Низкая при малых доменах	Выше: меньшее размагничивающее поле позволяет использовать материалы с высокой K_a
Тип головки записи	Кольцевая индукционная	Монополюсная индукционная
Тип головки считывания	MR / GMR	TMR (ΔR/R = 50–100%)

Заключение

Магнитная запись информации основана на совокупности физических явлений: обменном взаимодействии, формировании доменной структуры, гистерезисе и электромагнитной индукции. Переход от продольной к перпендикулярной записи обеспечил рост плотности хранения более чем на порядок — с ~100 до ~2000 Гбит/дюйм². Дальнейшее развитие технологий — HAMR (нагрев носителя вблизи точки Кюри), MAMR (ферромагнитный резонанс) и BPM (физически изолированные магнитные островки) — направлено на преодоление суперпарамагнитного предела при сохранении долговременной надёжности хранения данных.

Список использованных источников:

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1984. – 208 с.

2. Белозёров Д.П. Физика магнитных явлений: учеб. пособие / Д.П. Белозёров, В.В. Ковалёв. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 264 с.

3. Ефимова А.И. Магнитные материалы и их применение / А.И. Ефимова, Л.А. Хейфец. – М.: Энергия, 1980. – 184 с.

4. Носов Ю.Р. Магниторезистивные датчики и головки считывания // Электроника. – 2005. – № 3. – С. 28–34.

5. Осипов В.В. Перпендикулярная магнитная запись: физические принципы и перспективы / В.В. Осипов, М.Н. Рябин // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 6. – С. 672–680.

UDC 537.622:004.083.72

PHYSICAL PRINCIPLES OF MAGNETIC RECORDING AND READING OF INFORMATION

Kuzhel D.A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Grigoriev A.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. The paper investigates the physical mechanisms underlying magnetic recording and data retrieval technologies. The nature of ferromagnetism at the domain-structure level is examined, and the three-stage magnetisation process — reversible domain-wall displacement, irreversible Barkhausen jumps, and domain rotation — is described. The combined read/write head design is presented, with a separate inductive write element and a TMR read element. A comparison of longitudinal (LMR) and perpendicular (PMR) recording is performed, the superparamagnetic stability criterion is derived, and approaches to overcoming it — HAMR, MAMR, and BPM — are outlined.

Keywords. Magnetic recording, ferromagnetism, domain structure, hysteresis loop, coercive force, magnetic head, TMR, longitudinal recording, perpendicular recording, superparamagnetic limit, HAMR.

УДК 004.93'12

ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Лобович А.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чаевский В.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной статье рассматривается процесс создания цифровых двойников. Анализируются этапы разработки цифровой модели, включая создание виртуального прототипа, сбор и обработку данных с сенсоров, интеграцию аналитических инструментов и машинного обучения, моделирования и симуляцию процессов, а также организацию обратной связи. Особое внимание уделено архитектуре цифровых двойников, их агрегации с облачными платформами и технологиями искусственного интеллекта.

Ключевые слова. Цифровой двойник, виртуальный прототип, моделирование, симуляция, обратная связь, облачные платформы, мониторинг, оптимизация процессов.

1. Введение

Известно, что цифровой двойник – это цифровая модель предполагаемого или фактического физического продукта, системы или процесса из реального мира, которая служит его цифровым аналогом для таких целей, как моделирование, интеграция, тестирование, мониторинг и техническое обслуживание [1]. Простыми словами, цифровой двойник — это «цифровой» «двойник» существующего физического объекта. Цифровой двойник был впервые представлен Гривзом [2]. Хотя буквальное значение цифрового двойника на первый взгляд кажется простым, определение цифрового двойника является предметом дискуссий и эволюции [2]. тремя компонентами: цифровой (виртуальной частью), реальным физическим продуктом и связью между ними. Однако другие авторы, например, такие как Тао и др. [3], расширили эту концепцию до пяти компонентов, включив данные и услуги в состав цифрового двойника, и определяют VV&A (верификация, валидация и аккредитация) как компоненты цифрового двойника, заявляя, что «цифровые двойники характеризуются бесшовной интеграцией между киберпространством и физическим пространством».

Процесс создания цифрового двойника является сложной и многоуровневой задачей, требующей интеграции различных технологий и подходов. В его основе лежит идея формирования цифровой модели, которая максимально точно воспроизводит характеристики и поведение реального объекта [4].

2. Этапы создания цифрового двойника

На начальном этапе создаётся виртуальный прототип объекта (рисунок 1).

Рисунок 1 – Этапы создания цифрового двойника

В соответствии с общепринятым определением и целями цифрового двойника, технологии цифрового двойника можно разделить на четыре функциональные области: технологии визуализации, технологии цифровизации, технологии динамического моделирования и технологии моделирования, специфичные для отдельных функций, как показано на рисунке 2. Эта классификация отражает последовательные этапы жизненного цикла цифрового двойника, начиная от интуитивно понятного представления и заканчивая точным цифровым преобразованием, воспроизведением поведения и, наконец, специализированным функциональным моделированием [5].

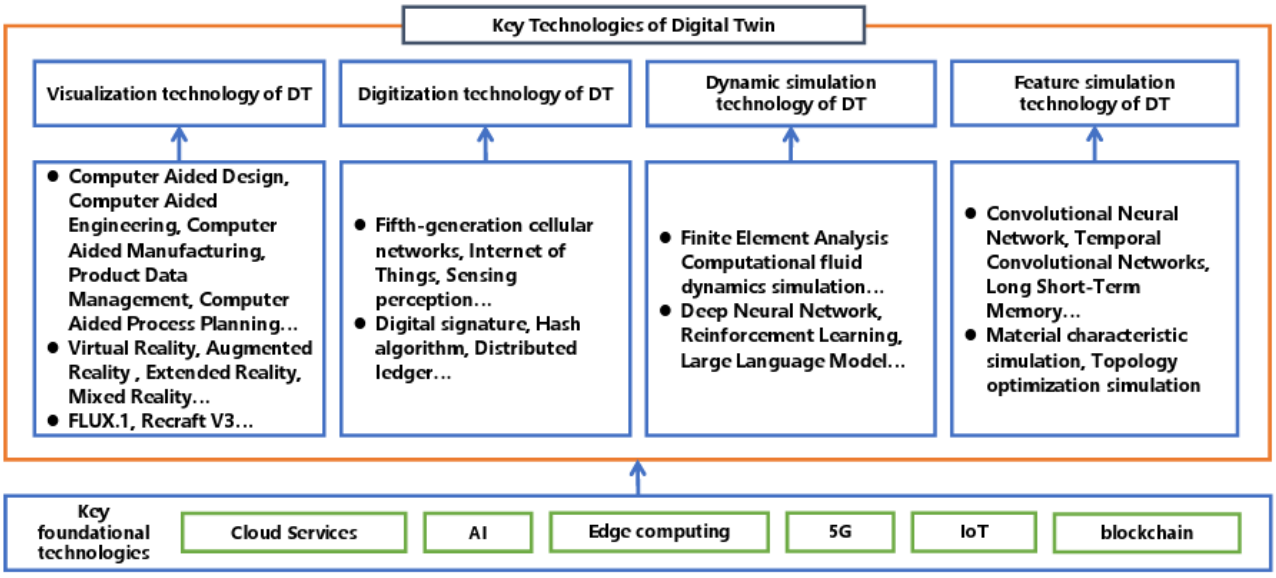


Рисунок 2 – Ключевые технологии цифровых двойников

Обычно для этого используются системы автоматизированного проектирования, позволяющие описать геометрию, структуру и основные физические свойства изделия. Такой прототип служит основой будущего цифрового двойника и позволяет проводить предварительное моделирование ещё до начала реального производства. В случае проектирования существующего физического объекта, такого как производственный цех или промышленное оборудование, процесс может начинаться с 3D-сканирования объекта или окружающей среды. Для получения точной геометрии объекта используются такие технологии, как LiDAR и сканирование структурированным светом, создавая детальное облако точек или сетку, которая служит основой для цифровой модели [6].

Следующий важный этап связан с организацией сбора данных. Для этого применяются различные сенсоры, датчики (вибрации, температуры, силы тока) и исполнительные устройства, подключённые к системе промышленного интернета вещей (IIoT). Например, данные с датчиков силы, температуры и вибрации могут использоваться для мониторинга процесса в реальном времени. Они фиксируют параметры работы оборудования, условия окружающей среды и характеристики технологических процессов. Полученные данные передаются в цифровую систему, где они обрабатываются и используются для обновления модели [7].

Ключевую роль в создании и функционировании цифрового двойника играет интеграция аналитических инструментов. Применение методов машинного обучения и нейронных сетей позволяет выявлять скрытые нелинейные закономерности в накопленных данных, строить точные прогнозы и адаптировать модель к постоянно изменяющимся условиям эксплуатации. Благодаря этому цифровой двойник эволюционирует и превращается из статической компьютерной копии в динамическую интеллектуальную систему, способную к самообучению на основе собственного опыта [8].

3. Архитектура и агрегация цифровых двойников

Рассчитанная архитектура цифрового двойника переносится на специализированные платформы – такие как Siemens или Dassault Systèmes, которые объединяют математические модели, данные и интерфейс управления в единую динамическую систему [9].

После создания базовой модели формируется так называемый цифровой экземпляр (Digital Twin Instance), который соответствует конкретному физическому объекту. После изготовления и ввода изделия в эксплуатацию его цифровой двойник продолжает собирать данные о производительности, часто называемые экземпляром цифрового двойника. Он постоянно получает данные из реального мира и синхронизируется с ним, обеспечивая двустороннюю связь между физической и виртуальной средой. Это позволяет не только наблюдать за состоянием объекта, но и управлять им на основе результатов моделирования [9].

В более сложных системах несколько цифровых двойников объединяются в единую сетевую структуру (Digital Twin Aggregate), что даёт возможность анализировать взаимодействие различных элементов. Агрегируя данные со всего парка активов – агрегат цифрового двойника – производители могут понять, как их продукция работает в различных реальных условиях. Это позволяет использовать полученные данные для оптимизации процессов и разработки будущих решений. Такая интеграция особенно важна для крупных производственных комплексов, где необходимо учитывать множество взаимосвязанных процессов. Отправной точкой в иерархии цифровых двойников служит прототип (DTP) – базовая

модель, позволяющая проверить проектные идеи и параметры производительности ещё до начала реального производства. С помощью CAD-систем создаётся виртуальная копия объекта, на которую накладываются оцифрованные данные с датчиков [8].

4. Моделирование, симуляция и обратная связь

Отдельного внимания заслуживает этап моделирования и симуляции. Виртуальная среда позволяет проводить эксперименты, которые в реальности были бы слишком дорогими или рискованными. Это даёт возможность оптимизировать параметры производства, тестировать новые решения и снижать вероятность ошибок ещё до их возникновения. При виртуальном вводе в эксплуатацию предлагаемой какой-либо производственной линии цифровой двойник может имитировать её работу для выявления узких мест, оптимизации компоновки оборудования и проверки логики автоматизации до установки какого-либо физического оборудования. Например, для процессов, таких как сварка, цифровой двойник может использоваться для планирования процесса путем моделирования распределения тепла и свойств материала предлагаемого сварного соединения [8].

Завершающим элементом является организация обратной связи (Closed-Loop Control). Цифровой двойник не только получает данные, но и может передавать управляющие воздействия обратно в физическую систему. Это позволяет автоматически корректировать работу оборудования и поддерживать оптимальные условия производства [8]. Процесс управления изменениями на основе динамического моделирования изображен на рисунке 3.

Рисунок 3 – Процесс управления изменениями на основе динамического моделирования

5. Интеграция с искусственным интеллектом и облачными платформами

Важным направлением развития цифровых двойников является их интеграция с технологиями искусственного интеллекта и облачных вычислений. Использование методов машинного обучения, включая нейронные сети, позволяет цифровым двойникам не только анализировать накопленные данные, но и выявлять сложные нелинейные зависимости, которые трудно обнаружить традиционными методами. Это даёт возможность строить более точные прогнозные модели и адаптировать поведение системы к изменяющимся условиям эксплуатации [7].

Кроме того, применение облачных платформ обеспечивает масштабируемость решений и доступ к вычислительным ресурсам, необходимым для обработки больших объёмов данных, поступающих с множества датчиков. Это особенно важно для крупных промышленных систем, где требуется одновременная обработка данных в режиме реального времени [8].

Современные тенденции показывают, что создание цифровых двойников всё чаще связано с использованием облачных технологий, распределённых вычислений и систем искусственного интеллекта. Это делает возможным обработку огромных массивов данных и создание высокоточных моделей даже для сложных объектов.

6. Заключение

Исследования в области технологии цифровых двойников привлекли значительные инвестиции и внимание из многих крупных регионов мира, что отражает растущую важность этой области в научных инновациях и промышленных приложениях. Согласно статистике распределения ведущих финансирующих организаций, внесших вклад в литературу по цифровой трансформации за последние два десятилетия, к концу 2024 года более 100 финансирующих учреждений по всему миру активно поддерживали исследования в области цифровой трансформации, как показано на рисунке 4.

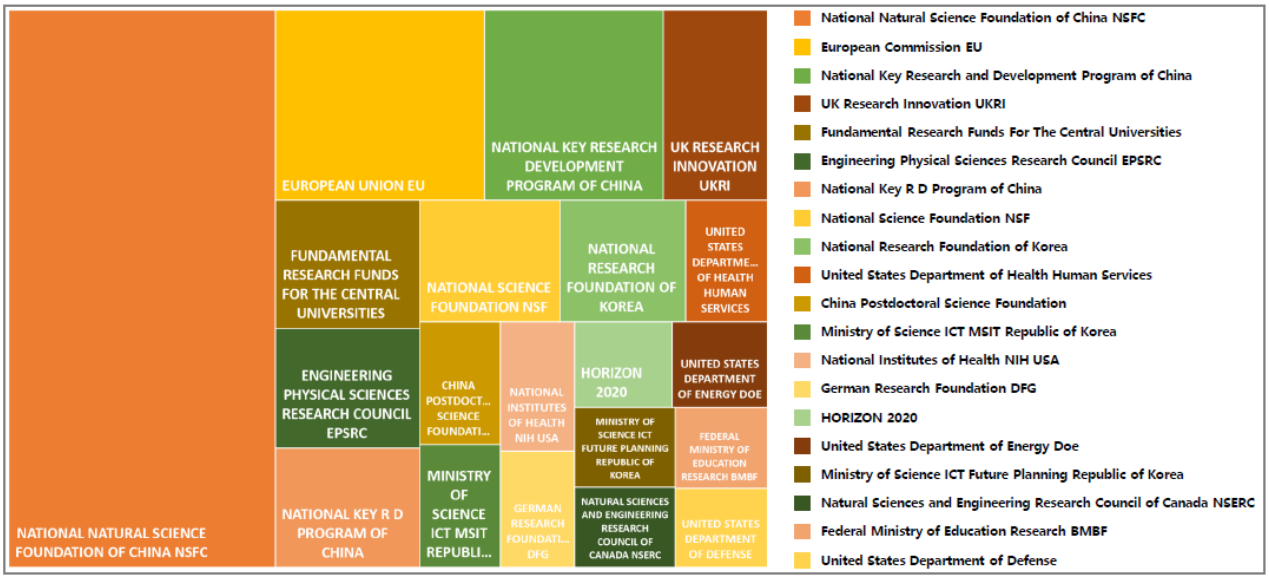


Рисунок 4 – Статистика финансирующих организаций в области литературы по цифровым двойникам

Среди них пятью ведущими организациями по объему поддержанных публикаций являются: Национальный фонд естественных наук Китая (35,14%), Европейская комиссия (9,42%), Национальная ключевая программа развития исследований Китая (8,04%), UK Research и Innovation (4,70%) и Фонд фундаментальных исследований центральных университетов (4,37%). Примечательно, что на долю ведущего учреждения приходится только на большую долю, чем совокупный вклад агентств, занимающих места со второго по седьмое. С точки зрения географического распределения, на Китай приходится наибольшая доля опубликованной литературы (39,86%), за ним следуют США (13,76%), Германия (10,53%) и Великобритания (8,07%).

Список использованных источников:

1. Angira Sharmaa, Edward Kosasihb, Jie Zhangb, Alexandra Brintrupb, Anisoara Calinescu Digital Twins: Digital Twins: State of the art theory andpractice, challenges, and open research questions. // Journal of Industrial Information Integration, 2022. – Vol. 30. – 100383

2.] M. Grieves. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication, white paper, in: Whitepaper / Florida Institute of Technology, 2015.

3. F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, F. Sui, Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 94 (9–12) (2018) 3563–3576.

4. Цифровой двойник: для чего нужен и как создается [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.linkedin.com/pulse/digital-twin-based-disaster-resilience-simulation-smart-reddy-ie1if?tl=ru – Дата доступа: 29.03.2026г

5. Digital Twin: A Literature Review of Concepts, Technologies and Applications Weljle YU, Guangu LIU, Ling ZHU and Wujia YU IEEE // Access, 2023, Vol 1. Pp. 1-24

6. Liu, Mangnan; Fang, Shuiliang; Dong, Huiyue; Xu, Cunzhi. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. Journal of Manufacturing Systems *– 2021. – С. 346–361.*

7. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger [et. al.] // IFAC-Papers On Line, 2018 – Vol. 51(11). – P. 1016–1022.

8. Lock, Oliver; Bednarz, Tomasz; Pettit, Christopher. "HoloCity – exploring the use of augmented reality cityscapes for collaborative understanding of high-volume urban sensor data". – 2019. – С. 1–2.

9. Digital Twin Technology in Built Environment: A Review of Applications, Capabilities and Challenges. Smart Cities */ Yalda Mousav [et. al.] // Smart Cities, 2024. – Vol. 7(5). – P. 2594–2615*

UDC 004.93'12

STAGES OF CREATING A DIGITAL TWIN

Lobovich A.A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Chayeuski V.V. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This article examines the process of creating digital twins. It analyzes the stages of digital model development, including virtual prototyping, sensor data collection and processing, integration of analytical tools and machine learning, process modeling and simulation, and feedback loop organization. Particular attention is paid to the architecture of digital twins and their integration with cloud platforms and artificial intelligence technologies.

Keywords. Digital twin, virtual prototype, modeling, simulation, feedback, cloud platforms, monitoring, process optimization.

УДК 621.039-027.31

СОВРЕМЕННЫЕ ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Богданович К.Д., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Данная работа посвящена анализу физических принципов и развитию безопасности современных ядерных энергетических установок, которые фокусируются на переход от III Поколения к IV Поколению реакторов ядерного деления. Изучены ключевые технологические достижения, такие как пассивные системы безопасности и быстрое спаривание электронов.

Ключевые слова. Ядерная физика, реакторы IV Поколения, реакторы на быстрых нейтронах, термоядерный синтез, токамак КТМ, институт Сосны, пассивная безопасность, критерий Лоусона.

Фундаментом современной ядерной энергетики является индуцированное деление тяжёлых ядер, преимущественно Урана-235. Когда ядро ^{235}U поглощает тепловой нейтрон, оно становится критически нестабильным и расщепляется на два более лёгких фрагмента деления, высвобождая энергию связи и дополнительные нейтроны:

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n + 200\ \text{МэВ}\ . \quad (1)$$

При поглощении нейтрона ядро переходит в возбуждённое состояние. Энергия связи присоединённого нейтрона передаётся нуклонам, вызывая интенсивные внутренние колебания. Общий энергетический выход одного акта деления составляет около 200 МэВ, что весьма много в масштабах микрочастиц. Но важно понимать, как именно распределяется энергия, так как это определяет конструкцию систем охлаждения реактора.

Среди выводимой энергии можно выделить несколько путей распределения ядерной энергии. Например, кинетическая энергия осколков деления бария, криптона и других атомных элементов, где выход энергии составляет приблизительно 167 МэВ. Именно они имеют большую массу и заряд, поэтому тормозятся в материале топлива на очень коротких расстояниях. Такая энергия преобразуется в тепло, разогревая тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) [6]. На оставшуюся энергию приходятся энергия мгновенных нейтронов, энергия мгновенного гамма-излучения и энергия радиоактивного распада.

Для того чтобы поддерживать контролируемую цепную реакцию, коэффициент разложения нейтронов k должен быть строго поддерживаться на значении $k = 1$. Математически это описывается формулой четырёх коэффициентов [1]:

$$k = \eta\varepsilon pf, \quad (2)$$

где η – коэффициент выхода нейтронов на одно поглощение, ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах, p – вероятность избежать резонансного захвата, а f – коэффициент использования тепловых нейтронов.

Математически управление реактором было бы невозможно, если бы все нейтроны вылетали в момент деления. Поскольку время жизни мгновенного деления составляет доли миллисекунды, человек или механизм не успели бы среагировать на малейшее отклонение k от единицы. Несмотря на такой опасный нюанс, стабильность обеспечивается запаздывающими нейтронами — нейтронами, которые испускаются продуктами деления спустя некоторое время в диапазоне от долей секунды до минуты. Это создаёт инерцию цепной реакции, позволяя плавно регулировать мощность с помощью стержней-поглотителей, содержащие бор или кадмий.

Оптимизация данных коэффициентов в современных энергетических установках неразрывно связана с понятием внутренней самозащищённости. В реакторах предыдущих поколений управление нейтронными потоками требовало активного вмешательство оператора или механизма. Однако в установках III+ Поколения и проектируемых системах IV Поколения физика активной зоны рассчитывается таким образом, чтобы при любом отклонении от нормы параметров коэффициент размножения k естественным образом стремился к значениям меньше единицы. Это достигается за счёт отрицательного температурного коэффициента реактивности и использования инновационных технологий. В наше время глобальный ядерный сектор стремится перейти от реакторов II/III Поколения к III и IV Поколению, так как современные физические модели позволяют с высокой точностью предсказывать поведение нуклидов в долгосрочной перспективе, что закладывает фундамент для создания замкнутого топливного цикла.

Переход от II Поколения к III Поколению, а также к усовершенствованному III+ Поколению, был продиктован необходимостью минимизировать последствия даже самых маловероятных аварий. Основным физическим принципом здесь стала детерминистическая безопасность — состояние, при котором тяжелая авария предотвращается не действиями персонала, а внутренней архитектурной установки. Если вспомнить формулу четырёх коэффициентов, то она тесно связана с обеспечением отрицательной обратной связи. Например, при росте температуры ядра ^{235}U начинают интенсивнее поглощать нейтроны в резонансной области энергий. Это приводит к мгновенному снижению реактивности — величины, определяющей отклонение цепной реакции деления от стационарного состояния — без внешнего вмешательства.

Если говорить про III Поколение, то такие реакторы опираются на системы пассивной безопасности. С точки зрения физики, они используют гравитацию, естественную циркуляцию и сжатый газ, чтобы охладить ядро реактора в случае полного отключения электричества, отводя остаточное тепло, определяемое формулой Уэя-Вигнера [1]:

$$P(t) = 6.48 * 10^{-3} * P_0 * [t^{-0.2} - (t + T_0)^{-0.2}], \quad (3)$$

где $P(t)$ – мощность остаточного тепловыделения в момент времени t после остановки реактора, P_0 – тепловая мощность реактора до его остановки, T_0 – время работы реактора на мощности P_0, t – время, прошедшее с момента остановки реактора.

Система пассивного отвода тепла представляет собой установленные над герметической оболочкой теплообменники. При потере электроснабжения естественная циркуляция воздуха или воды через эти теплообменники позволяет охлаждать активную зону на неограниченное время. Не обходят стороной и гидроаккумуляторы — ёмкости с раствором борной кислоты под давлением азота. Если давление в первом контуре падает ниже критического, борированная вода автоматически подаётся быстрой струей в реактор, охлаждая топливо и останавливая цепную реакцию.

Реакторы III+ Поколения, в отличие от III Поколения, ключевым и самым важным дополнением в безопасность системы стала ловушка расплава — специальная конусообразная чаша под корпусом реактора, заполненная жертвенным материалом, таких как смесь оксидов железа и алюминия. В случае гипотетического проплавления корпуса, ловушка принимает расплав топлива, перемешивает его с материалом-наполнителем для снижения удельного тепловыделения и распределяет его так, чтобы не допустить повторного возникновения критической ситуации [5]. Таким образом здание реактора защищено двойной защитной оболочкой. С одной стороны, внутренняя стальная оболочка обеспечивает герметичность, а с другой стороны, внешняя железобетонная оболочка способна выдержать внешние воздействия огромнейших сил, таких как падение коммерческого авиалайнера или ударную волну при техногенном взрыве поблизости.

Стоит учесть, что установки этого поколения продемонстрировали ряд усовершенствований в эффективности эксплуатации. Среди них можно выделить повышенный срок службы: с 30-40 лет до 60-80 лет в сравнении с предыдущими поколениями. Помимо этого, коэффициент использования установленной мощности достигает 90-92% благодаря оптимизации периодов перегрузки топлива, а использование инновационных топливных циклов позволяет извлекать из того же объёма урана значительно больше энергии, стремительно снижающее удельное количество радиоактивных отходов на киловатт-час.

Что касается реакторов IV Поколения, то они представляют собой смену парадигмы. Они работают на более высоких температурах, до тысячи градусов Цельсия, значительно увеличивая термодинамический коэффициент полезного действия цикла Карно. Если сравнивать реакторы предыдущего поколения, то ключевой технологией являются реакторы на быстрых нейтронах. В отличие от тепловых реакторов, реакторы на быстрых нейтронах не используют замедлитель. В них нет ни воды, ни графита. Нейтроны сохраняют колоссальную энергию, примерно 2 МэВ, полученную при делении. Но самое главное, что может представить IV поколение ядерных реакторов, — это воспроизводство. Они используют быстрые нейтроны для поддержания цепной реакции и могут воспроизводить больше делящегося материала, чем потребляют. Такой пример можно привести с превращением неделящегося изотопа ^{238}U в делящийся ^{239}Pu [3]:

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{94}Pu \quad (4)$$

Это таким образом позволяет увеличить энергетический потенциал природного урана в 75-90 раз, заранее решая проблему нехватки топлива на тысячелетия вперёд. Реакторы IV Поколения проектируются для работы при сверхвысоких температурах: 500-1000°C. Если вспомнить второй закон термодинамики, то термический коэффициент полезного действия цикла ограничен температурой нагревателя и холодильника:

$$\eta = 1 - \frac{T_н}{T_х}, \quad (5)$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД), $T_н$ – температура нагревателя, а T_x – температура холодильника.

Повышение температуры теплоносителя позволяет поднять КПД до 45-50% в сравнении с предыдущими поколениями. Такой ход делает атомную энергетику конкурентоспособной не только в производстве электричества, но и в высокотемпературной химии для, например, промышленного производства водорода.

IV Поколение атомных электростанций внедряет технологию трансмутации, где быстрые нейтроны способны аннигилировать наиболее опасные долгоживущие изотопы из отработанного топлива старых реакторов. В результате вместо хранения отходов в течение 100 000 лет, их радиоактивность падает до уровня природной руды за 300 лет, делая ядерную энергетику более экологически чистой и перспективной. Более того, такое поколение реакторов стремится к модульности. Если предыдущие поколения были ориентированы на гигантские стройки на десятилетия, то для данного поколения предлагается концепция малых модульных реакторов, которые можно собрать на заводе и доставить на место. Это снижает финансовые риски и увеличивает компактность, позволяя строить атомные электростанции в труднодоступных регионах [8]. Среди представителей IV Поколения наиболее яркие из них продемонстрированы в таблице 1.

Таблица 1 – Основные типы ядерных установок IV Поколения.

Тип реакторной установки	Теплоноситель	Спектр нейтронов	Температура на выходе, °C	Основное назначение и преимущества
Натриевый быстрый реактор (SFR)	Жидкий натрий	Быстрый	500-550	Замыкание топливного цикла, воспроизводство плутония, высокая теплопроводность
Свинцовый быстрый реактор (LFR)	Жидкий свинец	Быстрый	480-800	Естественная безопасность, радиационная защита, трансмутация отходов
Сверхвысокотемпературный газовый реактор (VHTR)	Гелий	Тепловой	700-1000	Производство водорода, высокотемпературное тепло для промышленности, высокий КПД
Жидкосолевой реактор (MSR)	Расплав солей	Тепловой / Быстрый	700-800	Топливо в растворе, отсутствие рисков воспламенения ТВЭЛов, онлайн-очистка от продуктов деления
Реактор на сверхкритической воде (SCWR)	Вода в сверхкритическом состоянии	Тепловой / Быстрый	510-625	Упрощенная конструкция, очень высокий термодинамичес-кий КПД
Газоохлаждаемый реактор (GFR)	Гелий	Быстрый	850	Сочетание преимуществ быстрого спектра и высокотемпера-турного газа

Необходимо учесть, что работа при температуре свыше 700°C требует создания новых жаропрочных сплавов и керамики, способных сохранять прочность под интенсивным нейтронным облучением. Использование свинца вместо натрия в свинцовом быстром реакторе повышает безопасность, поскольку свинец химически пассивен при контакте с воздухом, но при этом создаёт проблему коррозии стали, требующую ювелирного контроля содержания кислорода в контуре.

В качестве примера ядерной установки IV Поколения рассмотрим реактор на быстрых нейтронах, представленный на рисунке 1.

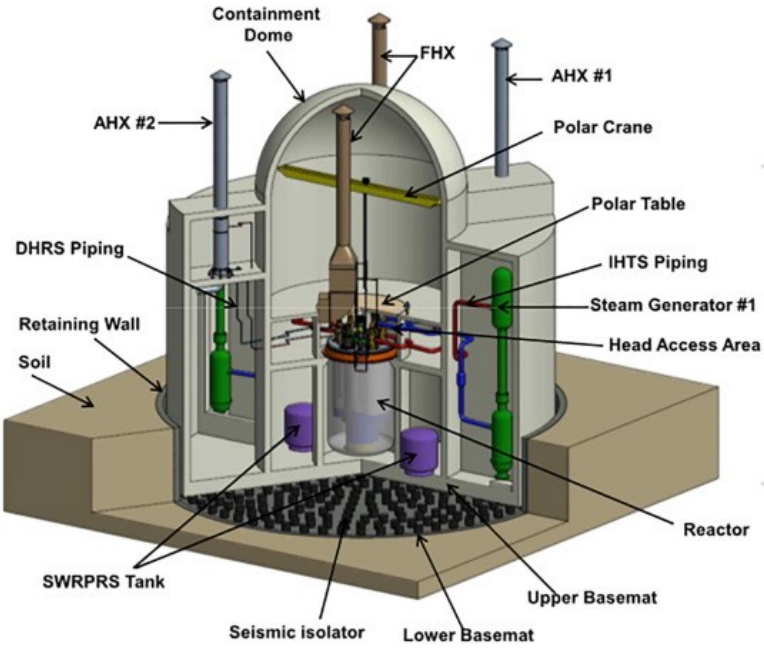


Рисунок 1 – Схема конструкции реактора на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением.

Ниже представлено описание компонентов данного реактора.

Реактор (Reactor) — центральный узел, содержащий активную зону. Если сравнивать тепловые реакторы, то здесь отсутствует замедлитель, позволяющий использовать энергию быстрых нейтронов для поддержки цепной реакции.

Система натриевого охлаждения (IHTS Piping) — установка, использующая жидкий натрий в качестве охладителя. Сам натрий обладает высокой теплопроводностью и позволяет работать при высоких температурах без создания избыточного давления, что повышает КПД цикла Карно.

Парогенератор (Steam Generator) — узел, где тепло от натриевого контура передаётся воде второго контура для образования пара, вращающего турбину.

Защитный купол (Containment Dome) — герметичный купол, предназначенный для удержания радиоактивных веществ внутри установки даже в случае аварии.

Системы пассивной безопасности (DHRS Piping, Fast Heat Exchanger (FXH), Air Heat Exchanger (AHX)) — трубопроводы и теплообменники системы пассивного отвода тепла. Они опираются на законы физики, такие как естественная циркуляция, позволяя охлаждать активную зону без участия насосов и электричества.

Сейсмические изоляторы (Seismic Isolator) — специальные опоры под фундаментной плитой (Upper Basemat, Lower Basemat), защищающие конструкцию реактора от разрушений при землетрясениях.

В активной зоне происходит деление тяжелых ядер быстрыми нейтронами. Параллельно с выделением энергии происходит трансмутация. Жидкий натрий циркулирует через реактор, поглощая энергию деления. Далее через систему трубопроводов тепло передаётся в парогенератор. Если основное питание отключается, вступают действия системы FHX и AHX, которые через естественную конвенцию отводят остаточное тепловыделение во внешнюю среду. Доступ к верхней части активной зоны осуществляется через зону обслуживания (Head Access Area) с помощью (Polar Crane), и это позволяет проводить перегрузку топлива и техническое обслуживание.

Если деление расщепляет тяжёлые атомы, термоядерный синтез вынужденно объединяет лёгкие ядра. Наиболее перспективной реакцией для генерации энергии является синтез дейтерия и трития:

$$ {}^{2}_{1}D + {}^{3}_{1}T \rightarrow {}^{4}_{2}He(3.5\ \text{МэВ}) + {}^{1}_{0}n + 3{}^{1}_{0}n(14.1\ \text{МэВ}) . \quad (6) $$

Чтобы термоядерный реактор производил только чистую энергию, плазма должна удовлетворять критерию Лоусона. Он предписывает, что произведение плотности плазмы n на время удержания энергии τ должно превышать определённый порог при заданной температуре T [7]:

$$ n\tau \geq \frac{12 k_B T}{<\sigma\upsilon>_{E_f}} , \quad (7) $$

где n – плотность плазмы, τ – время удержания энергии, T – температура плазмы, $<\sigma\upsilon>$ – скорость реакции, где σ – вероятность синтеза, а υ – относительная скорость частиц; а E_f – выход энергии.

Достижение этих условий требует удержания плазмы при температуре 150 миллионов градусов Цельсия с помощью мощных магнитных полей, также известные как токамаки. Критической проблемой современной физики является поиск таких материалов, которые способны выдержать интенсивную нейтронную бомбардировку энергией в 14.1 МэВ. Для этого в Казахстане, в городе Курчатов, была построена специализированная установка Казахстанский Токамак Материаловедческий (КТМ). Он обладает рядом конструкционных преимуществ, выделяющих её на фоне других установок. Среди них является подвижное приемное устройство, позволяющее оперативно заменять образцы испытуемых материалов без разгерметизации вакуумной камеры. Результаты исследований, полученные на КТМ, напрямую используются при проектировании международного экспериментального термоядерного реактора (ITER), выступая для него жизненно важной платформой. Напоследок, вакуумная система обеспечивает чистоту плазмы, необходимую для точного анализа взаимодействия ионов дейтерия с поверхностью твердых тел. КТМ позволяет физикам тестировать радиационную стойкость материалов первой стенки при тепловых нагрузках до 20 МВт/м2, выступая жизненно важной платформой для ITER [2].

Безопасное внедрение передовых ядерных технологий требует развитой научной инфраструктуры. В Республике Беларусь такую роль выполняет Объединённый институт энергетических и ядерных исследований – “Сосны” в Минске. Данный институт был основан ещё в советское время, раннее известный разработкой мобильных АЭС “Памир”, но в наше время он фокусируется на ряде направлений и экспериментов, занимаясь усовершенствованием безопасности реакторов и исследованием поведения нуклидов. К ним можно отнести научное сопровождение БелАЭС, где проводятся расчёты безопасности, нейтронно-физическое моделирование и анализ радиационной защиты для реакторов ВВЭР-1200 [4]. Одним из ключевых факторов исследований является радиоэкология, в которой изучаются пути миграции радионуклидов и разрабатываются матрицы для безопасной иммобилизации радиоактивных отходов.

Заключение. Современная атомная энергетика демонстрирует качественный скачок в области безопасности, реализуемый через внедрение систем пассивного отвода тепла и концепцию внутренней самозащищенности активной зоны. Будущее ядерной физики связано с внедрением реакторов IV Поколения с освоением реакторов на быстрых нейтронах, с замкнутым топливным циклом и коммерциализацией термоядерного синтеза. Достижение этих целей требует международного научно-технического сотрудничества, примером которого являются испытания на КТМ в Казахстане, работы сильных национальных научных центров, таких как институт “Сосны” в Беларуси, и много времени и терпения, так как внедрить все эти технологии будет возможно лишь спустя десятилетия, если не позже. Но именно таким образом интеграция этих достижений обеспечит создание надежной, экологичной и едва ли неисчерпаемой энергетической базы для всего человечества.

Список использованных источников:

1. Ламарш Дж. Р., Баратта Э. Дж. Введение в ядерную инженерию (2001, 3-е издание), С. 275-282, 340-345.

2. Скаков М. К. и др. Казахстанский токамак материаловедческий: статус и перспективы (2015) // Nuclear Fusion, Volume 55, Number 10, P. 3-5.

3. Пиоро И. Л. Справочник по ядерным реакторам IV Поколения (2016) // P. 35-62, 341-370.

4. Михалевич А. А. и др. Научно-техническое сопровождение развития ядерной энергетики в Республике Беларусь (2021) // Евразийский физический журнал, С.145-155.

5. Асмолов В. Г. Инновационные проекты АЭС с реакторами ВВЭР: от поколения III к поколению III+ // Атомная энергия (2017). — Т. 123, №6. С. 303-311.

6. Кириллов П. Л. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках: учебник для вузов // Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана (2010) — С. 120-135.

7. Ондар Ш. С. Основы управляемого термоядерного синтеза и физика плазмы // НИЯУ МИФИ (2012), С. 45-58.

8. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Технологии ядерных реакторов малой и средней мощности для ближайшего будущего // TECDOC-1485 (2016), 180 p.

UDC 621.039-027.31

MODERN NUCLEAR POWER PLANTS

Bogdanovich K.D., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. This work is devoted to physical principles analysis and security development of the modern nuclear power plants that focus on transition from III Generation to IV Generation nuclear fission reactors. Key technological achievements are studied, such as passive security systems and fast pairing of electrons.

Keywords. Nuclear physics, IV Generation reactors, fast neutron reactor, thermonuclear fusion, tokamak KTM, Sosny institute, passive security, Lawson criterion.

УДК 537.86:538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (ГРАФЕН, МЕТА-МАТЕРИАЛЫ, КОМПОЗИТЫ) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ-ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Жильский К.А., Жильский Н.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Храмович Е.М. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрено влияние графена, метаматериалов и композитов на характеристики СВЧ-датчиков влажности и диэлектрической проницаемости, проанализированы физические принципы их работы и показана возможность повышения чувствительности, точности и стабильности сенсоров за счёт применения современных материалов.

Ключевые слова. СВЧ-датчики, метаматериалы, оксид графена, композитные материалы, датчики влажности, диэлектрическая проницаемость, чувствительность сенсоров, локализация электромагнитного поля, резонансная частота.

Исключительно важными сегодня являются технологии, позволяющие быстро и точно неразрушающим методом определять физические характеристики веществ. К таким параметрам относится влажность и диэлектрическая проницаемость, которые широко используются при контроле качества материалов, мониторинге технологических процессов, а также в системах экологического и промышленного контроля. В этой связи особый интерес вызывают датчики, работающие в сверхвысокочастотном диапазоне, поскольку они позволяют регистрировать даже небольшие изменения свойств среды за счёт взаимодействия электромагнитного поля с контролируемым материалом.

Кроме того, такие датчики обладают высокой скоростью отклика, возможностью бесконтактного измерения и небольшой чувствительной зоной, что делает их востребованными в современных автоматизированных системах контроля, где особенно актуальным становится применение новых функциональных материалов, таких как *графен, метаматериалы и различные композитные структуры.*

Датчики на основе метаматериалов (ММ) представляют собой не что иное, как комбинацию различных материалов, таких как пластик, проводящие элементы и керамика, для создания периодической структуры, которая может возбуждаться с помощью электромагнитного поля. В своем простейшем виде датчик на основе ММ создается путем размещения диэлектрического материала между линией передачи и проводящим слоем (рисунок 1). Периодическая структура формируется методом травления проводящего слоя, что впоследствии способствует возникновению резонанса индуцированного тока на проводящей поверхности. Как правило, метаповерхность изготавливается путем нанесения плоского проводящего периодического рисунка на диэлектрическую подложку. В большинстве опубликованных исследований в качестве диэлектрической подложки использовался стеклотекстолит FR4 [1]. Однако в последнее время для достижения улучшенных характеристик применяются и различные другие диэлектрические подложки, такие как металлофталоцианины, подложки из оксидов металлов и прочие.

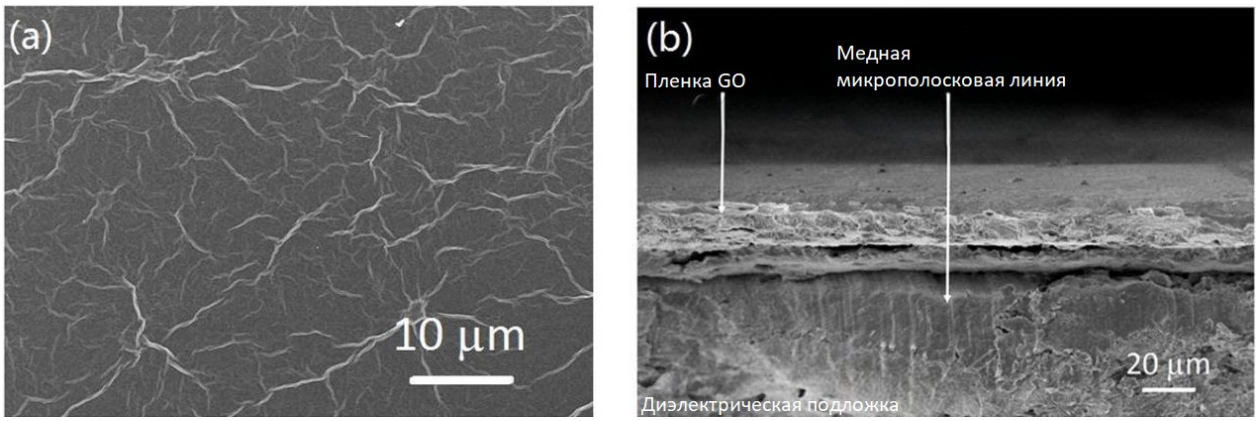


Рисунок 1 – Поперечное сечение сенсорной структуры

Для физической реализации такого управления в СВЧ-диапазоне применяются ММ. Двумя классическими топологиями, реализующими этот принцип, являются разрезные кольцевые резонаторы (SRR) и их аналоги (CSRR), электродинамические модели которых представлены на рисунке 2.

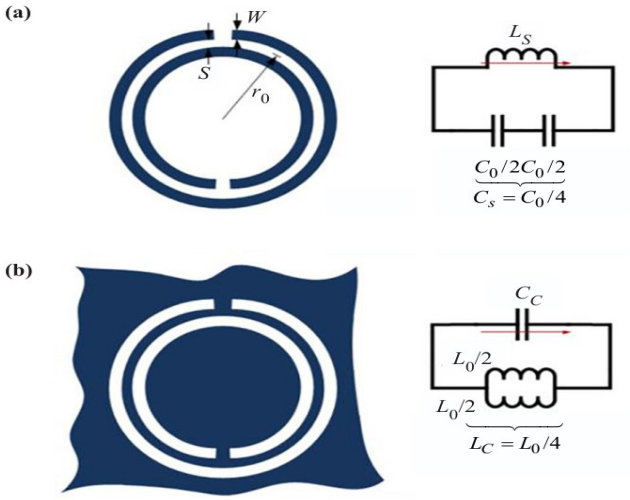


Рисунок 2 – Электрическая эквивалентная схема структуры SRR (а); электрическая эквивалентная схема структуры CSRR (б)

Разрезные кольцевые резонаторы (SRR). Эти устройства представлены на рисунке 2(а) в виде проводящей структуры в форме кольца или квадрата, расположенной на диэлектрической подложке. На определенном участке по длине этой структуры имеется разрыв или щель. Для ее возбуждения используется параллельная структуре линия передачи, благодаря чему магнитное поле направлено перпендикулярно проводящей плоскости. В результате непрерывного изменения магнитного поля в кольцевой структуре наводится ток. Электрическая эквивалентная схема сопоставима с контуром LC-резонатора, который имеет собственную резонансную частоту.

Резонансные методы измерения широко применяются в сверхвысокочастотных датчиках благодаря высокой чувствительности к изменениям электромагнитных параметров среды [2]. Работа таких устройств основана на использовании резонаторных структур, в которых электромагнитное поле усиливается на определённой, резонансной частоте [3]. Значение этой частоты определяется геометрией резонатора и электромагнитными свойствами среды, находящейся в зоне действия поля. Резонансная частота для разрезного кольцевого резонатора (SRR) может быть выражена как

$$f_{srr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

$$C = C_g + C_s, \quad (2)$$

где L – эквивалентная индуктивность резонаторной структуры; C_g – ёмкость зазора; C_s –поверхностная ёмкость.

$$C_g = \epsilon_{eff}\left(\frac{hw}{g}\right) + \epsilon_{eff}(h + g + w), \quad (3)$$

$$C_s = 2\epsilon_{eff}\left(\frac{(h+w)}{\pi}\ln\left(\frac{4r}{g}\right)\right), \quad (4)$$

$$L = \mu_0 R_m\left(\ln\left(\frac{8R_m}{h+w}\right) - 0.5\right), \quad (5)$$

$$R_m = r + w/2 \quad (6)$$

где r — радиус; h — высота; w — ширина; g — щелевой зазор проводящей структуры.

Из выражения для резонансной частоты и соответствующих формул очевидно, что резонансную частоту можно изменять путем варьирования таких параметров, как щелевой зазор, ширина и радиус кольца. Наряду с этим резонансная частота также зависит от диэлектрической проницаемости материала, находящегося в непосредственной близости от структуры. Таким образом, чувствительность структур выражается:

$$S = \frac{\Delta f_{res}}{\Delta\epsilon}, \quad (7)$$

$$Q = \frac{f_{res}}{FWHM}, \tag{8}$$

где S – чувствительность датчика; Δf_{res} – сдвиг резонансной частоты; $\Delta\epsilon$— изменение диэлектрической проницаемости; Q – добротность; f_{res} – резонансная частота; FWHM —ширина пика на полувысоте (от англ. Full Width at Half Maximum).

Из анализа характеристик резонатора четко прослеживается, что основным механизмом работы СВЧ-датчика является фиксация изменений электромагнитных свойств среды, находящейся в зоне действия поля. Фундаментальной величиной, описывающей эти свойства, выступает диэлектрическая проницаемость

Диэлектрическая проницаемость является одной из ключевых характеристик вещества, определяющих его взаимодействие с электромагнитным полем [4]. В сверхвысокочастотном диапазоне диэлектрическая проницаемость напрямую влияет на параметры распространения электромагнитных волн, включая скорость распространения, фазовый сдвиг и уровень потерь энергии.

Особое значение данный параметр имеет при анализе влажности материалов. Молекулы воды обладают выраженным дипольным моментом и способны активно ориентироваться во внешнем электрическом поле. В результате даже небольшое увеличение содержания влаги приводит к заметному росту диэлектрической проницаемости вещества. По этой причине изменение влажности материала сопровождается изменением его электромагнитных характеристик.
Когда исследуемый материал (MUT — Material Under Test) вступает в электромагнитное взаимодействие со структурой, происходит сдвиг резонансной частоты [5]. Чем больше этот сдвиг, тем выше чувствительность датчика. В зависимости от области применения исследуемый материал (MUT) по-разному взаимодействует с резонирующей структурой.

Для ненагруженного состояния датчика, когда в его чувствительной зоне отсутствует исследуемый диэлектрик, начальная резонансная частота f_0 определяется его собственной эквивалентной индуктивностью и ёмкостью:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{UMS}C_{UMS}}}, \tag{9}$$

где L_{UMS} и C_{UMS} — это индуктивность и емкость ненагруженного резонатора.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{UMS}(C_{UMS}+C_{LMS})}}. \tag{10}$$

В СВЧ-датчиках этот эффект используется для измерения влажности различных веществ. При взаимодействии исследуемого материала с электромагнитным полем сенсорной структуры происходит изменение распределения поля и смещение резонансной частоты устройства. Величина этого сдвига позволяет оценить диэлектрическую проницаемость среды и, следовательно, определить содержание влаги в материале.

Если в область чувствительного электромагнитного поля помещается исследуемый материал, его диэлектрическая проницаемость изменяет электрическую ёмкость резонаторной системы. В этом случае ёмкость принимает значение:

$$C = C_0 + C_m, \tag{11}$$

где C_0 — собственная ёмкость резонатора; а C_m — добавочная ёмкость, обусловленная присутствием исследуемого материала.

В качестве основного измерительного параметра СВЧ-датчика используется сдвиг резонансной частоты:

$$\Delta f = f_0 - f_1 \tag{12}$$

Чем больше изменение диэлектрических свойств среды, тем значительнее сдвиг резонансной частоты. Качество и предел обнаружения таких резонансных измерений напрямую зависят от материала, с которым взаимодействует исследуемая среда . В связи с этим первостепенную научную и практическую значимость приобретает исследование влияния **новых материалов (графена, метаматериалов, композитов)** на характеристики СВЧ-устройств. Использование сред с такими уникальными электрофизическими свойствами позволяет многократно усилить резонансный отклик датчика. При этом безусловным лидером среди базовых функциональных покрытий является графен.

Графен — это уникальный материал, представляющий собой один слой атомов углерода, выстроенных в виде правильной шестиугольной решётки. Несмотря на простоту структуры, его физические

свойства сильно отличаются от обычных проводников. Это связано с тем, что электроны в графене ведут себя необычно: в энергетической структуре материала есть так называемые точки Дирака, в которых валентная зона и зона проводимости соприкасаются.

Вблизи этих точек движение носителей заряда описывается линейной зависимостью энергии от импульса:

$$E = \hbar v_F |k|, \tag{13}$$

где E – энергия электрона; k – волновой вектор; h – приведённая постоянная Планка; v_F – скорость Ферми (порядка 10^6 м/с).

Графен обладает высокой подвижностью несущей и низким уровнем шума, что позволяет использовать его в качестве канала в полевом транзисторе. Немодифицированный графен не имеет энергетической запрещенной зоны, что делает его непригодным для цифровой электроники. Однако модификации (например, графеновые нановолокна) создали потенциальные возможности для использования в различных областях электроники. Были построены графеновые транзисторы, которые контролируются химически, и другие, которые контролируются напряжением. Графен проявляет ярко выраженную реакцию на перпендикулярные внешние электрические поля, потенциально образуя полевые транзисторы (FET). В статье 2004 года были задокументированы FETs с коэффициентом включения-выключения ≈30 при комнатной температуре. В статье 2006 года было объявлено о полностью графеновом плоском фэт с боковыми затворами [6]. Их приборы показали изменения на 2% при криогенных температурах. Первый топстробированный FET (коэффициент включения-выключения графеновые нановолокна могут оказаться в целом способными заменить кремний в качестве полупроводника.

Благодаря такой зависимости электроны в графене ведут себя как квазичастицы с нулевой эффективной массой, что обеспечивает чрезвычайно высокую подвижность носителей заряда.

Электропроводность графена может быть выражена через концентрацию носителей заряда и их подвижность:

$$\sigma = qn\mu, \tag{14}$$

где σ — электрическая проводимость; q — заряд электрона; n — концентрация носителей заряда; μ — их подвижность. Высокие значения подвижности (до (10^5) см²/В·с) позволяют графеновым слоям эффективно взаимодействовать с электромагнитными полями в сверхвысокочастотном диапазоне.

В СВЧ-сенсорах важную роль играет также поверхностная проводимость графена. Для высоких частот она описывается комплексной величиной:

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega), \tag{15}$$

где (ω) — угловая частота электромагнитного поля. Комплексная проводимость определяет как потери энергии, так и реактивные свойства графенового слоя.

На рисунке 3 видно, что слои оксида графена (GO) и максена (MXene) переплетаются друг с другом,

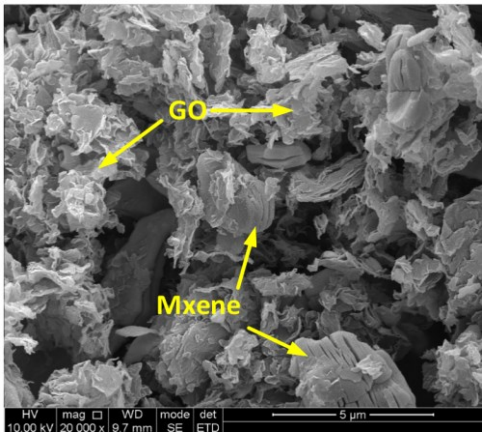


Рисунок 3 – Изображение композита GO@MXene, полученное методом сканирующей электронной микроскопии

образуя увеличенную удельную площадь поверхности для адсорбции молекул воды. Такое интенсивное поглощение влаги напрямую меняет электромагнитные параметры среды.

Высокая удельная поверхность, квантовые эффекты переноса заряда и высокая электропроводность делают графен особенно чувствительным к изменениям окружающей среды. Благодаря этим свойствам графеновые покрытия способны существенно повышать чувствительность СВЧ-сенсоров влажности и датчиков диэлектрической проницаемости материалов.

Как было показано ранее, отклик СВЧ-датчика на изменение влажности обусловлен изменением эквивалентной емкости системы [5]. Однако в традиционных резонаторах электрическое поле рассеивается в большом объеме, что снижает общую чувствительность. Метаматериалы решают эту проблему за счет эффекта субволновой локализации ближнего поля (near-field confinement) [1].

С физической точки зрения, геометрия метаматериала позволяет сжать макроскопическое СВЧ-поле в микроскопические емкостные зазоры. Управление электромагнитными свойствами сводится к геометрическому конструированию этих зазоров. Например, эквивалентная емкость щели (C_g) классического кольцевого резонатора строго зависит от его топологии:

$$C_g = \epsilon_{eff}\left(\frac{hw}{g}\right) + \epsilon_{eff}(h + g + w), \tag{16}$$

где h — толщина подложки; w — ширина проводника; g — ширина зазора (щели), а $\varepsilon_e ff$ — эффективная диэлектрическая проницаемость среды.

Например, уменьшение размеров резонаторов приводит к увеличению резонансной частоты, а изменение ширины зазоров влияет на ёмкость и, следовательно, на чувствительность к внешней среде. Это делает метаматериалы особенно удобными для сенсорных приложений, где требуется высокая чувствительность к малым изменениям параметров среды.

Еще одним материалом для создания сверхвысокочастотных сенсоров являются композитные материалы. В контексте сверхвысокочастотных сенсоров такие материалы позволяют целенаправленно управлять электромагнитными характеристиками структуры за счёт комбинации свойств отдельных компонентов.

С физической точки зрения основное преимущество композитов связано с возможностью регулирования эффективной диэлектрической проницаемости. Она определяется не только свойствами исходных материалов, но и их объемным соотношением. В простейшем случае эффективная проницаемость может быть оценена, как

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 V_1 + \varepsilon_2 V_2, \tag{17}$$

где ε_1, ε_2 — диэлектрические проницаемости компонентов, V_1, V_2 — их объемные доли.

В СВЧ-датчиках композитные материалы часто используются в качестве подложек или чувствительных покрытий. Изменяя состав композита, можно влиять на распределение электромагнитного поля в сенсорной структуре, а также на величину потерь.

Оптимизация параметров сенсора достигается подбором структуры композита: размера частиц, их распределения и типа матрицы. Это позволяет повысить чувствительность, расширить диапазон измерений и улучшить стабильность работы устройства.

Использование композитных материалов также обеспечивает механическую прочность, термическую устойчивость и технологичность изготовления сенсоров. Благодаря этому они находят широкое применение в современных СВЧ-системах контроля параметров среды, где требуется сочетание высокой точности и надёжности.

В заключительной части работы целесообразно вновь обратиться к ключевой идее — повышению эффективности сверхвысокочастотных датчиков за счёт более глубокого понимания физических процессов и внедрения новых функциональных материалов. Рассмотрение физических механизмов взаимодействия электромагнитного поля с веществом позволило раскрыть природу работы сенсоров и выявить факторы, ограничивающие их характеристики.

Список использованных источников:

1. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena / J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins., W.J. Stewart // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1999. – Vol. 47.

2. Основы радиоэлектроники / В.М. Борздов. — Минск: БГУ, 2002. — 196 с.

3. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства / Д.В. Гололобов, В.Б. Кирильчук. — Минск: БГУИР, 2003. — 120 с.

4. Физика твердого тела / К.Н. Васильев. — М.: Юрайт, 2021. — 410 с.

5. СВЧ-электроника и сенсорные технологии / Ю.В. Гуляев— М.: Наука, 2019. — 280 с.

6. The effects of graphene nanostructures on mesenchymal stem cells / Y. Talukdar {et. al.] // Biomaterials, 2014.– 35 (18). – P. 4863–77.

UDC 537.86:538.9

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF NEW MATERIALS (GRAPHENE, METAMATERIALS, COMPOSITES) ON THE CHARACTERISTICS OF MICROWAVE SENSORS FOR MOISTURE AND DIELECTRIC PERMITTIVITY

Zhilskiy K.A., Zhilskiy N.A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Khramovich E.M. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Annotation. The influence of graphene, metamaterials, and composites on the characteristics of microwave sensors for moisture and dielectric permittivity is considered, with analysis of their physical operating principles and demonstration of improved sensitivity, accuracy, and stability through the use of advanced materials.

Keywords. Microwave sensors, metamaterials, graphene oxide, composite materials, humidity sensors, dielectric constant, sensor sensitivity, electromagnetic field localization, resonant frequency.

УДК 621.317.7:537.86

ОТКРЫТИЯ ПРОШЛОГО НА СТРАЖЕ НАСТОЯЩЕГО. КОНСТРУКЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЕЙ

Буйневич Д.А., студент
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В данной статье изучены современные системы металлодетекции, работающие совместно с машинным обучением. Приведены основные типы конструкций, а также примеры внедрения AI-алгоритмов.

Ключевые слова. Металлоискатель, мультичастотные системы, цифровая обработка сигнала, искусственный интеллект, машинное обучение, нейросетевые классификаторы.

Введение В современном мире вопросы общественной безопасности вышли на совершенно новый уровень. Требования к системам безопасности всё время растут. На массовых мероприятиях, в метрополитене, в аэропортах, школах, административных зданиях, везде необходимо обеспечить надежный уровень безопасности. И такие проблемы требуют интеллектуальных решений, ведь просто обнаружить металл недостаточно. Необходимо автономно обнаружить запрещенный предмет, распознать его и немедленно оповестить об этом необходимые службы. А также исключить ложные срабатывания, на монеты, ключи, пряжки и так далее.

Основная часть. Существенные изменения в данную сферу пришли в связи с переходом от аналогового сигнала к цифровому. Если еще в 80-х годах такой прибор мог состоять из двух транзисторов и реагировать исключительно на появление металла. То современные устройства обрабатывают сразу несколько параметров, а именно: амплитуду сигнала, фазовый сдвиг, время затухания, форму импульса и спектральный состав. **Технологическим прорывом стало использование мультичастотных систем и цифровой обработки сигнала.** В отличие от традиционных одночастотных металлодетекторов, мультичастотные устройства излучают сигнал одновременно на нескольких частотах (например, от 1,5 кГц до 100 кГц). Низкие частоты эффективны для обнаружения цветных металлов, высокие-для черных металлов и мелких объектов. Анализ отклика на разных частотах позволяет вычислить электропроводность и магнитную проницаемость цели, что повышает точность классификации. Цифровая обработка сигнала преобразует аналоговый отклик в цифровой код, после чего микроконтроллер применяет адаптивную фильтрацию, подавление шумов и корреляционный анализ**. Ключевую роль также играет быстрое преобразование Фурье (БПФ), позволяющее разложить сигнал на спектральные составляющие и выделить полезный отклик на каждой из рабочих частот.** Сочетание мультичастотного зондирования и ЦОС (цифровая обработка сигнала) сделало возможным обучение нейросетей на тысячах образцов сигналов. Также с появлением микроконтроллеров, стало возможно применять машинное обучение прямо в портативных устройствах. А внедрение искуственного интеллекта, обученного на тысячах образцов, позволяет устройству самому идентифицировать предмет и принять решение о подаче сигнала.

Несмотря на кажущуюся сложность, современные датчики базируются на фундаментальном законе электромагнитной индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad (1)$$

где ε_i - ЭДС индукции в контуре;

$\partial \phi$ **-** изменение магнитного потока;

∂t **-** время изменения;

Переменный ток в катушке создает вокруг нее переменное магнитное поле. А при появлении металла, возникают вихревые токи Фуко, которые создают собственное магнитное поле. Столкновение магнитных полей и фиксируется прибором. Именно это явление-регистрация изменения поля, лежит в основе всех металлодетекторов. Существует 3 основных типа металлоискателей:

1. BFO-Beat Frequency Oscillator (метод биений)- В приборе расположены два генератора радиочастоты. Частота первого фиксированная, а в колебательный контур второго включена катушка-искатель. Если в поле катушки попадает цветной металл, её индуктивность падает, если чёрный металл,

то растёт. Оба этих сигнала смешиваются на слух. При появлении металла, в наушниках слышны скачки (биения) звука вверх или вниз.

2. IB-Induction Balance (индукционный баланс)- В приборе две катушки, расположенные особым образом: либо крест на крест, либо одна в одной плоскости, а вторая сдвинута. Поля обоих катушек строго скомпенсированы, так что бы одна катушка наводила во второй 0 вольт. Как только под нами появляется металл, компенсация катушек сбивается, и вторая катушка падает сигнал.

3. PI-Pulse Induction (Импульсная Индукция)-Здесь только одна катушка, которая работает по очереди приёмником и передатчиком. Импульс создаёт поле, которое начинает затухать, при исчезновении импульса. Но металлические предметы создаёт вихревые токи, и поле от них затухает постепенно. Его и фиксирует катушка при переходе в режим приёма.

Настоящей же революцией в области металлодетекции стало внедрение искуственного интеллекта. Для таких устройств применяют сверточные и рекурентные нейросетевые классификаторы. Их суть придельно проста: вместо того чтобы задавать жесткие рамки по фазе или амплитуде возвращаемого сигнала. Во время обучения сеть видит тысячи предметов:пистолеты, ножи, телефоны, ключи, монеты и многое другое. Нейросеть сама находит закономерности по форме сигнала, фазе и времени затухания каждого из возвращаемых сигналов. После обучения сеть способна на новом, ранее не виданном сигнале с высокой точностью определить, какой именно металлический предмет его породил. Причём нейросеть работает в реальном времени — решение принимается за миллисекунды. Это позволяет создавать системы безопасности, которые не просто сигнализируют о наличии металла, а сразу сообщают оператору что обнаружено.

Одним из самых ярких примеров внедрения AI является американская компания Evolv Technology с их системой Evolv Express (рисунок 1).

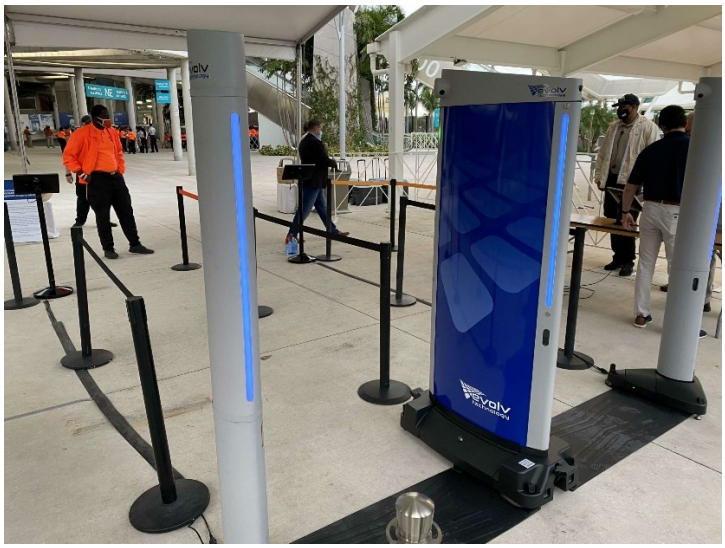


Рисунок 1-Пример использования системы Evolv Express

Это не традиционная рамка, через которую нужно останавливаться и выкладывать вещи, а портал для безостановочного досмотра. Человек проходит через него с обычной скоростью. Ему не нужно вынимать телефон, ключи, ремень или снимать часы. Система использует комбинацию нескольких технологий: мультичастотную металлодетекцию, маломощное радиолокационное зондирование и нейросетевой анализатор сигнала. Все данные стекаются в AI-модуль, который за доли секунды принимает решение: представляет ли обнаруженный металл угрозу или нет. Пропускная способность Evolv Express достигает 4000 человек в час — это в 4-5 раз выше, чем у традиционных металлодетекторов. Система работает в десятках спортивных стадионов, парков аттракционов, музеев и школ по всей территории США. Важнейшая особенность — возможность удалённого обновления нейросетевой модели. Когда появляются новые типы угроз или новые модели оружия, компания Evolv просто пересылает обновлёния нейронной сети на все установленные системы.[1]

Ещё одна американская разработка-система Liberty Defender от компании Liberty Defense. Это портальный металлодетектор, также использующий нейросетевые алгоритмы, но с акцентом на образовательные и административные учреждения: школы, колледжи, университеты, суды, госучреждения. Особенность Liberty Defender в том, что он не требует сложной настройки и устанавливается за несколько минут. Система способна отличить огнестрельное и холодное оружие, от безобидных металлических предметов. Работа вместе с системой видеонаблюдения позволяет автоматически сохранять видеофрагмент того момента, когда человек с угрозой прошёл через детектор. Кроме того, Liberty Defender может быть подключён к системе оповещения для автоматического вызова охраны. Нейросеть обучалась более чем на 50000 различных предметов.[2]

Японские компании Anritsu и NEC сделали акцент на миниатюризацию. Anritsu, известная своими промышленными металлодетекторами, выпускает компактные высокочувствительные системы для контроля доступа в офисы и лаборатории. Их устройства часто встраиваются прямо в стойки турникетов или даже в напольное покрытие. Особенность японского подхода-использование не одного нейросетевого модуля, а распределённой системы: каждый металлодетектор имеет свой AI-чип, а все данные стекаются в центральную систему, которая может анализировать общую картину. NEC, в свою очередь, делает ставку на комбинированные системы: металлодетектор, камера с распознаванием лиц, тепловизор. Нейросеть принимает решение не только на основании сигнала металлодетектора, но и анализирует поведение человека и его температуру. Такие системы массово устанавливаются на входах в аэропорты Японии, на Олимпийских объектах и в банковских хранилищах.[3]

Российская разработка, заслуживающая внимания-это селективные металлодетекторы типа Сфера, производимые компанией АО Сфера. Они активно используются в метрополитенах Москвы и Санкт-Петербурга, на вокзалах, в судах и административных зданиях. Главное преимущество Сферы-селективность обнаружения, которая достигается за счёт многочастотного анализа и алгоритмов машинного обучения. Система способна игнорировать маскирующие предметы, например, металлическую фольгу и при этом надёжно обнаруживать скрытое оружие. Сфера-СМ и Сфера-СМ-2 работают в автоматическом режиме, не требуя постоянного присутствия оператора у каждого поста. При обнаружении угрозы система подаёт световой и звуковой сигнал, а также может автоматически блокировать турникет или передавать сигнал на пульт охраны. В последних версиях есть функция обучения: устройство запоминает новые образцы сигналов от предметов, которые администратор маркирует как опасные или безопасные. Это позволяет адаптировать систему под конкретный объект.[4]

Значительного внимания заслуживает израильская компания Camero, дочернее предприятие южнокорейского конгломерата SK Group. Их система Camero Guardian принципиально отличается от классических металлодетекторов тем, что использует не только электромагнитную индукцию, но и микроволновое зондирование с синтезированной апертурой на частотах 3–10 ГГц. Это позволяет обнаруживать не только металлические, но и неметаллические предметы — пластиковое оружие, керамические ножи, жидкую взрывчатку, спрятанные под одеждой. Нейросетевая обработка объединяет данные от 24 приёмопередающих модулей, формируя трёхмерное изображение тела человека в реальном времени. Алгоритмы машинного обучения обучены на более чем 200 000 сценариях прохода, включая людей с имплантами, кардиостимуляторами и скрытыми предметами. Важная особенность-система не хранит изображения тела, а только результат классификации, что соответствует требованиям приватности. Пропускная способность Guardian достигает 1500 человек в час при вероятности ложной тревоги менее 5%. Система сертифицирована для использования в аэропортах Франкфурта, Сингапура, международном терминале имени Джона Кеннеди, а также в зданиях ООН и посольствах США. Camero также предлагает портативную версию Guardian Mobile, монтируемую на автомобиль для мобильных блокпостов. [5]

Европейский рынок металлодетекции для медицинской и фармацевтической промышленности практически полностью контролируется финской компанией. Их линейка Security Pro спроектирована специально для контроля продукции в больницах, фармацевтических складах и на линиях производства лекарственных средств, где важно исключить металлические загрязнения (иглы, осколки, стружку) в флаконах. Главное технологическое отличие Security Pro-использование адаптивного машинного обучения без учителя. В отличие от классических нейросетей Evolv или Liberty, которые требуют предварительной маркировки тысяч образцов, алгоритм Metorex самостоятельно выявляет изменения в потоке сигналов в реальном времени. Это достигается за счёт автоэнкодерной архитектуры: нейросеть обучается восстанавливать нормальный сигнал пустой продукции, и любое отклонение (по амплитуде, фазе или спектру) расценивается как потенциальная угроза. Система работает на 12 частотах одновременно (от 50 кГц до 1 МГц) и способна обнаруживать частицы металла размером до 0,3 мм в продукте даже через упаковку. Алгоритм также компенсирует температурные изменения и вибрации конвейера. Security Pro сертифицирован и соответствуют стандартам GMP для фармацевтики.[6]

Китайско-турецкое совместное предприятие Nokta Makro занимает уникальную нишу-бюджетные металлодетекторы с внедрением искусственного интеллекта, доступные для поисковых отрядов, служб безопасности средних предприятий и даже для любительского поиска. Флагманская модель Nokta Legend-это портативный металлодетектор с мультичастотным режимом (одновременная работа на 5, 15 и 40 кГц) и встроенным нейросетевым сопроцессором с низким энергопотреблением. Архитектура нейросети-лёгкая свёрточная сеть MobileNet, адаптированная для работы на 32-битном микроконтроллере. Это позволяет устройству классифицировать цели за 50–80 миллисекунд. Обучение сети проводилось на 50 000 образцов сигналов от монет разного достоинства, ювелирных украшений, патронов, ножей, ключей, алюминиевых пробок и фрагментов фольги. По результатам испытаний, точность распознавания составляет: монеты-97%, золотые кольца-91%, железный мусор-94%. Функция AI Disc позволяет оператору сразу видеть на дисплее изображение предполагаемого предмета. Система не требует калибровки при смене грунта-нейросеть автоматически подстраивается на основе анализа спектра шума.[7]

Заключение. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод что, все заявленные в статье ключевые технологии нашли своё отражение в описанных системах. Что, свидетельствует о том, что за последние годы, сфера металлодетекторов шагнула далеко вперед. Традиционные аналоговые схемы, которые ещё недавно были основой любого металлоискателя, сегодня стремительно вытесняются цифровыми системами с программно-определяемой архитектурой. **Машинное обучение** использует как контролируемые методы (обучение на размеченных выборках до 200 000 сценариев), так и обучение без учителя (адаптивная настройка на фоновый шум). Но главным достижением стало внедрение технологий искусственного интеллекта. Нейросетевые классификаторы, обученные на десятках тысяч образцов сигналов, позволяют современным системам безопасности не просто обнаруживать металл, а распознавать конкретный предмет, отличая нож от мобильного телефона или пистолет от связки ключей. Это меняет не только качество, но и саму философию досмотра: от тотальной к интеллектуальной.

Тем не менее, остаются и нерешённые проблемы, которые предстоит решать в ближайшие годы. Во-первых, это вычислительная сложность: AI-анализ в реальном времени требует достаточно мощных процессоров, что увеличивает стоимость конечного устройства. Во-вторых, качество работы нейросети напрямую зависит от объёма и разнообразия обучения. Если сеть никогда не видела сигнал от нового типа оружия или необычного металлического сплава, она может ошибиться. Поэтому полностью отказываться от классических методов пока преждевременно-будущее за гибридными системами, где металлодетектор перестанет быть самостоятельным устройством и станет лишь одним из датчиков в комплексе систем безопасности. Вместе с ним будут работать камеры машинного зрения, анализирующие поведение человека-беспокойство, неестественные жесты, попытки обойти зону досмотра, тепловизоры, контролирующие температуру тела, что актуально в контексте эпидемиологических угроз, газоанализаторы, выявляющие запах взрывчатых веществ и даже системы анализа микроволнового поля. Нейросеть будет принимать решение на основе данных сразу со всех этих сенсоров, что резко повысит точность и надёжность досмотра.

Список использованных источников

1. Evolv Technology. AI-Based Weapons Detection for Public Venues: White Paper. — Boston: Evolv Technologies, 2023. — 24 с.
2. Liberty Defense. HEXWAVE System Product Documentation. — Atlanta: Liberty Defense Holdings, 2024. — 36 с.
3. Anritsu Infivis. Metal Detection Systems for Security and Industrial Applications. — Tokyo: Anritsu Corporation, 2023. — 32 с.
4. АО «Сфера». Металлодетекторы селективные «Сфера-СМ». Техническое описание и руководство по эксплуатации. — СПб.: АО «Сфера», 2024. — 48 с.
5. Camero-Tech. Xaver Personnel Screening System. Технический обзор. — Netanya: Camero-Tech Ltd, 2023. — 18 с.
6. Malvern Panalytical. Security Pro Metal Detection for Pharmaceuticals. — Helsinki: Metorex division, 2024. — 28 с.
7. Nokta Makro. Legend Multi-Frequency Detector with AI Co-processor. User Manual. — Ankara: Nokta Engineering, 2024. — 52 с.

UDC 621.317.7:537.86

DISCOVERIES OF THE PAST GUARDING THE PRESENT. DESIGN AND APPLICATION OF MODERN METAL DETECTORS

Buinevich D.A. student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Savilova U.I. – Candidate of Technical Sciences.

Annotation. This article examines modern metal detection systems that utilize machine learning. The main design types are presented, along with examples of AI algorithm implementation.

Keywords: Metal detector, multi-frequency systems, digital signal processing, artificial intelligence, machine learning, neural network classifiers.

УДК 535.4

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТА ДВОЙНОЙ СЕТКИ

Поцелуев Р.С., Елинов Е.Д., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Храмович Е.М. – канд. физ.-мат. наук, доцент
Шабусов А.К. – учитель физики ГУО «Средняя школа №1 г. п. Смиловичи»

Аннотация.

Ключевые слова. Муаровый узор, муар-эффект, интерференция, дифракция, периодические структуры, оптическая проекция, точечный источник света, геометрическая оптика, наложение сеток, математическое моделирование.

Эффект двойной сетки — результат взаимодействия двух наложенных или последовательно расположенных периодических структур — представляет собой комплексный феномен, охватывающий спектр процессов от классической оптики до микроэлектроники [1]. Целью данной работы является комплексное исследование муар-эффекта, возникающего при прохождении излучения через идентичные сетки, построение математической модели явления и анализ его междисциплинарных приложений. К основным задачам относятся теоретическое описание зависимости параметров изображения от геометрии системы, экспериментальная верификация модели и оценка границ применимости эффекта в прецизионной метрологии и техническом дизайне.

Фундаментальной основой эффекта является возникновение комбинационных частот и пространственных модуляций (муаровых узоров) [2,3]. При наложении двух сеток, как пространственных фильтров с частотами f_1 и f_2 , формируется результирующая картина, содержащая разностную частоту, которая образует низкочастотную огибающую.

Для системы, включающей точечный источник света, две одинаковые сетки с периодом d и экран, период муаровых полос D на экране определяется геометрическими параметрами установки [4]. Схематическое представление формирования изображения приведено на рисунке 1.

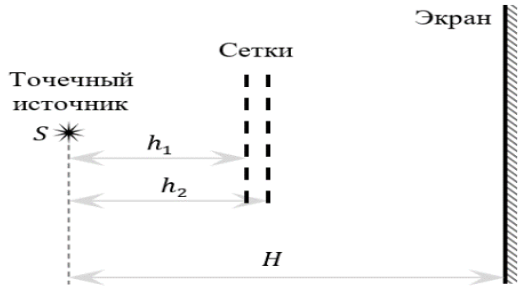


Рисунок 1 — Схема формирования изображения

Исходя из подобия треугольников, выведена ключевая зависимость [4]:

$$D = \Delta h H \cdot d, \tag{1}$$

где H — расстояние от источника до экрана; d — период сетки; Δh — расстояние между сетками.

Важной особенностью является то, что период D не зависит от абсолютного расстояния между источником и сетками, а определяется исключительно их взаимным расположением и дистанцией до детектора.

Границы применимости эффекта ограничены условиями: при $\Delta h \to 0$ эффект исчезает, а при $\Delta h \to H$ период изображения стремится к периоду самой сетки.

Оценка освещенности и контрастности: при совпадении прозрачных участков сеток наблюдается максимум интенсивности. Средняя освещенность E_{max} и E_{min} может быть оценена через отношение ширины прозрачной части к периоду:

$$E_{max} \approx dd - b, \tag{2}$$

$$E_{min} \approx dd - 2b, \tag{3}$$

где b — ширина перемычки сетки.

Контрастность картины γ при $b \ll d$ определяется как:

$$\gamma = E_{max} + E_{min} E_{max} - E_{min} \approx 2db \tag{4}$$

Ширина светлой полосы δx пропорциональна периоду полос D и отношению толщины проволоки к периоду решетки:

$$\delta x \approx d2dD \tag{5}$$

Для верификации теоретических положений была разработана компьютерная модель в среде Microsoft Excel. Основная идея заключается в перемножении функций пропускания каждой решетки $\tau_1(x)$ и $\tau_2(x)$ с последующим усреднением интенсивности на интервале, превышающем период решетки:

$$I = I_0 \langle \tau_1(x) \cdot \tau_2(x) \rangle \tag{6}$$

Функция пропускания аппроксимировалась зависимостью:

$$f_1(\mathrm{x}) = 21(1 + \cos(d2\pi x + a)) \tag{7}$$

Графики моделирования интенсивности приведены на рисунке 2.

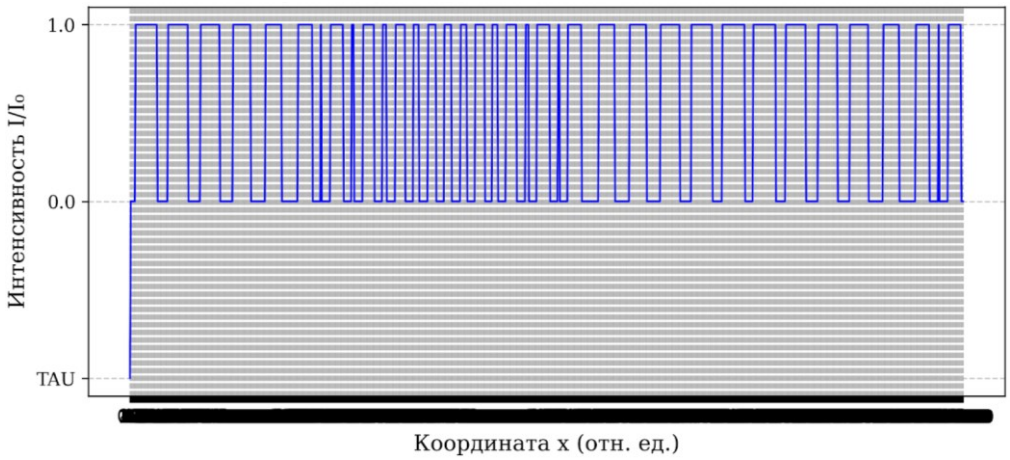


Рисунок 2 — Графики моделирования интенсивности

Экспериментальное воспроизведение проводилось с использованием сеток диаметром 10 см ($d = 1.0$ мм, $b = 0.2$ мм) [4]. Было установлено, что для получения четкого изображения толщина перемычек должна быть менее половины периода сетки. Усовершенствованная установка включала зеркало, что позволило наблюдать эффект с использованием всего одной сетки за счет принципа обратимости световых лучей.

В ходе экспериментов исследовались зависимости периода изображения D от расстояния до экрана H и зазора между сетками.

1. Зависимость $D(H)$: При фиксированном $\Delta h = 1.8$ см увеличение расстояния до экрана ведет к линейному росту периода ячеек муара. Методом наименьших квадратов определен угловой коэффициент $a = 0.0548 \pm 0.0015$, что позволило рассчитать экспериментальное значение $\Delta h \approx 1.82$ см, полностью совпавшее с фактическим.

2. Зависимость $D(\Delta h)$: Линеаризация зависимости в координатах $D(1/\Delta h)$ подтвердила обратную пропорциональность. Расчетное значение $H \approx 1.32$ м при фактическом 1.30 м подтверждает высокую точность математической модели (1).

Графики зависимостей $D(H)$ и $D(1/\Delta h)$ приведены на рисунке 3.

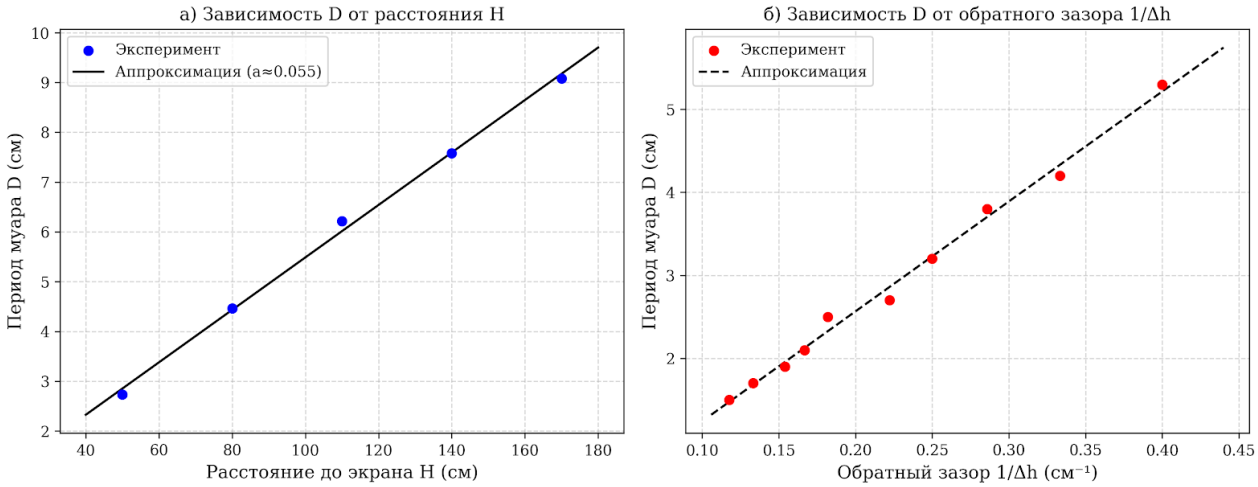


Рисунок 3 — Графики зависимостей: а) $D(H)$; б) $D(1/\Delta h)$

Фотометрический анализ: с помощью цифровой обработки в Adobe Photoshop проведено сравнение реального распределения относительной освещенности с результатами моделирования. Интервал изменения интенсивности $(0.56;\ 0.71)$ показал корреляцию с теоретическим прогнозом.

Теоретический анализ выявляет широкий спектр потенциального прикладного применения эффекта двойной сетки:

- **Прецизионная метрология (НАН Беларуси).** Использование эффекта Тальбота позволяет бесконтактно измерять нанометровые перемещения.
- **Индикатор вибраций и акустических колебаний.** Высокая чувствительность муарового узора к изменению расстояния между сетками позволяет использовать систему для визуализации механических колебаний. При закреплении одной из сеток на вибрирующей поверхности циклическое изменение зазора приводит к пульсации периода изображения, что может служить основой для оптических датчиков вибрации или недорогих измерительных систем.
- **Бесконтактный контроль деформаций.** Чувствительность муарового узора к изменению зазора между сетками может быть использована для создания оптических датчиков температурного расширения материалов, где период изображения выступает в качестве меры микроперемещений.
- **Оптическая защитная маркировка.** Эффект позволяет создавать защитные элементы, визуализирующие уникальный узор при наблюдении через точечный источник света. Сложность точного воспроизведения микроскопических параметров сеток делает такую маркировку перспективной для защиты продукции от подделок.
- **Вычислительные методы.** Многосеточные алгоритмы (multi-grid methods) применяются для ускорения решения систем линейных уравнений при моделировании полупроводников, где высокочастотные компоненты ошибки подавляются на мелкой сетке, а низкочастотные — на грубой.

Проведенное исследование подтверждает, что эффект двойной сетки является универсальным физическим феноменом с глубоким математическим обоснованием. В ходе работы:

- Доказана справедливость аналитической зависимости периода изображения от геометрии системы.
- Разработана и экспериментально верифицирована модель распределения интенсивности, показавшая высокую сходимость с натурными данными.
- Определены границы применимости эффекта, связанные с критическими значениями зазоров между элементами системы.

Список использованных источников:

1. Сивухин, Д. В. Оптика: учеб. пособие для студентов вузов / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1980. – 752 с.

2. Кузнецов, Е. А. Теоретические основы муара [Электронный ресурс] // Юный ученый. – 2024. – Режим доступа: . – Дата доступа: 14.01.2024.

3. Moiré pattern [Electronic resource] // Wikipedia : The Free Encyclopedia. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_pattern. – Date of access: 19.12.2023.

4. Поцелуев, Р. С. Эффект двойной сетки / Р. С. Поцелуев, Е. Д. Щербак ; науч. рук. А. К. Шабусов // Материалы XXVIII республиканского конкурса работ исследовательского характера (конференция) учащихся по астрономии, биологии, информатике, математике, физике, химии. Секция «Физика». – Смиловичи, 2024.

5. Пятакова, З. А. О муарах, оживших иллюстрациях и пользе моделей / З. А. Пятакова, А. П. Пятаков // Квант. – 2010. – № 6. – С. 13–17.

UDC 535.4

MODELING METHODS FOR THE DOUBLE-MESH EFFECT

Potseluev R.S, Elinov E.D., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Minsk, Republic of Belarus

Khramovich E.M. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Shabusov A.K. – Physics teacher at the State Educational Institution "Secondary School No. 1 of Smilovichi"

Annotation. The paper investigates the optical effect of moiré pattern formation when light passes through two identical meshes. The research aims to construct a mathematical model of the phenomenon and perform its experimental verification. During the study, a theoretical dependence of the image period on the setup parameters was obtained. Computer modeling of the illuminance distribution was carried out. The validity of the proposed model was confirmed experimentally. The visibility limits of the effect were determined. The results can be applied for decorative and industrial purposes.

Keywords. Moiré pattern, moiré effect, interference, diffraction, periodic structures, optical projection, point light source, geometric optics, mesh superposition, mathematical modeling.

УДК 681.586:620.3

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ВОЛОКОННЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА (MOS_2)

Теслёнок А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель

Аннотация. Развитие волоконных сенсорных технологий на основе двумерных наноматериалов открывает революционные перспективы создания искусственных систем восприятия, имитирующих функции органов чувств человека. Дисульфид молибдена (MoS_2) и другие двумерные материалы демонстрируют уникальные электронные, оптические и механические свойства, позволяющие конструировать многофункциональные датчики нового поколения. В статье рассматриваются физические принципы работы волоконных сенсоров на основе дисульфида молибдена MoS_2, их структурные особенности и механизмы преобразования физических воздействий в электрические сигналы. Вместе с тем уделяется внимание перспективам применения «умных волокон» в робототехнике, медицине и носимой электронике.

Ключевые слова: Двумерные материалы, дисульфид молибдена, волоконные датчики, многофункциональные сенсоры, наноматериалы, искусственные органы чувств.

Введение. Двумерные материалы, толщина которых составляет всего несколько атомных слоёв, обладают экстремально высоким соотношением площади поверхности к объёму. Это обстоятельство делает их исключительно чувствительными к внешним воздействиям. Дисульфид молибдена (MoS_2), состоящий из чередующихся слоёв атомов молибдена и серы, проявляет полупроводниковые свойства с шириной запрещённой зоны около 1,8 эВ [1] для монослоя (рисунок 1):

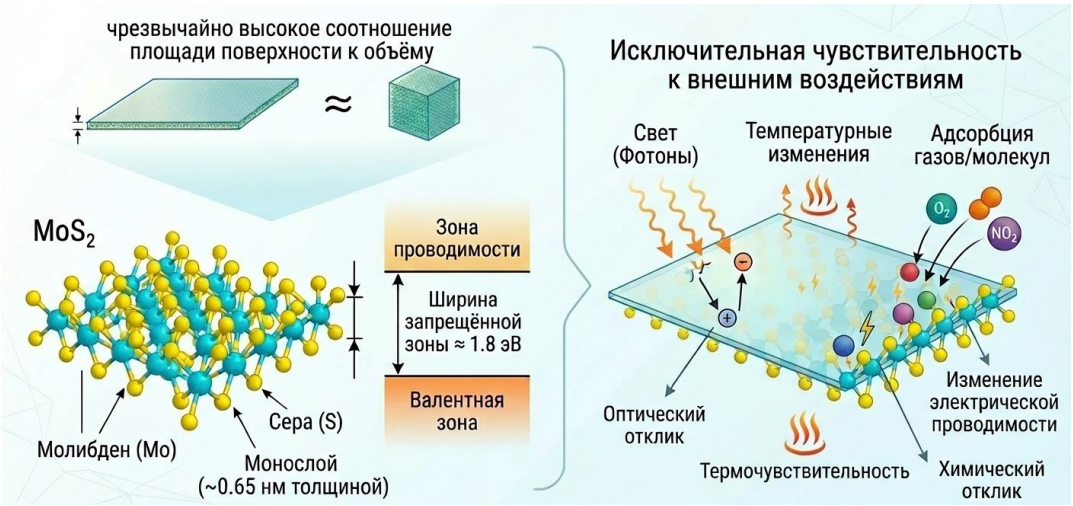


Рисунок 1 – Схема свойств и чувствительности атомарных слоёв Дисульфида молибдена (MoS_2)

Данная характеристика принципиально отличает дисульфид молибдена (MoS_2) от графена, не имеющего запрещённой зоны, что предоставляет дополнительные возможности для создания транзисторов и фотодетекторов.

Интеграция двумерных материалов в волоконные структуры позволяет создавать датчики, совмещающие высокую чувствительность с механической гибкостью, растяжимостью и малым весом. Такие системы способны работать в изогнутом состоянии, выдерживать многократные деформации и органично встраиваться в текстильные изделия. Актуальность развития подобных технологий обусловлена растущей потребностью в сенсорах для робототехники, медицинского мониторинга, «умной» одежды и промышленных систем контроля.

Основная часть. Уникальные сенсорные свойства дисульфида молибдена определяются его электронной структурой и особенностями межслоевого взаимодействия. В объёмном состоянии MoS_2 представляет собой непрямозонный полупроводник, однако при переходе к монослойной структуре происходит трансформация в прямозонный полупроводник с шириной запрещённой зоны 1,8-1,9 эВ. Это квантовомеханическое явление, обусловленное изменением симметрии кристаллической решётки, радикально влияет на оптические и электронные свойства материала.

Механизм тактильной чувствительности волоконных датчиков на основе MoS_2 реализуется через пьезорезистивный эффект [4] — изменение электрического сопротивления материала под действием механической деформации. При растяжении или сжатии волокна происходит изменение межатомных расстояний в кристаллической решётке MoS_2, что модифицирует структуру энергетических зон и подвижность носителей заряда. Экспериментальные исследования демонстрируют, что чувствительность таких датчиков может достигать значений gauge factor (коэффициент чувствительности тензорезистора) свыше 100, что превосходит характеристики традиционных металлических тензорезисторов на порядок величины.

Температурная чувствительность MoS_2-датчиков основана на термически активируемой проводимости полупроводника. С повышением температуры возрастает концентрация термически генерированных носителей заряда, что приводит к закономерному снижению электрического сопротивления материала. Температурный коэффициент сопротивления [2] дисульфида молибдена составляет величину порядка −0,5% на градус Цельсия, обеспечивая точность температурных измерений до десятых долей градуса. Данная характеристика позволяет использовать волоконные датчики для медицинского мониторинга температуры тела с высокой пространственной разрешающей способностью.

Химическая чувствительность двумерных материалов обусловлена адсорбцией молекул газов на поверхности кристаллической решётки.

Российские исследователи из Московского физико-технического института [3] продемонстрировали возможность детектирования концентраций аммиака [2] на уровне единиц ppb (англ. parts per billion, частей на миллиард) с использованием транзисторных структур на основе MoS_2. Такая чувствительность открывает перспективы создания портативных анализаторов для медицинской диагностики по составу выдыхаемого воздуха, экологического мониторинга и контроля промышленных процессов.

Оптические свойства MoS_2 также находят применение в волоконных сенсорных системах. Прямозонная структура монослоя обеспечивает эффективное поглощение и излучение света в видимом диапазоне с максимумами около 660 нм (красный свет) и 610 нм. Интеграция MoS_2 в волоконные световоды позволяет создавать комбинированные оптоэлектронные датчики, регистрирующие как механические деформации, так и изменения интенсивности светового потока.

Исследователи из РТУ МИРЭА [5] разработали фотодетекторы на основе полупроводниковых пленок из дисульфида молибдена (MoS_2) с высокой концентрацией дефектов. Подобные дефекты повышают чувствительность сенсоров к световому излучению, но значительно снижают скорость реагирования. Решением данной проблемы стали асимметричные плазмонные решётки. Они усилили поглощения света и добавили возможность различать поляризацию. Устройства демонстрируют впечатляющие характеристики: фотоотклик около 60 мА/Вт и чувствительность к поляризации света до 80%. Иссоедователи смогли объединить в одном устройстве ввысокую чувствительность, способность различать поляризацию и быстрое время реакции, что делает данные фотодетекторы перспективными для широкого спектра применений.

Принципиальным преимуществом двумерных материалов является возможность создания гетероструктур — многослойных композиций из различных двумерных материалов с комплементарными свойствами. Сочетание MoS_2 с графеном, гексагональным нитридом бора или другими дихалькогенидами переходных металлов позволяет конструировать сенсоры с программируемыми характеристиками и расширенным функционалом.

Двумерные дихалькогениды переходных металлов, в частности, сульфида молибдена MoS2, представляют собой особый класс слоистых материалов, в которых соседние слои связаны слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Это тонкие полупроводники, состоящие из переходного металла и халькогена. Один слой атомов металла располагается между двумя слоями атомов халькогена, в нашем случае халькоген — сера.

Критически важным аспектом практического применения является обеспечение стабильных электрических контактов к сенсорному элементу. Традиционные металлические электроды могут создавать механические напряжения в зоне контакта при деформациях волокна, приводя к деградации характеристик. Решением проблемы является использование проводящих полимерных композитов или жидкометаллических сплавов на основе галлия, сохраняющих проводимость при значительных деформациях.

Многофункциональность волоконных сенсорных систем достигается за счёт интеграции нескольких типов чувствительных элементов в единую структуру. Например, сочетание MoS_2-датчика деформации с терморезистивным элементом на основе углеродных нанотрубок и химического сенсора на базе проводящего полимера позволяет создать волокно, одновременно регистрирующее механические, температурные и химические воздействия. Селективность отклика обеспечивается применением методов машинного обучения для анализа многомерных сенсорных данных.

Перспективные направления фундаментальных исследований включают изучение квантовых эффектов в сверхтонких структурах MoS_2, разработку гетероструктур с программируемыми свойствами и создание биогибридных систем, сочетающих синтетические двумерные материалы с биологическими рецепторами.

Волоконные датчики на основе MoS_2 и других двумерных материалов представляют собой не просто усовершенствование существующих сенсорных технологий, а качественно новый класс устройств, открывающих путь к созданию многофункциональных искусственных систем восприятия. Ближайшие перспективы развития направления связаны с несколькими ключевыми областями применения.

В робототехнике «умные волокна» позволяют создавать искусственную кожу нового поколения, наделяющую роботов тактильной чувствительностью, необходимой для манипулирования хрупкими объектами и безопасного взаимодействия с людьми. Российские разработчики из Сколковского института науки и технологий создали прототип роботизированного захвата с волоконными MoS_2-датчиками, способного различать объекты по текстуре поверхности и температуре с точностью, приближающейся к человеческой. Такие системы критически важны для развития коллаборативной робототехники и автоматизации сложных сборочных операций.

Медицинские применения включают непрерывный мониторинг физиологических параметров пациентов, ранюю диагностику патологических состояний и контроль эффективности терапии. Волоконные датчики могут интегрироваться в бандажи, ортезы, хирургические шовные материалы, обеспечивая информацию о заживлении тканей, воспалительных процессах и механических нагрузках. Биосовместимость дисульфида молибдена, подтверждённая рядом исследований, создаёт предпосылки для разработки имплантируемых сенсорных систем длительного действия.

Промышленный мониторинг и обеспечение безопасности работников представляют ещё одну важную сферу применения. Интеллектуальная рабочая одежда, оснащённая волоконными датчиками, способна регистрировать опасные уровни механической нагрузки, температуры, вибрации и токсичных газов, своевременно предупреждая о рисках травматизма и профессиональных заболеваний. Экономический эффект от внедрения таких систем складывается из снижения производственного травматизма, повышения производительности труда и оптимизации технологических режимов.

Несмотря на впечатляющие успехи, ряд фундаментальных и прикладных проблем требует решения для широкомасштабного внедрения технологии. К числу основных вызовов относятся:

- обеспечение долговременной стабильности характеристик при воздействии влаги, кислорода и ультрафиолетового излучения;
- стандартизация методов производства и метрологического контроля волоконных датчиков;
- снижение себестоимости производства до уровня, конкурентоспособного с традиционными сенсорными технологиями;
- разработка эффективных методов обработки больших объёмов сенсорных данных в реальном времени;
- обеспечение кибербезопасности распределённых сенсорных сетей.

Перспективные направления фундаментальных исследований включают изучение квантовых эффектов в сверхтонких структурах MoS_2, разработку гетероструктур с программируемыми свойствами и создание биогибридных систем, сочетающих синтетические двумерные материалы с биологическими рецепторами.

Заключение. Волоконные датчики на основе дисульфида молибдена и других двумерных материалов представляют собой прорывную технологию, обеспечивающую создание многофункциональных сенсорных систем с характеристиками, недостижимыми для традиционных решений. Уникальное сочетание высокой чувствительности, механической гибкости, миниатюрности и энергоэффективности открывает широчайшие перспективы применения «умных волокон» в робототехнике, медицине, носимой электронике и промышленном мониторинге.

Физические принципы функционирования MoS_2-датчиков базируются на фундаментальных свойствах двумерных полупроводниковых структур — зависимости электронной структуры от механических деформаций, температуры и молекулярной адсорбции. Понимание этих механизмов позволило разработать различные архитектурные решения: от поверхностных покрытий до объёмных композитов, оптимизированные для конкретных применений.

Список использованных источников:

1. Электрические и оптоэлектронные свойства наноразмерных вертикальных нанолистов, изготовленных из дисульфида молибдена / С.Е. Александров, Ю. Хаттаб // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2023. – Т. 16. - № 1. – С. 24–32.

2. Газовый сенсор на основе композита MoS_2 / Шишин А.А. и др. // Химия твердого топлива, 2025. – №3. – С. 31–37.

3. Физики МФТИ разработали пленки MoS_2 [Электронный ресурс]. − Режим доступа: https://habr.com/ru/news/806559/– 2024 – Дата доступа: 26.02.2026.

4. Piezoresistivity in layered transition metal dichalcogenides / S. Manzeli, A. Allain, A. Ghadimi, A. Kis // Nature Communications, 2016. – Vol. 7, art. no. 10672. – URL: https://www.nature.com/articles/ncomms10672 – Дата доступа: 5.03.2026.

5. Гибкие сенсоры света на основе дисульфида молибдена / С.А. Лавров [и др.] // Optical Materials, 2025 – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925346724006359 – Дата доступа: 11.03.2026.

UDC 681.586:620.3

PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION OF FIBER SENSORS BASED ON MOLYBDENUM DISULFIDE (MOS_2)

Teslyonok A.V., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Goryachun N.V. – senior lecturer

Annotation. The development of fiber-based sensor technologies based on two-dimensional nanomaterials opens up revolutionary prospects for creating artificial perception systems that mimic the functions of human sensory organs. Molybdenum disulfide (MOS_2) and other two-dimensional materials exhibit unique electronic, optical, and mechanical properties that enable the design of next-generation multifunctional sensors. The article discusses the physical principles of operation of fiber sensors based on MOS_2, their structural features and mechanisms for converting physical effects into electrical signals. At the same time, attention is being paid to the prospects of using smart fibers in robotics, medicine, and wearable electronics.

Keywords: Two-dimensional materials, molybdenum disulfide, fiber sensors, multifunctional sensors, nanomaterials, artificial sensory organs

УДК 621.311.24:628.94

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ (НА ПРИМЕРЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СВЕТОДИОДНЫХ СИСТЕМ)

Сериков М. А., Тищенко А.М., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. физ. наук, доцент

Аннотация. В статье рассматривается экономическая эффективность применения возобновляемых источников энергии в современных реалиях. Проведен анализ ключевых методов оценки, включая расчет нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) и учет полных системных издержек. На конкретном примере – внедрении светодиодных систем освещения на промышленных объектах – показана связь между физическими процессами в полупроводниках и итоговыми финансовыми показателями (ROI, LCOE, совокупная стоимость владения). Отдельное внимание уделено особенностям развития ВИЭ в Республике Беларусь.

Ключевые слова. Возобновляемые источники энергии, экономическая оценка, LCOE, системные издержки, светодиодное освещение, энергоэффективность, промышленность, солнечная энергетика, ветроэнергетика, Республика Беларусь.

Введение. Вопросы экономической эффективности возобновляемой энергетики сегодня выходят на первый план. С одной стороны, технологии ВИЭ стремительно дешевеют, с другой – требуют пересмотра традиционных подходов к оценке затрат. Понимание реальной стоимости «зеленой» электроэнергии необходимо для грамотного планирования энергоперехода как в глобальном масштабе, так и на уровне отдельных предприятий и регионов. Особую актуальность эта тема приобретает в условиях роста тарифов на электроэнергию и ужесточения экологических требований.

В структуре энергопотребления промышленных предприятий освещение занимает заметную долю – порядка 18–20% от общего объема [1]. При этом традиционные источники света, такие как ртутные лампы (ДРЛ) и натриевые трубчатые лампы (ДНаТ), обладают рядом недостатков: высокое энергопотребление, сильный нагрев, содержание токсичных компонентов и быстрое падение светового потока со временем [1]. Попытки применить классические методы экономического анализа к проектам в области ВИЭ и энергоэффективности выявили их несовершенство – они не учитывают системные эффекты, внешние факторы и специфику структуры капитальных затрат. Это подтолкнуло исследователей к разработке более совершенных подходов.

Экономическая оценка ВИЭ представляет собой комплексную междисциплинарную задачу, объединяющую технические параметры (коэффициент использования установленной мощности, режимы работы, требования к резервированию) с инвестиционными показателями (капитальные и операционные затраты, ставки дисконтирования, сроки окупаемости). Конечная цель – определить реальную стоимость электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла установки, включая строительство, эксплуатацию и утилизацию.

В традиционной энергетике цена киловатт-часа во многом определяется стоимостью топлива. В возобновляемой энергетике картина иная: высокие первоначальные вложения (CAPEX) компенсируются низкими эксплуатационными расходами (OPEX), ведь энергия солнца, ветра или воды бесплатна. Массовый переход на светодиодное освещение позволяет сократить энергопотребление до 70% по сравнению с люминесцентными аналогами [1]. Однако для корректного сравнения ВИЭ с традиционной генерацией необходимо учитывать не только прямые затраты, но и системные издержки на интеграцию переменных источников в энергосистему, затраты на резервирование мощностей и экологические последствия [2].

Физические основы энергоэффективности светодиодов.

Светодиод работает на базе полупроводникового кристалла с p–n-переходом. Прохождение тока вызывает рекомбинацию электронов и дырок, в результате которой испускаются фотоны – возникает видимое свечение. В отличие от газоразрядных ламп, LED-системы обладают принципиально иными характеристиками. Эффективность источника света оценивается световой отдачей – отношением светового потока (в люменах) к потребляемой мощности (в ваттах). У ламп ДРЛ этот показатель составляет всего 33–46 лм/Вт, а с учетом загрязнения отражателей реальная эффективность через год падает до 20–23 лм/Вт [1]. Лампы ДНаТ показывают лучшую начальную отдачу (до 83 лм/Вт), но имеют низкий индекс цветопередачи, что ограничивает их применение в цехах с высокими требованиями к зрительной работе [1]. Современные промышленные светодиоды обеспечивают световую отдачу свыше 120–150 лм/Вт, а отдельные модели достигают 164 лм/Вт [1, 3]. К тому же направленность излучения LED позволяет свести к минимуму потери в оптической системе – ее КПД достигает 95–98%.

Еще один важный параметр – скорость деградации светового потока. У ДРЛ за первые три месяца падение составляет 30%, а за год – 40% [1]. Лампы ДНаТ за год теряют около 20% яркости [1]. У качественных светодиодов потери за первый год не превышают 2–4% [1]. Ресурс LED-светильников, определяемый по стандарту L70 (снижение светового потока до 70% от номинала), достигает 50–100 тысяч часов [1, 5]. Правда, этот показатель сильно зависит от температуры p–n-перехода: перегрев ускоряет деградацию кристалла и разрушение люминофора. Поэтому эффективный теплоотвод – обязательное условие долгой службы.

Поскольку светодиоды питаются постоянным током, им нужны специальные устройства – драйверы. Дешевые модели без коррекции коэффициента мощности (λ) искажают форму тока, снижая λ до 0,5 и ниже. Это ведет к росту реактивной мощности и дополнительным потерям в кабелях. Современные драйверы оснащаются активными корректорами, которые поднимают λ до 0,95–0,99 [3], уменьшая нагрузку на сеть и снижая пульсации света до безопасного уровня (менее 5%).

Методология экономической оценки.

Зачем вообще нужна детальная экономическая оценка ВИЭ? Во-первых, она позволяет объективно сравнить конкурентоспособность разных технологий в конкретных условиях. Во-вторых, помогает рассчитать полные приведенные затраты на производство энергии с учетом дисконтирования. В-третьих, служит основой для выработки мер господдержки и оптимизации структуры генерирующих мощностей.

Сегодня в мировой практике сложились два основных подхода: анализ нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) и концепция полных системных издержек. LCOE учитывает капитальные и операционные затраты, а также коэффициент использования установленной мощности. Для проектов по замене освещения применяют схожие показатели: совокупную стоимость владения (TCO), возврат инвестиций (ROI) и срок окупаемости.

Простой срок окупаемости T = K / D, где K – начальные вложения (стоимость оборудования и монтажа), D – ежегодная экономия от снижения энергопотребления и затрат на обслуживание [4]. В промышленных масштабах корректнее использовать дисконтированный срок окупаемости (DPP) и чистый дисконтированный доход (NPV), которые учитывают стоимость капитала во времени [4].

В формуле ежегодного дохода (D) ключевую роль, помимо снижения энергопотребления (в ваттах) в 3–4 раза, играет радикальное сокращение затрат на обслуживание. Промышленные цеха часто имеют высокие потолки, что усложняет замену ламп. Традиционные лампы ДРЛ требуют замены каждые 6 000 – 10 000 часов, люминесцентные – около 10 000 часов [1, 5]. Для замены осветительного оборудования на высоте требуется привлечение промышленного альпинизма или спецтехники. Для справки, стоимость работ указана по данным для РФ (в ценах 2025 года): замена одного светильника/лампы на высоте более 3 метров стоит от 350 руб. (около 12,5 бел. руб.), на высоте более 6 метров — от 500 руб. (около 18 бел. руб.), а свыше 9 метров — от 700 руб. (около 25 бел. руб.) за штуку [1]. Кроме того, отражатели традиционных светильников требуют частой протирки от производственной пыли (иначе светопотери достигают 50%) [1].

LED-светильники с герметичным корпусом (класс защиты IP66 и выше) и собственной оптикой не нуждаются в обслуживании на протяжении всего срока службы – 50–100 тысяч часов, что соответствует 12–20 годам работы в две смены [1]. Отсутствие затрат на высотные работы и закупку сменных ламп резко увеличивает D и сокращает срок окупаемости LED-проектов до 1–3 лет [4].

Применение интеллектуальных систем управления (датчики освещенности, протоколы DALI, 1–10V) позволяет дополнительно снизить энергопотребление на 40–80% [3]. Хотя такие решения удлиняют срок окупаемости до 8–9 лет из-за более высоких начальных инвестиций, они дают максимальную долгосрочную экономию и позволяют адаптировать освещение под биоритмы персонала.

Помимо проектного анализа, на макроуровне используются три ключевых показателя: LCOE (удельные затраты на производство), NPV (абсолютная эффективность) и IRR (внутренняя норма доходности). Концепция полных системных издержек добавляет к ним три группы параметров: затраты на балансировку сети и поддержание устойчивости, стоимость резервирования мощностей, а также внешние эффекты – экологические и социальные (снижение выбросов, уменьшение зависимости от импорта топлива). Выбор того или иного варианта развития энергосистемы всегда сопряжен с сопоставлением этих затрат и выгод.

С помощью сложных экономико-математических моделей было доказано, что традиционный показатель LCOE может недооценивать системно значимые технологии и переоценивать эффективность отдельных опций, поскольку игнорирует затраты на интеграцию переменных ВИЭ [5]. При доле ВИЭ в энергобалансе свыше 20–30% полная системная стоимость электроэнергии может значительно превышать «голый» LCOE из-за необходимости строить резервные мощности, модернизировать сети и внедрять накопители. Подход полной системной стоимости становится все более востребованным для создания сбалансированных и надежных энергосистем [5].

Суть этого подхода – учет всех издержек на производство, передачу, распределение и резервирование, а также требований к надежности. Он предполагает, что затраты на интеграцию ВИЭ

(модернизация сетей, балансировка, резервы) – не второстепенны, а составляют неотъемлемую часть реальной стоимости энергии в системах с высокой долей «зеленой» генерации [5].

Макроэкономические факторы развития ВИЭ.

Эффективность внедрения ВИЭ зависит не только от прямых технико-экономических показателей, но и от широкого спектра макроэкономических и институциональных факторов. Исследования на примере стран Евросоюза, где доля ВИЭ наиболее высока, показывают значимость неценовых драйверов. С помощью регрессионного анализа установлено, что ключевыми факторами, обеспечивающими развитие «зеленой» энергетики, являются: уровень коррупции (прозрачность институтов), наличие национальной правовой базы, объем выбросов парниковых газов, а также государственные расходы на научно-исследовательские работы [8]. Интересно, что цены на углеводороды, хоть и важны, не являются доминирующим фактором. Это подтверждает тезис о том, что для успешного энергоперехода необходима последовательная государственная политика, снижение инвестиционных рисков и поддержка инноваций, а не только надежда на высокие цены на газ или нефть [8]. Выпуск «зеленых» облигаций также становится действенным инструментом привлечения финансирования [8].

Яркая иллюстрация ограниченности традиционных методов планирования – масштабный блэкаут на Пиренейском полуострове 28 апреля 2025 года. Из-за высокой доли солнечной генерации (около 60% в момент аварии), низкой инерции инверторных источников и отсутствия эффективного управления реактивной мощностью произошел каскадный сбой мощностью 31 ГВт. Миллионы людей остались без электричества на срок до 16 часов, экономике был нанесен серьезный урон [5]. Этот случай показал, что системные издержки – не абстракция, а реальные риски, которые необходимо учитывать.

Региональный подход к оценке ВИЭ.

Эффективность возобновляемой энергетики сильно зависит от местных условий: климата, инфраструктуры, структуры существующей генерации. Поэтому глобальные методики вроде LCOE нужно адаптировать к конкретному региону. Ключевые понятия здесь – коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), себестоимость с учетом логистики и подключения к сетям, интеграционный потенциал энергосистемы. КИУМ отражает реальную выработку в данных климатических условиях и напрямую влияет на экономику проекта.

Региональное энергетическое планирование позволяет оценить целесообразность инвестиций в ВИЭ с учетом природных, инфраструктурных, экономических и социальных факторов. Такой подход уже доказал свою состоятельность: инвестиции в ВИЭ растут быстрее всего именно там, где есть благоприятные природные условия и последовательная господдержка.

Ситуация в Республике Беларусь.

Развитие ВИЭ в нашей стране имеет свою специфику. С одной стороны, нет собственных крупных запасов углеводородов и исторически высока зависимость от импорта газа. С другой – работает Белорусская АЭС мощностью 2,4 тыс. МВт, которая кардинально изменила структуру генерации. Тем не менее потенциал возобновляемых источников постепенно реализуется. На начало 2023 года суммарная мощность ВИЭ-установок достигла 631,5 МВт – это в 14 раз больше, чем в 2010 году. В структуре преобладает солнечная энергетика (43,2%), далее идут ветроэнергетика (19,3%), биоэнергетика (15,9%) и гидроэнергетика (15,2%) [7].

Важным инструментом государственного регулирования выступает система квотирования. В апреле 2024 года Республиканская межведомственная комиссия утвердила квоты на создание установок ВИЭ на период 2025–2029 годов общей электрической мощностью 43,186 МВт [7]. Распределение квот наглядно демонстрирует приоритеты энергетической политики: наибольший объем выделен для геотермальных установок и тепловых насосов (13,186 МВт) и установок на биомассе (11,28 МВт), что подчеркивает ставку на использование местных видов топлива, прежде всего древесины. Также предусмотрены квоты для биогазовых (10 МВт), ветро- (3 МВт), солнечных (1 МВт) и малых гидроэлектростанций (1 МВт). Это распределение не только стимулирует развитие конкретных технологий, но и дает бизнесу четкий сигнал о направлениях инвестиций [7].

Влияние систем накопления на тарифную политику.

В условиях энергетического перехода актуальной задачей для Беларуси становится разработка экономически обоснованных механизмов тарифного регулирования, учитывающих особенности интеграции ВИЭ. Как показывают исследования белорусских ученых, применение систем накопления энергии (СНЭ) способствует повышению эффективности использования генерирующих мощностей, снижению затрат на регулирование режимов и стабилизации оптовых цен на электроэнергию [8]. СНЭ позволяют сглаживать пиковые нагрузки и балансировать спрос и предложение, что критически важно при растущей доле переменных ВИЭ. Внедрение накопителей — это не просто технологическое решение, а инструмент экономической политики, позволяющий управлять структурой себестоимости электроэнергии и делать «зеленую» генерацию более предсказуемой для сети [8].

Объем производства первичной энергии из ВИЭ в валовом потреблении ТЭР в 2022 году составил 8,3%, к 2035 году планируется довести ее до 9% [7]. Промышленные предприятия Беларуси, особенно в АПК, где освещение потребляет до 20–25% электроэнергии [1], обладают высоким потенциалом для

внедрения светодиодных технологий. Это одно из самых быстро окупаемых направлений энергосбережения.

Рынок светодиодных решений: драйверы и барьеры.

Промышленный и коммерческий сегменты рынка LED-освещения Беларуси демонстрируют устойчивый рост, который, по прогнозам, продолжится до 2031 года [8, 9]. Ключевыми драйверами выступают государственные программы по энергоэффективности и растущий спрос предприятий на модернизацию. Наиболее востребованной продукцией в промышленности являются светильники типа «хай-бэй» (High Bay) для цехов с высокими потолками, а также линейные светильники и панели для офисных и складских помещений [9].

Помимо очевидных преимуществ (экономия электроэнергии до 80% при использовании систем с датчиками), важную роль играют неценовые факторы. Среди барьеров для ускоренного внедрения выделяются все еще относительно высокие первоначальные инвестиции, а также необходимость адаптации систем к местным условиям эксплуатации [8]. Однако развитие технологий, включая появление интеллектуальных (Smart LED) и IoT-совместимых систем, открывает новые возможности для тонкой настройки энергопотребления и интеграции освещения в общую систему управления предприятием [9].

Государственная политика в сфере ВИЭ строится на принципе экономической целесообразности: поддерживаются те технологии, которые могут конкурировать по цене с традиционной генерацией (с учетом дешевой атомной энергии). Приоритет отдается местным видам топлива (древесина) и тем ВИЭ, которые хорошо интегрируются в существующую энергосистему без резкого роста тарифов.

Подводя итог сравнению двух подходов – LCOE и полных системных издержек – можно сказать, что они дополняют друг друга. LCOE прост и удобен для первичного сравнения технологий, но не учитывает системные эффекты. Полная системная стоимость сложнее, требует больше данных, зато дает более объективную картину для долгосрочного планирования на национальном уровне.

Заключение.

Экономическая эффективность светодиодного освещения в промышленности подтверждается как физическими параметрами, так и расчетами. Благодаря высокой световой отдаче (свыше 120 лм/Вт), медленной деградации кристалла и качественным драйверам с корректором мощности LED-системы позволяют радикально сократить как прямые затраты на электроэнергию, так и косвенные расходы на обслуживание. Дисконтированный срок окупаемости таких проектов в среднем составляет 1–3 года [4].

В более широком контексте экономическая оценка ВИЭ и энергоэффективных решений остается активной областью исследований. Учет всех системных издержек и внешних эффектов – сложная, но необходимая задача для построения устойчивой энергетики будущего. Накопление практического опыта и совершенствование методик, включая концепцию полной системной стоимости, помогут принимать более взвешенные решения на всех уровнях – от отдельного предприятия до государства.

Список использованных источников

1. Промышленное LED-освещение: особенности выбора и окупаемость [Электронный ресурс] / Sea Light. – 2025. – Режим доступа: https://sea-light.ru/blog/promyshlennoe-led-osveshchenie/. – Дата доступа: 19.03.2026.

2. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2024 – International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2025 – 204 p.

3. LCM-40 LED драйвер с ККМ // Компэл [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.compel.ru/infosheet/MW/LCM-40. – Дата доступа: 17.03.2026.

4. Светодиодное освещение предприятия: полный расчет экономии и окупаемости // DL Group [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://deledzavod.ru/stati/svetodiodnoe-osveshhenie-predpriyatiya-polnyj-raschet-ekonomii-i-okupaemosti/. – Дата доступа: 17.03.2026.

5. UNECE and partners launch initiative to develop a full system cost approach to guide investments towards resilient and carbon-neutral electricity systems // United Nations Economic Commission for Europe [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://unece.org/climate-change/press/unece-and-partners-launch-initiative-develop-full-system-cost-approach-guide. – Дата доступа: 17.03.2026.

6. Quantified Carbon. Understanding the Full System Cost of the Electricity System – Study prepared for UNECE, 2025.

7. Belarus sets quotas for building installations that use renewable energy sources in 2025-2029 // BelTA – Belarusian Telegraph Agency. – 2 April 2024. – Режим доступа: https://eng.belta.by/economics/view/belarus-sets-quotas-for-building-installations-that-use-renewable-energy-sources-in-2025-2029-157209-2024/. – Дата доступа: 19.03.2026.

8. Кравченко В.В., Якимович Е.М. Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Часть 1 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2024. – Т. 67, № 3. – С. 236-250. – DOI:

9. Обзор рынка светодиодного освещения Республики Беларусь 2024-2031: аналитический отчет / 6Wresearch. – Нью-Дели, 2024. – 75 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.6wresearch.com/industry-report/belarus-lighting-market. – Дата доступа: 19.03.2026.

UDC 621.311.24:628.94

ECONOMIC ASSESSMENT OF THE USE OF ENERGY SOURCES (USING THE EXAMPLE OF INDUSTRIAL LED SYSTEMS)

Serikov M. A., Tishchenko A.M., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Savilova Yu.I. – Candidate of Physical Sciences. Associate Professor

Annotation. The article examines the economic efficiency of using renewable energy sources in modern realities. The analysis of key assessment methods, including the calculation of the normalized cost of electricity (LCOE) and accounting for total system costs, is carried out. Using a specific example – the introduction of LED lighting systems in industrial facilities – the relationship between the physical processes in semiconductors and the final financial indicators (ROI, LCOE, total cost of ownership) is shown. Special attention is paid to the peculiarities of renewable energy development in the Republic of Belarus.

Keywords. Renewable energy sources, economic assessment, LCOE, system costs, LED lighting, energy efficiency, industry, solar energy, wind energy, Republic of Belarus.

УДК 004.925.84:616-073.756.8

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ 3D-МОДЕЛЕЙ ЛЁГКИХ ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Еськов И.С., Сивицкий Р.Д., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье исследуются физические принципы работы технологии NFC, основанной на электромагнитной индукции. Рассмотрены параметры индуктивной связи между ридером и тегом, включая расчет коэффициента связи и ЭДС, а также методы модуляции данных. Особое внимание уделено применению технологии в бесконтактных платежных системах Республики Беларусь. Представлены результаты расчетов, подтверждающие эффективность передачи энергии. Определены перспективы развития NFC, включая интеграцию с инфраструктурой «умного города» и повышение безопасности транзакций.

Ключевые слова. компьютерная томография, трёхмерное моделирование, воксель, шкала Хаунсфилда, плотность ткани, сегментация лёгких, индекс низкой плотности, физиомные модели, конечно-элементное моделирование, 3D Slicer.

Фундаментальной основой построения трёхмерных моделей по данным компьютерной томографии (КТ) является преобразование серии аксиальных срезов в единый массив объёмных элементов — вокселей. Каждый воксель в этой модели характеризуется пространственными координатами (x, y, z) и числовым значением, соответствующим среднему коэффициенту линейного ослабления рентгеновского излучения в данном элементарном объёме ткани [1, 2]. Для удобства интерпретации эти значения переводятся в стандартизированную шкалу Хаунсфилда (HU — Hounsfield Units):

$$HU = 1000 \times \frac{\mu_{\text{tissue}} - \mu_{\text{water}}}{\mu_{\text{water}} - \mu_{\text{air}}}, \quad (1)$$

где (μ_{tissue}) – линейный коэффициент ослабления исследуемой ткани; (μ_{water}) – линейный коэффициент ослабления воды; (μ_{air}) – линейный коэффициент ослабления воздуха.

В этой шкале вода всегда соответствует 0 HU, воздух — -1000 HU, что обеспечивает сопоставимость результатов, полученных на разных томографах [2].

При стандартном напряжении на рентгеновской трубке (обычно 120 кВ) основным механизмом взаимодействия излучения с тканью лёгкого является комптоновское рассеяние, вероятность которого пропорциональна плотности вещества. Это позволяет установить прямую связь между значениями HU и физической плотностью ткани ρ в г/л:

=

Данное соотношение лежит в основе всех количественных измерений массы и объёма тканей по данным КТ [1, 3].

Пространственное разрешение трёхмерной модели определяется параметрами сканирования и реконструкции. При использовании стандартной матрицы реконструкции (512x512) и заданного размера поля обзора DFOV (display field of view) в миллиметрах, линейный размер вокселя в плоскости сканирования XY составляет:

Δ

Если толщина томографического среза равна d_z мм, то объём одного вокселя вычисляется в мм^3 как:

$$V_{\text{voxel}} = \Delta_{xy}^2 \times d_z = \left(\frac{DFOV}{512}\right)^2 \cdot d_z. \quad (4)$$

=

Ключевым требованием для построения качественных трёхмерных моделей является изотропность вокселя — равенство его линейных размеров во всех трёх измерениях $\Delta_{xy} = d_z$. Современные

мультидетекторные КТ-сканеры способны обеспечить изотропное разрешение до 0,5 мм при сканировании всего объёма грудной клетки за одну задержку дыхания (менее 10 секунд), что позволяет визуализировать бронхи до 6-го поколения и мелкие структурные элементы паренхимы [1].

После сегментации — выделения лёгочной ткани из окружающих анатомических структур (грудная стенка, средостение, диафрагма) с использованием алгоритмов глубокого обучения — трёхмерная модель становится основой для объективных количественных измерений [4]. Общий объём лёгких получается суммированием объёмов всех вокселей, отнесённых к лёгочной ткани:

$$V_{\text{lung}} = \sum_{i=1}^{N} V_{\text{voxel}}^{(i)}\ , \tag{5}$$

где N – общее количество вокселей в сегментированной области; V_{voxel} – объём одного вокселя.

Зная плотность каждого вокселя ρ_i г/л, можно вычислить массу в граммах лёгочной ткани:

$$M_{\text{lung}} = \sum_{i=1}^{N} \rho_i \cdot V_{\text{voxel}}^{(i)}\ , \tag{6}$$

где ρ_i – плотность i-го вокселя; $V_{\text{voxel}}^{(i)}$ – объем i-го вокселя; N – общее количество вокселей в сегментированной области.

Гистограммный анализ распределения значений HU среди всех вокселей лёгких позволяет получать клинически значимые биомаркеры. Для оценки эмфизематозных изменений используется индекс низкой плотности — доля вокселей со значением HU ниже порогового -950 HU, что соответствует участкам разрушения лёгочной ткани:

$$= \text{количество вокселей} \leq$$

где N – общее количество вокселей в сегментированной области.

Данный порог был установлен эмпирически и валидирован корреляцией с патоморфологическими данными [5]. Для оценки интерстициальных изменений (фиброза, воспаления) используется доля вокселей в диапазоне повышенной плотности от -600 HU до -250 HU:

$$= \text{количество вокселей} \leq$$

где N – общее количество вокселей в сегментированной области.

Другим важным показателем является 15-й перцентиль Perc15 — такое значение HU, ниже которого находятся ровно 15% всех вокселей лёгких. Уменьшение Perc15 свидетельствует о прогрессировании эмфиземы, увеличение характерно для фиброзных изменений [1, 6].

Современным развитием методов 3D-моделирования является построение физиомных моделей лёгкого, интегрирующих анатомическую информацию с биомеханическими и физиологическими закономерностями [7].

Исходными данными служат: сегментированная трёхмерная модель лёгких; трахеобронхиальное дерево, представленное в виде соединённых цилиндрических элементов; сосудистая сеть (лёгочные артерии и вены).

На основе этой геометрии строится конечно-элементная модель, описывающая деформацию лёгочной ткани при дыхании. Математически это описывается уравнениями механики сплошных сред. Для оценки региональных изменений объёма используется якобиан деформации — мера локального расширения или сжатия ткани:

$$J = \det\left(\frac{\partial \Phi}{\partial X}\right),$$

где Φ — отображение, сопоставляющее точку на вдохе её положению на выдохе.

Значения $(J > 1)$ соответствуют локальному расширению, $(J < 1)$ — сжатию. Эта величина коррелирует с региональной вентиляцией и эластичностью ткани [8].

Моделирование перфузии основано на законах гидродинамики (течение Пуазёйля в упругих сосудах) с учётом архитектоники сосудистого русла. Моделирование газообмена учитывает диффузию кислорода и углекислого газа через альвеолярно-капиллярную мембрану. Такой комплексный подход позволяет прогнозировать функциональные нарушения (например, риск гипоксемии при тромбоэмболии лёгочной артерии) точнее, чем простая оценка объёма поражения по данным КТ [7, 9].

Разработанные математические методы реализованы в специализированном программном обеспечении, интегрированном с больничными информационными системами (PACS, RIS). Это обеспечивает

автоматическое извлечение количественных показателей из рутинных КТ-исследований в режиме, близком к реальному времени, и их включение в протоколы описания [1].

В этих специализированных программных продуктах можно строить модели не только легких, но и других структур, например, костей. В приложении 3D Slicer нами были получены модели костей, опухоли, по которым мы сделали заготовки для отливки импланта из биосовместимых материалов.

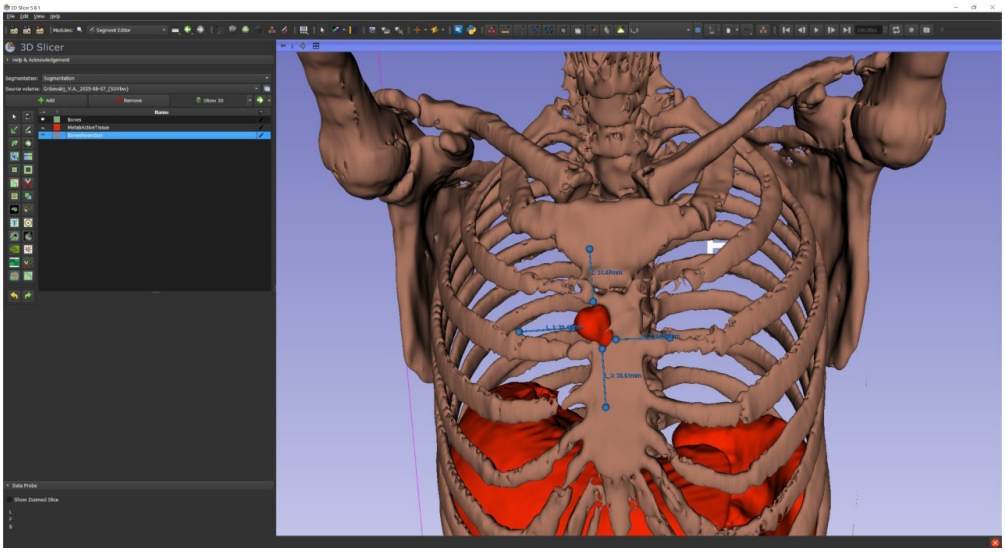


Рисунок 1 – Пример построения костной ткани

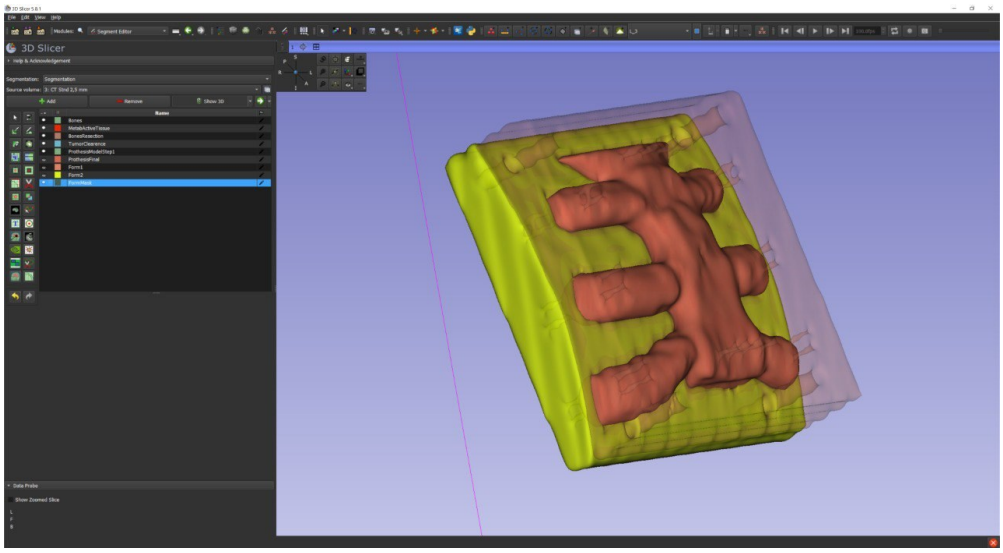


Рисунок 2 – Пример построения модели для отливки импланта

Список использованных источников:

1. Newell, J. D. Developing the Digital Lung: From First Lung CT to Clinical AI. The Development of Quantitative X-ray Computed Tomography of Diffuse Lung Disease Through the Use of Artificial Intelligence / J. D. Newell. – Philadelphia: Elsevier, 2024. – 152 p.

2. Hounsfield, G. N. Nobel Award address. Computed medical imaging / G. N. Hounsfield // Medical Physics. – 1980. – Vol. 7, № 4. – P. 283–290.

3. Bushberg, J. T. The Essential Physics of Medical Imaging / J. T. Bushberg, J. A. Seibert, E. M. Leidholdt Jr., J. M. Boone. – 3rd ed. – Philadelphia: Wolters Kluwer, Lippincott Williams & Wilkins, 2012. – 1030 p.

4. Mansoor, A. Segmentation and image analysis of abnormal lungs at CT: current approaches, challenges, and future trends / A. Mansoor [et al.] // Radiographics. – 2015. – Vol. 35, № 4. – P. 1056–1076.

5. Gevenois, P. A. Comparison of computed density and macroscopic morphometry in pulmonary emphysema / P. A. Gevenois [et al.] // American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 1995. – Vol. 152, № 2. – P. 653–657.

6. Coxson, H. O. Quantification of idiopathic pulmonary fibrosis using computed tomography and histology / H. O. Coxson [et al.] // American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 1997. – Vol. 155, № 5. – P. 1649–1656.

7. Tawhai, M. H. The lung physione and virtual patient models: from morphometry to clinical translation / M. H. Tawhai, A. R. Clark, J. G. Chase // Morphologie. – 2019. – Vol. 103, № 343. – P. 131–138.

8. Bodduluri, S. Biomechanical CT metrics are associated with patient outcomes in COPD / S. Bodduluri [et al.] // Thorax. – 2017. – Vol. 72, № 5. – P. 409–414.

9. Clark, A. R. Lack of functional information explains the poor performance of clot load scores at predicting outcome in acute pulmonary embolism / A. R. Clark [et al.] // Respiratory Physiology & Neurobiology. – 2014. – Vol. 190. – P. 1–13.

UDC 004.925.84:616-073.756.8

MATHEMATICAL AND THEORETICAL FOUNDATIONS OF BUILDING 3D LUNG MODELS BASED ON COMPUTER TOMOGRAPHY DATA

Yeskov I. S., Sivitski R. D., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Savilova Y.I. – Candidate of Technical Sciences

Annotation. The principles of constructing three-dimensional models from CT data are considered: conversion of axial slices into voxel arrays, conversion to the Hounsfield scale, correlation between HU and tissue density. Spatial resolution, voxel isotropy, lung segmentation methods and histogram analysis (LAA950, HAA, Perc15) are described. Approaches to building physiome models integrating anatomy with respiratory biomechanics, perfusion and gas exchange are presented. The implementation of methods in specialized software for extracting quantitative biomarkers and creating models of bone structures is noted.

Keywords. computed tomography, three-dimensional modeling, voxel, Hounsfield scale, tissue density, lung segmentation, low attenuation area, physiome models, finite element modeling, 3D Slicer..

УДК 535.8:620.3

МЕМРИСТОРЫ: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ПРИМЕНЕНИЕ

Заяц И.Г., Отливщиков Ф.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1], г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель

Аннотация. Мемристоры – это перспективные элементы микро- и наноэлектроники. Они одновременно выполняют функции памяти и обработки информации. Работа основана на изменении сопротивления в зависимости от количества прошедшего электрического заряда. В основе физических механизмов лежит движение ионов и дефектов кристаллической решётки, например кислородных вакансий, в активном слое под действием электрического поля. Мемристоры энергонезависимы и обеспечивают высокую плотность хранения. Кроме того, они способны принимать множество промежуточных состояний. Поэтому их рассматривают как ключевые элементы для нейроморфных вычислений, систем искусственного интеллекта и архитектур обработки данных в памяти.

Ключевые слова: мемристор, мемристивные системы, нейроморфные вычисления, резистивная память, нанотехнологии.

Введение. В классической архитектуре компьютеров процессор и память разделены. Это создает при работе нейросетей огромные задержки и энергозатраты. Решением выступает мемристор схожий по работе с синапсами мозга. Это пассивный элемент, объединяющий хранение и обработку данных, который является аналогом структуры, через которую наши нейроны передают сигналы друг другу. Его сопротивление зависит от заряда, прошедшего через него. Мемристоры открывают новые горизонты в электронике за счёт сочетания памяти и обработки в одном устройстве. Они реализуют идею «четвёртого» пассивного элемента схем, предсказанного Л. Чуа в 1971 году, и находят практическую реализацию в виде тонкопленочных резистивных устройств.

Основная часть. Математическая суть мемристора Л.Чуа состоит в связи потока Φ и заряда q: $d\Phi = M(q)\,dq$. Уравнение закона Ома для него выглядит как $v = M(q)i$, где $M(q)$— мемрезистанс, то есть сопротивление, зависящее от истории тока. Технические преимущества таких элементов включают энергонезависимость, энергоэффективность, высокую плотность и способность принимать множество значений. Обработка информации в одном месте делает их идеальными для нейросетей.

Мемристивность $M(q)$ — это уникальное свойство, которое определяет мгновенное сопротивление элемента в зависимости от всего накопленного заряда, прошедшего через него ранее. Чтобы реализовать этот эффект на практике, используется особая физическая структура, например, классическая наноразмерная гетероструктура Pt/TiO_2/TiO_{2-x}/Pt. В её основе лежит активный оксидный слой, надежно зажатый между двумя металлическими электродами (рисунок 1). Главным «действующим лицом» в этом слое выступает кислородная вакансия — точечный дефект кристаллической решётки, который возникает при малейшем отклонении от идеальной стехиометрии материала. В слое диоксида титана эти микроскопические пустоты ведут себя как классические донорные примеси: они отдают электроны и радикально повышают концентрацию свободных носителей заряда, локально превращая диэлектрик в проводник.

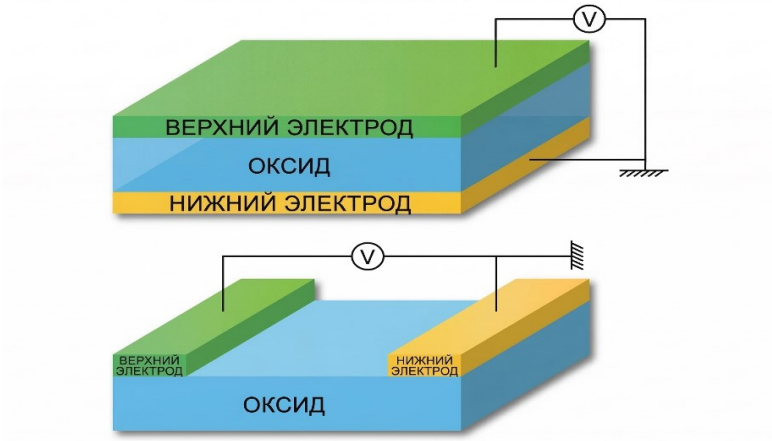


Рисунок 1 – Схематическая структура тонкопленочного резистивного мемристора

Механизм переключения заключается в том, что под действием внешнего электрического поля происходит электромиграция вакансий. В состоянии низкого сопротивления вакансии смещаются в чи-

стый слой TiO2, формируя проводящие каналы или расширяя область проводимости. В состоянии высокого сопротивления обратный дрейф вакансий восстанавливает диэлектрический барьер. Низкая подвижность ионов в твердом теле «замораживает» память, обеспечивая энергонезависимое хранение состояния (рисунок 2).

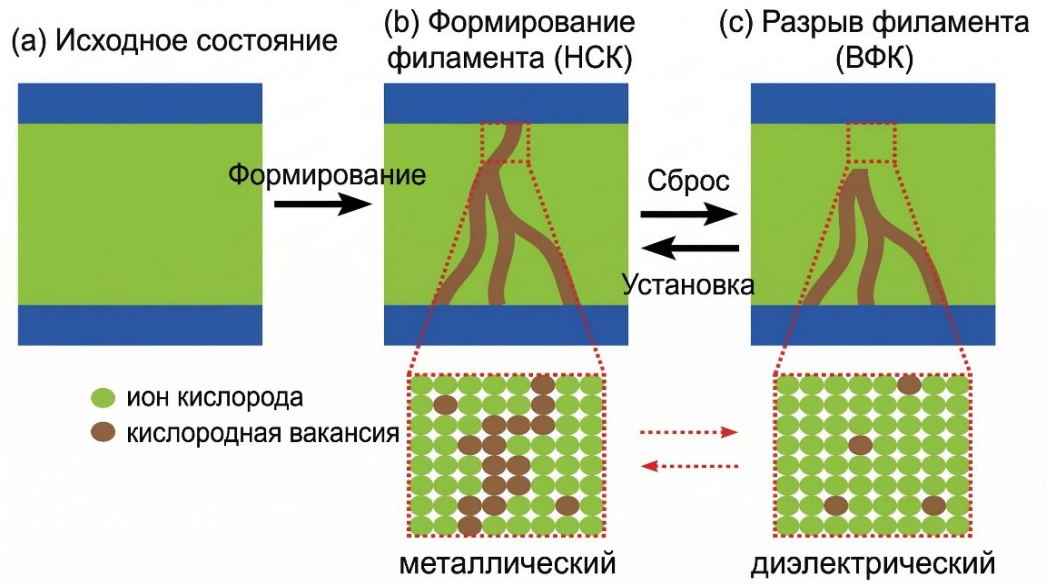


Рисунок 2 – Процесс формирования и разрушения проводящих нитей в мемристоре

Для интеграции мемристоров в вычислительные системы используются решетчатые структуры пересекающихся проводников. В такой архитектуре мемристоры находятся в точках пересечения горизонтальных и вертикальных линий, что позволяет выполнять матричные операции прямо на аппаратном уровне. Благодаря законам Кирхгофа и Ома токи суммируются параллельно, что исключает задержки, возникающие при передаче данных из оперативной памяти в процессор. Это особенно эффективно для работы глубоких нейронных сетей

Важным этапом развития технологии стало создание адаптивных систем, которые способны к самообучению на месте. В отличие от классических моделей, где веса рассчитываются на суперкомпьютерах и затем копируются в чип, мемристорные массивы позволяют корректировать проводимость ячеек непосредственно в процессе работы устройства, имитируя механизмы синапсов. Это достигается за счет использования эффектов пластичности, зависящей от времени прихода импульсов, где изменение веса синапса зависит от разницы во времени между импульсами на входном и выходном электродах. Такие системы демонстрируют высокую устойчивость к сбоям и способны функционировать в условиях неопределенности, что делает их незаменимыми для автономных роботов и сенсорных сетей граничных вычислений.

Также, помимо классических оксидных вариантов, существуют и альтернативные физические реализации мемристоров. В устройствах на основе электрохимической металлизации активным слоем выступает полимер с внедренными наночастицами металлов, таких как серебро (Ag) или медь (Cu). Под действием электрического поля эти ионы мигрируют, выстраивая сквозь диэлектрик устойчивые токопроводящие мостики.

Другой подход опирается на эффект Мотта и фазовые переходы: здесь переключение происходит благодаря резкому скачку состояния материала (переход от диэлектрика к металлу). Это позволяет устройству генерировать короткие импульсы, поразительно схожие со спайками биологических нейронов. Передовые разработки также задействуют 2D-материалы для филигранного управления проводимостью через атомную перестройку кристаллической решетки, а также методы оптической коммутации, где состояния переключаются светом. Независимо от конкретной архитектуры, механизм памяти всегда сводится к «замораживанию» распределения ионов и заряженных дефектов после снятия напряжения. Именно этот принцип надежно гарантирует строгую энергонезависимость устройства.

Для моделирования мемристорных структур применяются комплексные подходы, варьирующиеся от анализа фундаментальных физических явлений, таких как дрейф ионов, диффузия и тепловые эффекты, до построения абстрактно-математических моделей, использующих системы уравнений и аналитические решения для описания динамики внутренних состояний и вольт-амперных характеристик. Симуляционные модели позволяют прогнозировать функциональное поведение элементов в различных эксплуатационных условиях с учетом их электрофизических параметров, при этом анализ ВАХ выявляет характерную особенность: при воздействии высокочастотных сигналов инерционность внутренних процессов препятствует изменению состояния устройства, в результате чего устройство ведёт себя почти как линейный резистор.

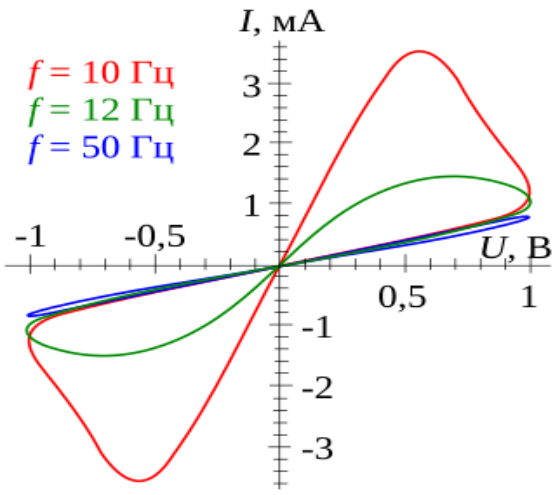


Рисунок 3 – ВАХ идеального мемристора

Важнейшей физической моделью является модель линейного дрейфа, предложенная для TiO2-мемристора: она описывает равномерное смещение границы между проводящей и непроводящей областями материала при напряжении. Мемристор Чуа не был реализован полностью, поэтому большинство современных устройств относятся к более общей категории мемристивных систем.

Инновации последних лет 2020–2024 включают создание гибридных светочувствительных сенсоров на базе перовскитов, имитирующих сетчатку глаза, а также ионно-жидкостных мемристоров. Использование материалов на базе NbO_2, который позволяет создавать биосовместимые интерфейсы для связи с живыми нейронами. В рамках нейроморфных проектов (таких как «Мозг на чипе» от MIT) созданы прототипы, распознающие образы с минимальными энергозатратами. Мемристоры позволяют переносить вычисления в память и также создавать адаптивную электронику для умных датчиков. Остаются лишь технические вызовы: необходимость повышения надежности и стабильности переключений за счет устранения дефектов и изменчивости характеристик материалов.

Заключение. Мемристоры открывают принципиально новые горизонты в микро- и наноэлектронике, бесшовно сочетая энергонезависимую память и обработку информации в одном физическом устройстве. За последние годы наука добилась глубокого понимания ключевых физических механизмов работы этих устройств — от дрейфа ионов до сложных фазовых переходов. Эти компоненты обещают существенно снизить энергопотребление вычислительных систем, особенно в задачах искусственного интеллекта, где они выступают в роли аппаратных «синапсов». Несмотря на то, что перед индустрией ещё стоят серьёзные вызовы, требующие улучшения повторяемости переключений и борьбы с шумовыми дефектами материалов, уже очевидно, что мемристорные системы формируют будущее адаптивной электроники и архитектур вычислений «в памяти».

Список использованных источников:

1. Chua L. O. Memristor — The Missing Circuit Element // IEEE Transactions on Circuit Theory. — 1971. — Vol. CT-18, No. 5. — P. 507–519. (Фундаментальная база из раздела 1 и 2).

2. Zidan M. A., Strachan J. P., Lu W. D. The future of electronics based on memristive systems // Nature Electronics. — 2018. — Vol. 1. — P. 22–29. (Обоснование перспектив и архитектур из разделов 5 и 6).

3. Ерохин В. В. Полимерные мемристоры // Физика и техника полупроводников. — 2020. (Источник для раздела о полимерных и электрохимических мемристорах).

4. Что такое мемристор: принцип действия, модели, применение. РБК Тренды. [Электронный ресурс] URL: https://trends.rbc.ru/trends/innovation/ (Общий обзорный материал для ВАХ и мод)

UDC 535.8:620.3

MEMRISTORS: PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION AND APPLICATIONS

Zayats I.G., Otdelivshchikov F.V., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Goryachun N.V. – senior lecturer

Annotation. Memristors are promising components in micro- and nanoelectronics. They simultaneously perform the functions of memory and information processing. Their operation is based on a change in resistance depending on the amount of electric charge that has passed through. The physical mechanisms are based on the movement of ions and defects in the crystal lattice, such as oxygen vacancies, in the active layer under the influence of an electric field. Memristors are non-volatile and provide high storage density. In addition, they are capable of assuming a multitude of intermediate states. Therefore, they are considered key elements for neuromorphic computing, artificial intelligence systems, and in-memory data processing architectures.

Keywords: memristor, memristic systems, neuromorphic computing, resistive memory, nanotechnology.

УДК 620.22:667.633.26

КАПИЛЛЯРНОЕ САМОЗАЛЕЧИВАНИЕ В ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ПОКРЫТИЯХ: КИНЕТИКА ЗАПОЛНЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН НА ПРИМЕРЕ ЛАКОВ

Ребковец И.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель

Аннотация. Изучена кинетика капиллярного самозалечивания микротрещин в полиуретановых лаках. Выявлено, что восстановление определяется капиллярным давлением и диффузией. Показана роль физических параметров в скорости процесса.

Ключевые слова: капиллярное самозалечивание полиуретановые покрытия, микротрещины, капиллярное давление, диффузия.

Введение. Полиуретановые лаки широко применяются в различных отраслях промышленности благодаря высокой прочности, устойчивости к коррозии и защите от внешних воздействий. В автомобилестроении и аэрокосмической промышленности мелкие царапины и микротрещины нарушают целостность лакового слоя и служат очагами дальнейшего разрушения и коррозии, что снижает срок службы конструкций и увеличивает затраты на обслуживание. Разработка самовосстанавливающихся полимерных покрытий представляет собой перспективное направление, способное существенно уменьшить эти риски: такие покрытия восстанавливают целостность поверхности за счёт встроенных физических механизмов: возникновение капиллярного давления, втягивание подвижной фазы в трещину, заполнение трещины жидкой фазой, диффузионная стадия процесса, возвращение поверхности к равновесной фазе. С точки зрения физики появление микротрещины сопровождается увеличением площади поверхности раздела, что приводит к росту свободной энергии системы. Полимерное покрытие стремится минимизировать эту энергию, поэтому процессы, уменьшающие площадь поверхности, оказываются термодинамически выгодными. Это создает естественную предпосылку для самопроизвольного втягивания жидкой фазы в дефект [2].

Основная часть. При образовании микротрещины поверхность лака становится искривленной, и под такой поверхностью возникает дополнительное давление, связанное с поверхностным натяжением. Это давление описывается формулой Лапласа, которая устанавливает прямую зависимость между величиной давления и поверхностным натяжением, а также обратную зависимость от радиуса кривизны. Для узкой щели с эффективным радиусом кривизны микротрещины r

$$\Delta P = (2\gamma/r), \tag{1}$$

где γ-поверхностное натяжение.

Чем меньше r, тем больше давление (в микротрещинах оно может достигать десятков килопаскалей). Это давление затягивает подвижную фазу внутрь дефекта и запускает процесс “капиллярного самозалечивания”. В микротрещинах радиус может достигать десятков нанометров, что приводит к появлению значительных капиллярных сил, сравнимых с внутренними механическими напряжениями в полимерной матрице. Такое давление играет ключевую роль в начальной стадии самозалечивания: оно обеспечивает втягивание подвижной низковязкой фазы в дефект, запуская процесс заполнения. Важно отметить, что даже небольшое количество подвижной фазы способно обеспечить заметный эффект восстановления, поскольку капиллярные силы действуют на очень малых масштабах и проявляют себя особенно сильно в узких и острых трещинах. Чем острее дефект, тем выше градиент давления и тем быстрее начинается процесс заполнения. Дополнительное понимание природы капиллярного давления можно получить, рассмотрев численные оценки для типичных покрытий. Поверхностное натяжение таких материалов составляет 0.03–0.04 Н /м. Если принять радиус кривизны микротрещины 50нм, что характерно для острых дефектов, то по формуле Лапласа [1] $\Delta P = \left(\frac{2\gamma}{r}\right) \approx \frac{2 \cdot 0.035}{50 \cdot 10^{-9}} \approx 1.4 \cdot 10^{6}\text{Па}$.

Полученное значение соответствует давлению порядка 14 атмосфер. Такие величины сравнимы с механическими напряжениями в полимерных материалах, что объясняет высокую скорость втягивания низковязкой фазы в дефект. Это объясняет, почему даже небольшое количество подвижной фазы способно обеспечить заметный эффект самозалечивания.

Подвижная фаза представляет собой часть материала, способную перемещаться относительно неподвижной полимерной матрицы. Она может быть жидкой или газообразной, однако её ключевая характеристика заключается не в агрегатном состоянии, а в способности течь, мигрировать и заполнять дефекты под действием внутренних физических сил. В полиуретановых покрытиях подвижная фаза

обычно представлена низковязкими компонентами, которые остаются в структуре лака после отверждения. Эти компоненты не образуют жёсткой трёхмерной сетки и сохраняют возможность перемещаться как под действием внешних факторов, так и под влиянием возникающего капиллярного давления. Важно подчеркнуть, что подвижная фаза не обязательно является отдельной жидкостью в привычном понимании — нередко это фракция полимера с повышенной сегментальной подвижностью, способная реагировать на появление микротрещин и втягиваться в них, обеспечивая начальную стадию самозалечивания.

Под действием капиллярного давления подвижная фаза начинает перемещаться в сторону дефекта, стремясь заполнить образовавшийся объём. Скорость этого процесса определяется балансом между капиллярным давлением и вязким сопротивлением. Чем ниже вязкость подвижной фазы, тем быстрее она втягивается в микротрещину. Таким образом, вязкость является одним из ключевых параметров, определяющих эффективность самозалечивания.

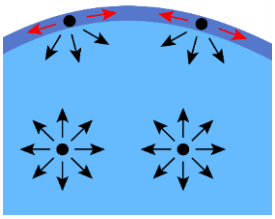


Рисунок 3 – Схематическое изображение сил, действующих на молекулы в объёме жидкости и на её поверхности.

Неподвижная фаза — это часть материала, которая остается фиксированной и не перемещается. В полиуретановых покрытиях неподвижной фазой является твердая полимерная матрица, обеспечивающая механическую прочность и удерживающая подвижную фазу внутри структуры

Подвижная фаза отличается от жидкой тем, что жидкая фаза определяется термодинамическим состоянием вещества: малой сжимаемостью, наличием поверхностного натяжения и способностью к внутренней диффузии, но при этом жидкость может находиться в состоянии покоя и не иметь макроскопического движения. Подвижная фаза-динамическое состояние вещества, при котором в жидкости возникает ненулевая скорость переноса под действием физических градиентов (давления, концентрации, капиллярных сил), и она участвует в реальном массопереносе. То есть жидкая фаза описывает структуру и свойства вещества, а подвижная фаза - его кинетическое поведение, когда жидкость не просто существует, а движется относительно другой фазы и выполняет работу по переносу веществ

В полиуретановом лаке всегда есть подвижная низковязкая фаза. Под действием капиллярного давления скорость затягивания подвижной фазы в микротрещину обратно пропорционально вязкости, т. е.

$$v \sim \Delta P/\eta \tag{2}$$

Подвижная фаза заполняет объём дефекта, выравнивая поверхность. Происходит сглаживание краев, уменьшение глубины трещины.

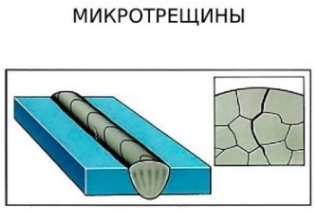


Рисунок 2 – Заполнение микротрещины подвижной фазой на стадии самозалечивания

Диффузия представляет собой самопроизвольное перемещение молекул из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией. После того как капиллярное давление втягивает подвижную фазу в микротрещину, начинается диффузионная стадия восстановления. На этом этапе молекулы низковязкого компонента постепенно распространяются в полимерной матрице, выравнивая концентрацию и обеспечивая релаксацию структуры покрытия. Характерное время этого процесса определяется выражением:

$$t \sim L^2/D, \tag{3}$$

где t– характерное время диффузии, L – размер дефекта, а D – коэффициент диффузии.

В полимерных материалах диффузия идет медленно при комнатной температуре, но существенно ускоряется при нагреве, что повышает эффективность самозалечивания.

Даже после того, как трещина была заполнена подвижной фазой, структура покрытия остаётся неоднородной до тех пор, пока молекулы низковязкого компонента не распределятся равномерно по объёму

полимера. Только после завершения диффузионного выравнивания поверхность возвращается в состояние, близкое к исходному, а свободная энергия системы уменьшается. Это подчёркивает, что длительность диффузионной стадии напрямую зависит от размеров дефекта и коэффициента диффузии материала, а значит, от физических свойств самого покрытия и условий его эксплуатации.

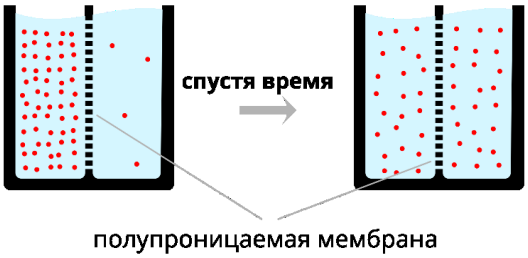


Рисунок 3 – Диффузионное выравнивание концентрации подвижной фазы: переход молекул из области высокой концентрации в область низкой.

После заполнения и диффузионного выравнивания поверхность становится гладкой, свободная энергия поверхности уменьшается, система приходит в равновесное состояние, в итоге трещина либо полностью исчезает, либо становится почти незаметной [2].

Капиллярное самовосстановление применяется во многих современных полиуретановых покрытиях. В автомобильных лаках позволяет сглаживать мелкие царапины, в защитных пленках для электроники повышает стойкость сенсорных экранов к микроповреждениям, в аэрокосмической промышленности этот метод снижает риск коррозии и продлевает срок службы, в промышленных полиуретановых полах уменьшает видимость микротрещин [3].

Капиллярное самозалечивание относится к физическим механизмам восстановления, в отличие от химических методов, основанных на обратимых ковалентных связях или микрокапсулах с отверждающими агентами. Его преимущество заключается в том, что процесс запускается автоматически при проявлении дефекта и не требует внешнего инициатора. Однако эффективность капиллярного механизма ограничена количеством подвижной фазы в структуре покрытия. В отличие от микрокапсул, которые могут обеспечивать многократное восстановление, капиллярное самозалечивание работает до тех пор, пока в материале присутствует достаточный объем низковязкого компонента. Тем не менее, сочетание капиллярного механизма с химическими методами
позволяет создавать покрытия с повышенной долговечностью и способностью к многократному восстановлению.

Заключение. Капиллярное самовосстановление в полиуретановых покрытиях основано на фундаментальных физических процессах, связанных с поверхностным натяжением, кривизной микротрещин, вязкостью подвижной фазы и коэффициентом диффузии. Возникновение капиллярного давления, описываемого формулой Лапласа, является ключевой движущей силой обеспечивающей втягивание подвижной низковязкой фазы в область дефекта. На ранней стадии скорость заполнения определяется балансом между этим давлением и вязким сопротивлением. На поздней стадии доминирует диффузионный процесс, который обеспечивает окончательное выравнивание структуры и релаксацию покрытия.

Таким образом, полиуретановые лаки демонстрируют способность к частичному или полному восстановлению структуры и поверхности, особенно при повышенных температурах, когда возрастает подвижность сегментов полимера и ускоряются диффузионные процессы. Это делает капиллярное самозалечивание перспективным механизмом повышения долговечности защитных покрытий и снижения эксплуатационных затрат в промышленности. Несмотря на определенные ограничения, связанные с конечным количеством подвижной фазы, данный механизм остается одним из наиболее простых, надежных и естественно, запускающихся способов восстановления структуры покрытия.

Список использованных источников:

1. Формула Лапласа [Электронный ресурс]. −Режим доступа: https://studfile.net/preview/8634968/page:2//– Дата доступа:02.03.26

2. Самовосстанавливающиеся полимерные покрытия: механизмы и применения на защитных и биофункциональных интерфейсах [Электронный ресурс]. −Режим доступа: https://www.mdpi.com/2073-4360/17/23/3154? /– Дата доступа:07.03.26

3.Разработка самовосстанавливающегося полиуретана и его применения в гибких электронных устройствах: обзор [Электронный ресурс]. −Режим доступа: https://www.mdpi.com/2073-4360/17/17/2274? /– Дата доступа: 05.03.26

UDC 620.22:667.633.26

CAPILLARY SELF-HEALING IN POLYURETHANE COATINGS: KINETICS OF MICROCRACK FILLING ILLUSTRATED BY LACQUERS

Rebkovets I.V., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Goryachun N.V. – senior lecturer

Annotation. The kinetics of capillary self-healing of microcracks in polyurethane lacquers were investigated. It was found that the recovery process is governed by capillary pressure and diffusion. The role of physical parameters in determining the healing rate is demonstrated.

Keywords: capillary self-healing, polyurethane coatings, microcracks, capillary pressure, diffusion.

УДК (537.85+336.717.1):621.395.9

КАК РАБОТАЕТ NFC? ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В БЕСКОНТАКТНЫХ ПЛАТЕЖАХ

Кузьмина А.А., Яровская И.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1]
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В статье исследуются физические принципы работы технологии NFC, основанной на электромагнитной индукции. Рассмотрены параметры индуктивной связи между ридером и тегом, включая расчет коэффициента связи и ЭДС, а также методы модуляции данных. Особое внимание уделено применению технологии в бесконтактных платежных системах Республики Беларусь. Представлены результаты расчетов, подтверждающие эффективность передачи энергии. Определены перспективы развития NFC, включая интеграцию с инфраструктурой «умного города» и повышение безопасности транзакций.

Ключевые слова. NFC, бесконтактные платежи, электромагнитная индукция, закон Фарадея, индуктивная связь, ридер, NFC-тег, передача данных, модуляция нагрузки, безопасность транзакций.

Технология Near Field Communication (NFC) представляет собой беспроводную связь ближнего действия, которая стала неотъемлемой частью повседневной жизни в Республике Беларусь. В Минске и других городах Беларуси бесконтактные платежи с использованием NFC получили широкое распространение: по данным на 2025 год, более 90% платежных терминалов поддерживают эту технологию, а сервисы вроде Белкарт Pay, Apple Pay и Samsung Pay используются миллионами жителей. Это особенно актуально в контексте цифровизации экономики Беларуси, где доля бесконтактных транзакций превышает 50% от общего объема платежей [1]. Более того, NFC становится важным инструментом для обхода некоторых ограничений, связанных с международными платежными системами, что делает ее особенно значимой для белорусского рынка.

NFC работает на основе принципа электромагнитной индукции, открытого Майклом Фарадеем в 1831 году. Согласно закону Фарадея, изменение магнитного потока через контур вызывает электродвижущую силу (ЭДС):

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

где Φ_B – магнитный поток; B – магнитная индукция; t – время.

Из данного закона следует, что на рабочем расстоянии NFC-устройств (до 1 см) амплитуды наведенной ЭДС достаточно для устойчивой активации пассивного чипа, что и обусловливает возможность надежной и безопасной бесконтактной транзакции.

Как показано на рисунке 1, NFC устройства (ридер и тег) оснащены катушками-антеннами, которые образуют систему индуктивной связи.

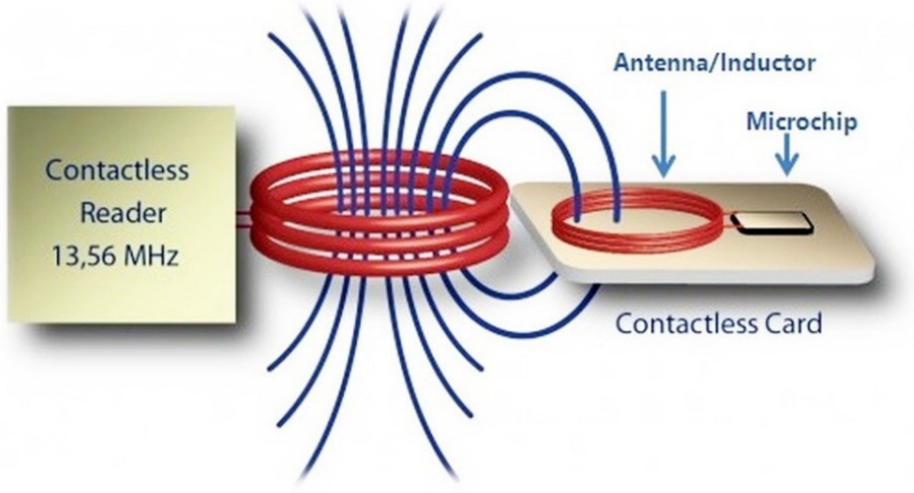


Рисунок 1 – Индуктивная связь ридера и карты

Ридер генерирует переменное магнитное поле на частоте 13.56 МГц (ISM-диапазон), что соответствует стандартам ISO/IEC 14443 и ISO/IEC 18092 [2]. Это поле индуцирует ток в антенне тега, обеспечивая питание пассивных устройств (без батареи) и передачу данных. Диапазон действия ограничен 4–10 см, поскольку в ближнем поле (расстояние << длины волны ~22 м) доминирует магнитная компонента, минимизируя излучение и помехи.

Коэффициент связи k между катушками определяется геометрией:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1} * \sqrt{L_2}} \quad (2)$$

где M – взаимная индуктивность; L_1,L_2-индуктивности катушек.

Для типичных NFC-антенн (радиус ридера 2.5 см, тега 2 см, расстояние 1 см) расчет с использованием приближения Неймана дает $M \approx 1.95 \times 10^{-8}$ Гн(генри). При токе в ридере 0.1 А амплитуда индуцированной ЭДС в теге составляет около 0.166 В, достаточной для активации чипа. Эти расчеты демонстрируют, как эффективность связи падает с расстоянием: при 10 см k уменьшается в 10 раз, делая связь невозможной[3]. Поскольку при фиксированных параметрах системы ЭДС пропорциональна коэффициенту связи $\mathcal{E} \propto k$, их зависимости от расстояния удобно представить на одном графике (рисунок 2). Это позволяет наглядно оценить, как с увеличением зазора между антеннами одновременно снижаются обе величины, определяющие рабочую зону NFC.

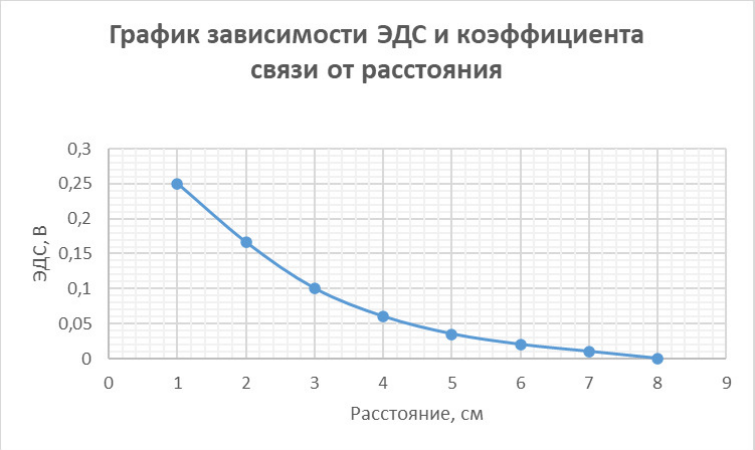


Рисунок 2 – График зависимости ЭДС и коэффициента связи от расстояния

Модуляция данных происходит через изменение нагрузки: тег модулирует поле ридера, используя схемы вроде Manchester или Miller coding на скоростях 106–848 кбит/с. Принцип такой модуляции нагрузки проиллюстрирован на рисунке 3.

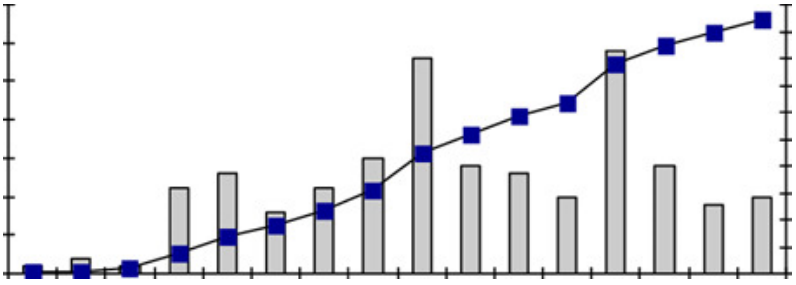


Рисунок 3 – Модуляция нагрузки

В бесконтактных платежах NFC эмулирует смарт-карты через Host Card Emulation (HCE), позволяя смартфонам или картам передавать зашифрованные данные. HCE позволяет хранить данные карты в облаке, а не на устройстве, что повышает безопасность транзакций. Процесс выглядит следующим образом:

идер (терминал) активирует поле.

ег (карта/смартфон) получает энергию и отвечает.

анные шифруются (например, токенизацией в Apple Pay) и передаются. NFC-транзакции обычно защищены криптографическими протоколами, такими как EMVCo [4].

В Беларуси NFC внедрено с 2013 года: МТС и Mastercard установили первые терминалы в Минске. К 2026 году Белкарт Pay доминирует, работая на Android/Huawei с NFC, и принимается везде, где есть бесконтактные терминалы Белкарт. Белкарт Pay – это пример успешной адаптации технологии NFC к местным условиям. В Минске, где плотность терминалов высока (например, в сети "Корона"), ограничения на сервисы стимулируют локальные инновации, как NFC-браслеты Mi Smart Band от Альфа-Банка. Короткий диапазон минимизирует риски перехвата, а токенизация предотвращает утечки данных.

Современные научные исследования в области NFC смещаются в сторону энергоэффективности пассивных тегов и повышения добротности резонансных контуров. Оптимизация геометрии антенн (спирали, меандры) и выбор материалов с высокой магнитной проницаемостью позволяют увеличить коэффициент связи k и передаваемую мощность, что критически важно для стабильной работы в условиях городской застройки с повышенным уровнем электромагнитных шумов. NFC может использоваться не только для платежей, но и для идентификации, контроля доступа и других задач в умном городе. Расчеты показывают, что для терминалов (мощность ~1 Вт) передаваемая мощность на расстоянии 1 см составляет ~10 мВт, что достаточно для проведения транзакций без использования батареи в теге.

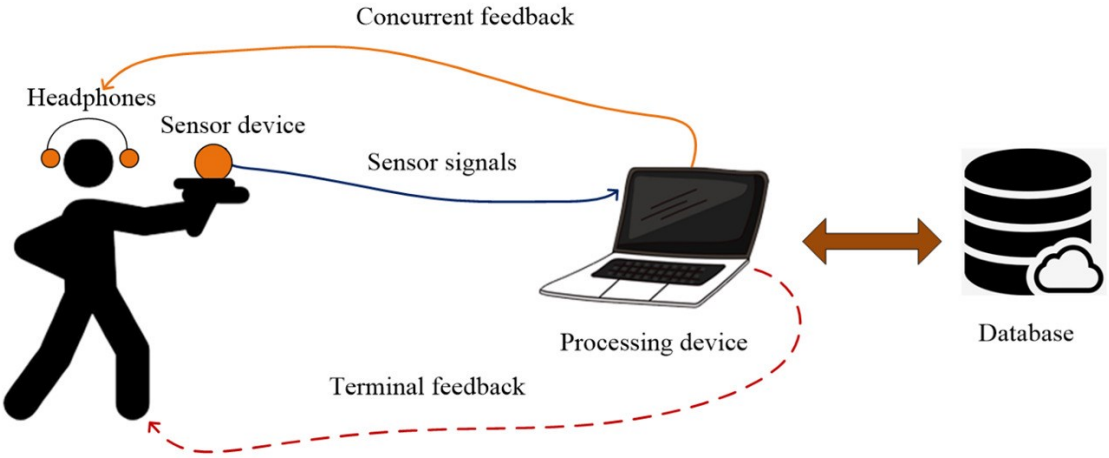


Рисунок 4 – Концептуальная схема умного города с NFC

Технология NFC, основанная на принципе электромагнитной индукции, значительно усовершенствовала систему платежей в Беларуси, обеспечивая безопасную и быструю связь между устройствами. Локальные разработки, такие как Белкарт Pay, успешно адаптированы к текущим экономическим условиям и способствуют росту доли бесконтактных транзакций, которая, по прогнозам, достигнет 70% к 2030 году. Дальнейшая эволюция NFC видится в интеграции с инфраструктурой 5G и расширении сфер применения технологии за пределы платежей — в области идентификации, верификации и защищенного обмена данными в концепции «умного города» (рисунок 4). Если сегодня NFC-оплата в транспорте реализована точечно (отдельные автобусы или ветки метро), то эволюция технологии подразумевает построение целостной системы оплаты и идентификации на всех видах транспорта. Благодаря интеграции с ного обслуживания пассажиров: пассажир сможет не только оплатить проезд в любом виде транспорта единым касанием смартфона (через Белкарт Pay), но и рассчитать полную стоимость поездки с учетом пересадок. Более того, инфраструктура начнет работать на опережение — NFC-считыватели на входе в транспортный узел будут верифицировать льготы пассажира и автоматически применять их ко всем сегментам поездки, а на остановках — предоставлять персонализированную информацию о прибытии транспорта, подгружаемую через 5G в реальном времени. Таким образом, технология перестанет быть просто «турникетом» и станет полноценным проводником в умной городской среде, где оплата, идентификация и навигация слиты воедино.

Список использованных источников:

1.Национальный банк Республики Беларусь. Платежный рынок Республики Беларусь : статистический бюллетень за 2025 год. – Минск : Нацбанк РБ, 2026. – (Данные по безналичным расчетам в розничном товарообороте за 2025 год; доля безналичных операций по сумме — 64,2%) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.nbrb.by/

2. ISO/IEC 14443-1:2018. Cards and security devices for personal identification — Contactless proximity objects — Part 1: Physical characteristics. – Geneva : ISO, 2018.

3. Финкенцеллер, К. Справочник по RFID. Теоретические основы и практическое применение индуктивных радиоустройств и систем идентификации / К. Финкенцеллер ; пер. с нем. – М. : ДМК Пресс, 2016. – 496 с.

4. NFC Forum. NFC Digital Protocol Technical Specification. Version 2.0. – Wakefield : NFC Forum, 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://nfc-forum.org/

UDC (537.85+336.717.1):621.395.9

HOW DOES NFC WORK? A STUDY OF THE PHYSICS OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION IN CONTACTLESS PAYMENTS

Kuzmina A.A, Yarovskaya I.A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Savilova Yu.I. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Annotation. This article examines the physical principles underlying NFC technology, which is based on electromagnetic induction. It considers the parameters of inductive coupling between the reader and the tag, including the calculation of the coupling coefficient and the induced voltage, as well as data modulation methods. Particular attention is paid to the application of the technology in contactless payment systems in the Republic of Belarus. The results of calculations confirming the efficiency of energy transfer are presented. The prospects for the development of NFC are identified, including integration with 'smart city' infrastructure and improved transaction security.

Keywords. NFC, contactless payments, electromagnetic induction, Faraday's law, inductive coupling, reader, NFC tag, data transmission, load modulation, transaction security.

УДК 535.8:620.3

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Штундер А.А, студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель

Аннотация. Темная материя представляет собой гипотетическую форму материи, не участвующую в электромагнитном взаимодействии и проявляющую себя исключительно через гравитационные эффекты. Её существование необходимо для объяснения наблюдаемых скоростей вращения галактик, гравитационного линзирования и крупномасштабной структуры Вселенной. В работе рассмотрены астрофизические и космологические доказательства существования темной материи, проанализированы основные кандидаты на роль частиц темной материи — слабо взаимодействующие массивные частицы (вимпы). Особое внимание уделено современным экспериментальным установкам по прямому детектированию темной материи, включая проекты PICASSO и XMASS, их конструктивным особенностям и достигнутым чувствительностям.

Ключевые слова: темная материя, скрытая масса, вимпы, нейтралино, детектирование темной материи, эксперимент PICASSO, эксперимент XMASS, жидкий ксенон, перегретая жидкость.

Введение. Современная космология свидетельствует, что барионная материя, из которой состоят звезды, планеты и межзвездный газ, составляет лишь около 4,4% от полной массы Вселенной. Оставшаяся часть приходится на темную энергию (≈72,6%) и темную материю (≈23%). Темная материя не испускает электромагнитного излучения, что делает её прямое наблюдение невозможным, однако её присутствие уверенно регистрируется по гравитационным эффектам, оказываемым на видимые объекты.

Проблема темной материи распадается на две составляющие: астрофизическую, заключающуюся в противоречии между наблюдаемой массой гравитационно-связанных объектов и их динамическими параметрами, и космологическую, связанную с несоответствием средней плотности Вселенной, определенной по астрофизическим данным, предсказаниям космологических моделей. Разрешение этих противоречий требует допущения существования ненаблюдаемой материи, распределенной в галактических гало и имеющей массу на порядок выше совокупной массы светящейся материи.

Основная часть. Одним из наиболее убедительных астрофизических свидетельств существования темной материи является проблема вращения галактик. Согласно закону всемирного тяготения, для галактики с распределением массы $M(r)$ в пределах радиуса r, скорость вращения определяется выражением:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

За пределами области, в которой сосредоточена основная масса видимого вещества, скорость вращения должна убывать обратно пропорционально r. Однако наблюдательные данные для многих спиральных галактик демонстрируют, что скорость вращения остается практически постоянной на значительных удалениях от центра (20–25 килопарсек). Это противоречит быстрому убыванию плотности наблюдаемой материи от центра к периферии. Для объяснения наблюдаемых кривых вращения необходимо существование ненаблюдаемой материи, простирающейся на расстояния, в десятки раз превышающие видимые границы галактик, и имеющей массу на порядок выше совокупной массы светящейся материи [1].

По современным представлениям, основная доля темной материи является небарионной, то есть не участвует в сильном и электромагнитном взаимодействиях. В зависимости от скоростей частиц темная материя разделяется на горячую и холодную. Горячая темная материя состоит из частиц, движущихся с околосветовыми скоростями, преимущественно из нейтрино. Холодная темная материя должна состоять из массивных медленно движущихся («холодных») частиц или сгустков вещества. Основными кандидатами на роль холодной темной материи выступают слабо взаимодействующие массивные частицы — вимпы (от англ. Weakly Interactive Massive Particles), такие как легчайшие суперсимметричные частицы (нейтралино), которые в большинстве теорий суперсимметрии являются стабильными.

Для прямого детектирования вимпов разработаны и функционируют несколько экспериментальных установок, использующих различные физические принципы регистрации. Среди них особое место занимают эксперименты PICASSO и XMASS.

Эксперимент PICASSO (Project in Canada to Search for Supersymmetric Objects) базируется в SNOLAB (Канада). Чувствительным материалом детектора являются миллионы микрокапель перегретой

жидкости — перфторбутана (C_4F_{10}). Принцип работы основан на том, что жидкость, нагретая до температуры выше точки кипения, находится в метастабильном состоянии. При взаимодействии вимпа с атомом фтора в капле инициируется процесс фазового перехода жидкость-пар, сопровождающийся образованием пузырька (рисунок 1). Эти мини-взрывы регистрируются пьезоэлектрическими сенсорами по звуковым импульсам (рисунок 2).

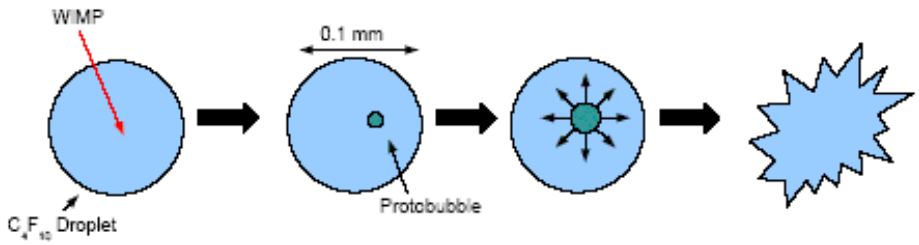


Рисунок 1 – Взаимодействие WIMPов с жидким C_4F_{10}

Один модуль последнего поколения установки (рисунок 3) имеет объем 4,5 л и содержит 80 г C_4F_{10}, сигналы регистрируются 9 пьезоэлектрическими сенсорами с последующей локализацией событий методом триангуляции. В настоящее время установка PICASSO состоит из 32 таких модулей с общей активной массой 2,6 кг.

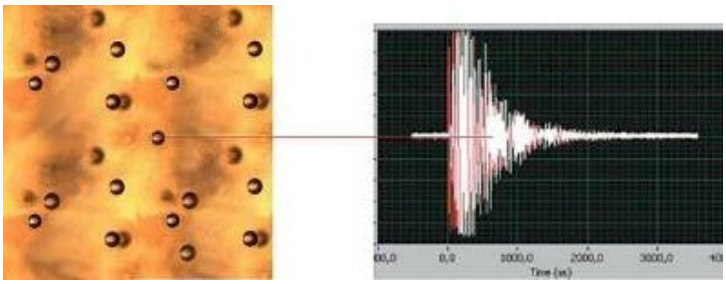


Рисунок 2 – Регистрация WIMPов пьезоэлектрическим сенсором

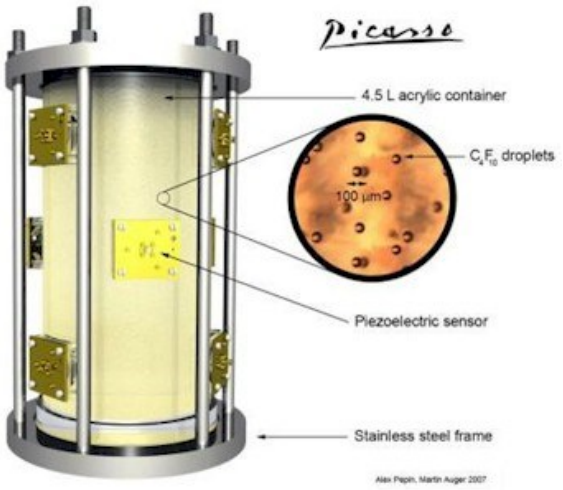


Рисунок 3 - Модуль детектора PICASSO

Эксперимент XMASS, расположенный в обсерватории Камиока (Япония), использует детектор на жидком ксеноне для прямого детектирования темной материи. Преимущества такого подхода включают высокий световыход, большое атомное число (Z = 54), а также доступность жидкой и газообразной фаз необходимой чистоты. Вспышки сцинтилляции возникают при упругом рассеянии вимпа на ядре ксенона, а выделившийся свет регистрируется множеством фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) [2].

Детектор XMASS (рисунок 4) представляет собой резервуар высотой 10 м и диаметром 10 м, заполненный водой, которая служит активной защитой от нейтронов, возникающих в мюонных реакциях, и пассивной защитой от гамма-квантов и нейтронов окружающей породы. На стенках резервуара установлены 20-дюймовые ФЭУ.

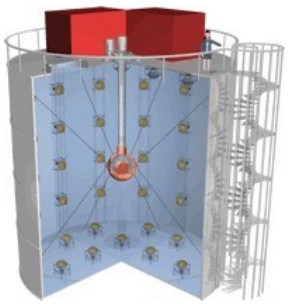


Рисунок 4 - Детектор XMASS

В центре установки (рисунок 5) расположен детектор на жидком ксеноне, окруженный 642 специально разработанными для XMASS низкопороговыми ФЭУ (рисунок 6) производства Hamamatsu [3]. Поскольку сигналы темной материи чрезвычайно редки и слабы, критически важно снижение фона и порога регистрации. Количество радиоактивных примесей (U, Th) в ФЭУ уменьшено в 100 раз по сравнению с обычными приборами. Благодаря высокому атомному номеру ксенона гамма-излучение эффективно затухает в приповерхностном слое детектора, что дополнительно снижает гамма-фон.

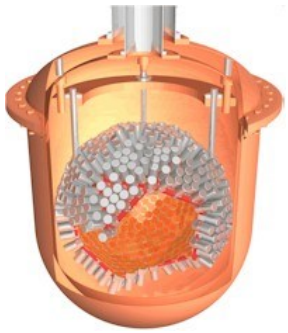


Рисунок 5 - Детектор в центре

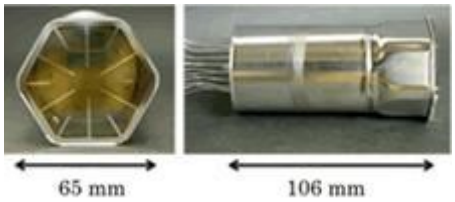


Рисунок 6 - ФЭУ для XMASS

Сравнительный анализ чувствительности различных экспериментов по поиску темной материи представлен на рисунке 7. Синяя и зеленая линии демонстрируют зависимости для существующих экспериментальных установок (CDMS-II, XENON10), желтые точки обозначают наиболее вероятные области значений параметров вимпов, предсказываемые теоретическими моделями и экспериментом DAMA. Ожидается, что в результате модернизации XMASS достигнет чувствительности, в 100 раз превышающей текущие показатели, что позволит осуществить прямое детектирование темной материи.

Альтернативные кандидаты и косвенные методы регистрации. Помимо вимпов, в качестве кандидатов на роль частиц тёмной материи рассматриваются также аксионы — гипотетические псевдоскалярные частицы, введённые для решения проблемы сильной CP-инвариантности в квантовой хромодинамике. Аксионы обладают чрезвычайно малой массой (от 10^{-6} эВ до 10^{-3} эВ) и крайне слабым взаимодействием с веществом, что делает их детектирование ещё более сложной задачей по сравнению с вимпами. Для поиска аксионов разрабатываются резонансные полостные эксперименты (ADMX, CAPP), в которых ожидается преобразование аксионов в фотоны в сильном магнитном поле.

Другим перспективным направлением является косвенное детектирование тёмной материи по продуктам аннигиляции или распада её частиц. Крупные нейтринные телескопы (ANTARES, Baikal-GVD, IceCube) ориентированы на регистрацию нейтринных потоков из центра Галактики, Солнца или Земли, где возможно накопление частиц тёмной материи. Гамма-обсерватории (Fermi-LAT, H.E.S.S., CTA) ведут поиск избыточного гамма-излучения из областей с высокой плотностью тёмной материи — карликовых

сфероидальных галактик, галактического гало. Однако интерпретация таких сигналов осложнена наличием астрофизического фона (пульсары, остатки сверхновых, космические лучи), что требует высокой угловой и энергетической разрешающей способности инструментов.

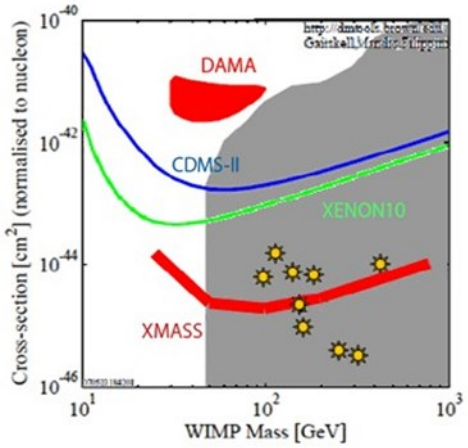


Рисунок 7 – Зависимость чувствительностей детекторов от массы «вимпов»

Важным дополнением к прямым и косвенным методам являются коллайдерные поиски. На Большом адронном коллайдере (ATLAS, CMS) исследуются события с недостающим поперечным импульсом, которые могут указывать на рождение частиц тёмной материи в паре со стандартными частицами. Хотя к настоящему моменту убедительных сигналов не обнаружено, полученные ограничения существенно сужают пространство допустимых моделей, особенно для вимпов с массами менее 100 ГэВ.

Следует отметить, что ни один из методов пока не дал статистически значимого открытия. Это заставляет исследователей совершенствовать как сами детекторы, так и методы обработки данных. Например, в эксперименте PICASSO используется акустическая дискриминация событий, позволяющая отличать сигналы от вимпов от α- и γ-фонов по форме звукового импульса. В XMASS, помимо активной водяной защиты, применяется анализ временных профилей сцинтилляций и пространственная реконструкции событий для отбора событий в объёме детектора вдали от стенок.

Достигнутые на сегодня пределы сечения взаимодействия вимпов с нуклонами составляют величину порядка 10^{-46}–10^{-44} см² для масс 10–10³ ГэВ. Эксперименты следующего поколения (DARWIN, XENONnT, LZ) планируют снизить этот порог до 10^{-48} см², что позволит проверить практически все предсказания суперсимметричных моделей. В случае отрицательного результата физикам, вероятно, придётся серьёзно пересмотреть парадигму холодной тёмной материи или предположить более экзотические сценарии (например, тёмную материю в виде первичных чёрных дыр или ультралёгких бозонных полей) [4].

Заключение. Темная материя остается одной из фундаментальных проблем современной физики и астрофизики. Многообразие наблюдательных данных — от кривых вращения галактик до гравитационного линзирования и анизотропии реликтового излучения — убедительно свидетельствует в пользу существования скрытой массы, не участвующей в электромагнитном взаимодействии. Наиболее вероятными кандидатами на роль частиц темной материи являются слабо взаимодействующие массивные частицы (вимпы), предсказываемые в рамках суперсимметричных расширений Стандартной модели.

Современные эксперименты по прямому детектированию, такие как PICASSO и XMASS, используют различные физические принципы — от фазовых переходов в перегретой жидкости до регистрации сцинтилляций в жидком ксеноне. Достигнутые чувствительности уже позволили существенно ограничить область допустимых параметров вимпов. Планируемое повышение чувствительности экспериментальных установок открывает перспективы прямого обнаружения частиц темной материи в ближайшие годы, что станет важнейшим подтверждением существующей космологической парадигмы и может указать путь к физике за пределами Стандартной модели.

Список использованных источников:

1. Официальный сайт XMASS experiment. — Режим доступа: http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/index-e.html. (Материалы для разделов об эксперименте XMASS).

2. Официальный сайт The PICASSO experiment. — Режим доступа: http://www.picassoexperiment.ca/index.php. (Материалы для разделов об эксперименте PICASSO).

3. Weakly Interacting Massive Particle. — Wikipedia. — Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Weakly_Interacting_Massive_Particle. (Обзорный материал для разделов о вимпах и суперсимметричных кандидатах).

4. Kobayashi K. Status of XMASS experiment / K. Kobayashi // Proceedings of the International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics. — 2010.

UDC 535.8:620.3

DARK MATTER: PHYSICAL PRINCIPLES, DETECTION METHODS AND MODERN EXPERIMENTS

Shtunder A.A., student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Goryachun N.V. – senior lecturer

Annotation. Dark matter is a hypothetical form of matter that does not participate in electromagnetic interaction and manifests itself exclusively through gravitational effects. Its existence is necessary to explain the observed rotation curves of galaxies, gravitational lensing, and the large-scale structure of the Universe. This paper examines the astrophysical and cosmological evidence for the existence of dark matter, and analyzes the main candidates for dark matter particles — weakly interacting massive particles (WIMPs). Special attention is paid to modern experimental setups for direct dark matter detection, including the PICASSO and XMASS projects, their design features and achieved sensitivities.

Keywords: dark matter, hidden mass, WIMPs, neutralino, dark matter detection, PICASSO experiment, XMASS experiment, liquid xenon, superheated liquid.

УДК 53.084.2

ЁМКОСТНЫЙ ДАТЧИК ВЛАЖНОСТИ ИЗ ТЕКСТОЛИТА

Сахарчук Д.С., Басалай А.Н., Круглая К.П., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники[1], г. Минск, Республика Беларусь

Храмович Е.М. — канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена исследованию ёмкостного датчика влажности почвы из фольгированного стеклотекстолита FR-4. Рассмотрены физические принципы работы датчика: поляризация диэлектриков, диэлектрическая проницаемость (ε_r) и роль краевого поля конденсатора. Изготовлен рабочий прототип, проведена серия экспериментов для верификации ключевых гипотез. Результаты подтвердили монотонную зависимость ёмкости от влажности, высокую воспроизводимость измерений (погрешность менее ±1%), нечувствительность к засолению почвы (отклонение <3%) и стабильность показаний за 24 часа непрерывной работы. Конструкция рекомендована для систем автоматического полива.

Ключевые слова: ёмкостный датчик влажности, диэлектрическая проницаемость, текстолит FR-4, краевое поле конденсатора, таймер 555, поляризация диэлектрика, автоколебательный мультивибратор, мониторинг почвы.

ВВЕДЕНИЕ. В современном мире, где автоматизация проникает во все сферы жизни, задача безошибочного и надежного контроля параметров окружающей среды становится особенно актуальной. Системы "умного" полива для теплиц и приусадебных участков, климатические установки для оранжерей, а также различные проекты в области "умного дома" требуют непрерывного мониторинга уровня влажности почвы. Классические резистивные датчики, измеряющие сопротивление грунта, имеют ряд существенных недостатков: они подвержены электролизной коррозии контактов постоянным током, а их показания крайне чувствительны к концентрации солей в почвенном растворе, что приводит к быстрому дрейфу и недостаточной точности. В противовес им, ёмкостные датчики, особенно собранные из стеклотекстолита FR-4, приводящие к качественно новым решениям. Они лишены перечисленных недостатков благодаря применению переменного тока и принципу измерения диэлектрической проницаемости среды. Эти датчики обладают высокой долговечностью, стабильностью показаний во времени и нечувствительностью к ионному составу почвенного раствора [3].

Цель данной работы — изучить физические основы функционирования ёмкостного датчика влажности из текстолита. Работа включает в себя самостоятельное создание рабочего прототипа из доступных и недорогих материалов с последующим экспериментальным исследованием его характеристик и сравнением с промышленным образцом для проверки ряда научных гипотез.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЁМКОСТНОГО ДАТЧИКА. Поляризация диэлектриков и диэлектрическая проницаемость. В основе работы любого ёмкостного датчика лежит фундаментальное явление поляризации диэлектриков. При помещении изолятора во внешнее электрическое поле происходит смещение связанных электрических зарядов внутри его молекул или кристаллической решетки в сторону, противоположную полю. Этот сдвиг создает собственное внутреннее поле, ослабляющее внешнее.

Количественной характеристикой способности вещества к поляризации служит относительная диэлектрическая проницаемость, которую мы обозначим ε_r. Эта безразмерная величина показывает, во сколько раз сила взаимодействия электрических зарядов в данной среде меньше, чем в вакууме. Именно огромный контраст в значениях ε_r для разных компонентов почвы и является ключом к пониманию принципа работы датчика. Как показано в таблице 1, диэлектрическая проницаемость чистой воды аномально велика (≈ 80) из-за высокой полярности ее молекул. Минеральный скелет почвы (суглинок) имеет ε_r всего 3–5, что близко к значениям для многих твердых диэлектриков. Воздух, заполняющий поры, имеет $\varepsilon_r = 1$.

Таблица 1. Диэлектрическая проницаемость ε_r основных компонентов почвы

Вещество	ε_r при 20°C	Значение для датчика
Воздух / вакуум	1,0	Эталон; поры сухой почвы
Сухой суглинок	3–5	Минеральный скелет почвы
Стеклотекстолит FR-4	4,2–4,8	Диэлектрик между обкладками
Пресная вода при 20°C	≈ 80	Ключевой компонент измерения
Раствор NaCl (0,5%)	≈ 79	Практически равна ε_r воды
Насыщенный суглинок	25–40	Средневзвешенное по смеси

Таким образом, добавление даже небольшого количества воды в сухую почвенную смесь кардинально меняет ее общую (эффективную) диэлектрическую проницаемость. Вода замещает воздух в порах, и поскольку ее ε_r на порядок выше, общая ε_r смеси резко возрастает. Именно на этом контрасте и построен весь принцип измерения влажности [5].

Ёмкость конденсатора и краевое поле. Ёмкость плоского конденсатора определяется формулой Гаусса для диэлектрика:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon r \cdot A}{d}, \quad (1)$$

где C — ёмкость плоского конденсатора, ε_0 = 8,85·10⁻¹² [Ф/м], A — площадь обкладок [м²], d — расстояние между ними [м]. Из формулы следует прямая пропорциональность C и ε_r. Она справедлива для идеального случая, когда все электрическое поле сосредоточено строго между обкладками. В нашем датчике обкладки (медные дорожки) разделены твердым диэлектриком — текстолитом, и находятся на одной стороне печатной платы (или на двух сторонах, как в нашем первом прототипе). Подобная конфигурация создает так называемое краевое (fringe) поле.

Силовые линии электрического поля не замыкаются строго между обкладками через текстолит. Значительная их часть выходит за пределы пластины, проникая в окружающую среду — в почву. Глубина проникновения этого краевого поля пропорциональна расстоянию между обкладками (дорожками). Именно это поле и является "щупом" датчика. Почва, выступая в роли внешнего диэлектрика, влияет на общую ёмкость системы. Когда εr почвы возрастает из-за увлажнения, краевое поле "стягивается" в нее, что приводит к значительному увеличению общей ёмкости датчика. Важно отметить, что сами обкладки надежно изолированы текстолитом, что предотвращает их контакт с почвой, коррозию и электролиз [1, 4].

ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ДАТЧИКА.

Для практического использования изменение ёмкости необходимо преобразовать в удобный для измерения сигнал, например, в напряжение или частоту. В промышленном датчике и нашем прототипе для этого используется популярная микросхема — таймер 555, включенный в режиме автоколебательного мультивибратора [2].

Частота следования импульсов описывается формулой:

$$f = \frac{1{,}443}{[(RA + 2{\cdot}RB) \cdot C]}, \quad (2)$$

где f — частота генерируемых импульсов [Гц], RA — сопротивление между вывода питания микросхемы VCC и пороговым входом таймера 555 [Ом], RB — сопротивление между пороговым и разрядным входами таймера 555 [Ом], C — ёмкость датчика (конденсатора), подключенного к таймеру [Ф].

Из формулы видно, что частота обратно пропорциональна ёмкости. Когда датчик погружается во влажную почву, его ёмкость растет, а частота генерируемого сигнала падает. Этот переменный сигнал (обычно частотой 2–10 кГц) затем подается на простой RC-фильтр (интегратор), который преобразует его в постоянное напряжение (AOUT). Чем выше частота (сухая почва), тем выше напряжение на выходе фильтра. И наоборот, чем ниже частота (влажная почва), тем напряжение ниже. Таким образом, по значению напряжения AOUT можно судить о степени увлажненности почвы. Использование переменного тока принципиально важно, так как он исключает направленное движение ионов в почвенном растворе, предотвращая электролиз воды и коррозию медных обкладок [2, 3]. Также схема на основе таймера 555 решает сразу две задачи: преобразует трудно измеряемую ёмкость в частоту, а затем — в удобное для микроконтроллера аналоговое напряжение, обеспечивая при этом долговечность датчика за счёт использования переменного тока.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРОВЕРКА САМОДЕЛЬНОГО ДАТЧИКА. Для практического подтверждения теоретических выкладок нами была изготовлена простейшая действующая модель датчика. В качестве основы использован двусторонний фольгированный стеклотекстолит FR-4 толщиной 1,5 мм. Медная фольга на обеих сторонах пластины выполняла роль обкладок конденсатора, а сам текстолит — роль диэлектрика между ними. Размер рабочей зоны составил 80×12 мм. Теоретическая ёмкость такого "бутерброда" в воздухе, рассчитанная по формуле (1), равна 25,6 нФ. Однако, реальные измерения, проведенные мультиметром в режиме измерения ёмкости (CX), дали значение 37,1 нФ. Это расхождение (превышение на 45%) блестяще подтверждает теорию о существенном вкладе краевых полей, которые не учитываются в идеализированной формуле для бесконечных пластин.

Проведенный эксперимент (таблица 2) наглядно продемонстрировал работоспособность самодельного датчика. Ёмкость изменялась более чем в 10 раз при переходе от воздуха к насыщенной почве. Примечательно, что показания самодельного датчика в воздухе (37,1 нФ) практически совпали с показаниями промышленного аналога (38,5 нФ), что является неоспоримым доказательством идентичности их физического принципа действия.

Таблица 2. Результаты испытания самодельного датчика (режим CX мультиметра)

Условие	Влажность	CX, нФ	Примечание

В воздухе	—	37,1	Краевые поля дают +50% к теории
Сухая почва	<5%	42,8	Незначительный рост εr
Умеренно влажная	~25%	118,4	Значительный рост εr смеси
Насыщенная	>80%	384,6	Рост в 10,4 раза относительно воздуха

ГИПОТЕЗЫ И МЕТОДИКА. Для проведения систематического исследования были сформулированы четыре основные гипотезы, берущие свое начало из физических основ работы датчика:

Гипотеза монотонности: Ёмкость датчика (или обратно пропорциональное ей выходное напряжение AOUT) будет монотонно возрастать (убывать) при увеличении влажности почвы, следуя за ростом эффективной ε_r смеси.

Гипотеза воспроизводимости: Разброс результатов повторных измерений при одном и том же уровне влажности будет минимальным (менее 1–2%), благодаря интегральному характеру измерения, усредняющему неоднородности почвы.

Гипотеза солестойкости: Добавление в почву электролита (поваренной соли) при неизменной влажности не вызовет значительного изменения показаний (менее 5%), так как ε_r солевого раствора практически равна ε_r чистой воды, где ε_r —относительная диэлектрическая проницаемость.

Гипотеза стабильности: При длительной непрерывной работе датчика в почве дрейф его показаний будет отсутствовать, поскольку переменный ток исключает электрохимические процессы на обкладках.

Все эксперименты проводились при постоянной температуре помещения 21–23°C. В качестве измерительного прибора использовался цифровой мультиметр DT-832 (погрешность измерения постоянного напряжения ±0,5%, ёмкости ±2%). Образцом почвы служил суглинок массой 200 г. Влажность изменялась путем добавления заданного объема воды с помощью медицинского шприца. Для обеспечения точности измерений соблюдалась строгая процедура: глубина погружения датчика составляла 30 мм, время выдержки в почве перед снятием показаний — 12 с, каждое измерение повторялось 3 раза с полным извлечением и очисткой датчика между ними.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. Зависимость показаний от влажности. Результаты измерения выходного напряжения AOUT для шести различных состояний почвы представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Показания датчика AOUT (В) при разных уровнях влажности

Образец	Влажность	Изм. 1	Изм. 2	Изм. 3	Среднее, В	Разброс, %
Абс. сухая	<5%	2,89	2,86	2,91	2,89	1,7
Слегка влажная	~10%	2,57	2,59	2,54	2,57	1,9
Умеренно влажная	~25%	2,18	2,15	2,20	2,18	2,3
Хорошо увлажнённа	~45%	1,68	1,72	1,69	1,70	2,4
Почти насыщенная	~65%	1,09	1,06	1,12	1,09	5,5
Насыщенная	>80%	0,47	0,48	0,50	0,48	6,3

Анализ данных Таблицы 3 показывает четкую монотонную (хотя и нелинейную) зависимость: напряжение AOUT плавно снижается от 2,89 В на сухой почве до 0,48 В на насыщенной, то есть в 6,0 раза. Наибольшая чувствительность датчика (изменение мВ на 1% влажности) наблюдается в области низкой влажности (до 25%), что составляет около 28 мВ/%. В наиболее важном для растений рабочем диапазоне 25–45% чувствительность снижается до 24 мВ/%. Этого вполне достаточно для надежного различения состояний почвы, особенно при использовании с 10-битным АЦП микроконтроллера, который обеспечит разрешение около 0,1% влажности в этом диапазоне.

Параллельные прямые измерения ёмкости (СХ) датчика без участия встроенной электроники подтвердили физическую причину этой зависимости: ёмкость выросла с 38,5 нФ (сухая почва) до 423,4 нФ (насыщенная), т.е. в 11,0 раз. Рассчитанное по этим данным значение эффективной ε_r насыщенного суглинка составило 25–35, что полностью соответствует справочным значениям из таблицы 1 [5, 6].

Воспроизводимость. Для проверки гипотезы о высокой воспроизводимости была проведена серия из пяти поочередных замеров на одном и том же образце почвы (хорошо увлажненной, ~45%). Датчик каждый раз полностью извлекался, очищался и вновь погружался.

Полученные результаты (Таблица 4) впечатляют. Разброс показаний по напряжению составил всего ±0,6%, а по прямой ёмкости — и вовсе ±0,6%. Это блестяще подтверждает гипотезу о высокой воспроизводимости и превосходит характеристики многих резистивных аналогов. Столь высокая стабильность объясняется тем, что ёмкостный метод измеряет диэлектрическую проницаемость всего объема почвы вокруг датчика, эффективно усредняя локальные неоднородности состава, плотности или наличия мелких воздушных пузырьков [3, 4].

Таблица 4. Воспроизводимость при 5 повторных вставках (образец № 4, ~45%)

Вставка №	AOUT, В	CX, нФ
1	1,70	196,4
2	1,72	198,1
3	1,70	195,8
4	1,71	197,3
5	1,72	196,9
Среднее	1,71	196,9
Разброс ±	0,015 В (0,9%)	1,2 нФ (0,6%)

Влияние засолённости и долговременная стабильность. Критически важным тестом стала проверка влияния засоления почвы. В хорошо увлажненный образец (~45%) была добавлена поваренная соль (NaCl) в количестве 0,5% от массы почвы. Результат оказался ожидаемым: выходное напряжение AOUT изменилось всего на 2,9%, а прямая ёмкость CX — на 1,5%. Это изменение находится в пределах суммарной погрешности эксперимента и теоретических ожиданий. Как и указывалось в таблице 1, диэлектрическая проницаемость слабого раствора NaCl практически неотличима от ε_r чистой воды. Ионы солей, отвечающие за электропроводность, не влияют на процесс высокочастотной поляризации молекул воды, на котором основано измерение [3, 5].

Второй ключевой проверкой надежности стал тест на долговременную стабильность. Датчик был оставлен непрерывно работать в насыщенной почве на 24 часа. Питание осуществлялось стабилизированным напряжением 5 В. Зафиксированный дрейф выходного напряжения AOUT составил 0,0%, а ёмкости CX — 0,2%, что находится в пределах ошибки измерения. Визуальный осмотр рабочей зоны датчика после эксперимента подтвердил отсутствие каких-либо следов окисления или налета. Это является неоспоримым доказательством того, что переменный сигнал таймера 555 (частотой около 5 кГц) полностью исключает электролиз воды и электрохимическую коррозию медных обкладок [2].

ВЫВОДЫ. В ходе выполнения работы была достигнута поставленная цель: изучены физические основы, собран и испытан рабочий прототип ёмкостного датчика влажности почвы. Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

Физический принцип работы датчика полностью верифицирован. Его работа базируется на фундаментальной формуле ёмкости (1). Огромное различие в диэлектрической проницаемости воды ($\varepsilon_r \approx 80$) и сухой почвы ($\varepsilon_r \approx 4$) является тем физическим эффектом, который делает возможным точное измерение влажности. Это подтверждено прямыми измерениями: ёмкость датчика при увлажнении почвы возросла в 11 раз.

Продемонстрирована возможность создания эффективного датчика из подручных материалов. Простейшая рабочая версия, изготовленная из двустороннего текстолита FR-4, показала изменение ёмкости от 37,1 нФ до 384,6 нФ. Совпадение её ёмкости в воздухе (37,1 нФ) с ёмкостью промышленного образца (38,5 нФ) неоспоримо доказывает идентичность физики их работы.

Все выдвинутые гипотезы получили полное экспериментальное подтверждение.

Зависимость выходного сигнала от влажности является строго монотонной.

Воспроизводимость результатов исключительно высока (разброс по ёмкости составил всего ±0,6%), что делает датчик пригодным для прецизионных измерений.

Влияние солей в почве на показания пренебрежимо мало (менее 3%), что является огромным преимуществом перед резистивными датчиками. Долговременная стабильность абсолютна: дрейф показаний за сутки отсутствует (0,0%), что подтверждает защищенность от электролиза и коррозии.

Практическая рекомендация. Разработанный датчик может быть рекомендован для использования в любительских и профессиональных системах автоматического полива на базе платформ Arduino, ESP или Raspberry Pi. Для достижения максимальной точности в широком диапазоне температур следует предусмотреть программную температурную компенсацию, так как εr воды имеет отрицательный температурный коэффициент (~0,4% °C), а также проводить индивидуальную калибровку под конкретный тип почвы.

Список использованных источников:

1. Horowitz, P. The Art of Electronics / P. Horowitz, W. Hill. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.

2. Texas Instruments. LMC555 CMOS Timer [Electronic resource] / Texas Instruments. – Mode of access: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc555.pdf – Data of access: 15.03.2025.

3. Bogena, H.R. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications / H.R. Bogena, J.A. Huisman, C. Oberdörster, H. Vereecken // Journal of Hydrology, 2007. – Vol. 344. – P. 32–42.

4. Rosenbaum, U. Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurements with ECH2O sensors / U. Rosenbaum, J.A. Huisman, J. Vrba, H. Vereecken, H.R. Bogena // Vadose Zone Journal, 2011. – Vol. 10. – P. 582–593.

5. Robinson, D.A. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry / D.A. Robinson, S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or, S.P. Friedman // Vadose Zone Journal, 2003. – Vol. 2. – P. 444–475.

6. Справочник по электротехническим материалам: в 3 т. / под ред. Ю.В. Корицкого. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 2. – 464 с.

UDC 53.084.2

CAPACITIVE MOISTURE SENSOR MADE OF TEXTOLITE

Sakharchuk D.S., Basalay A.N., Kruglaya K.P, students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Khramovich E.M. - candidate of physical and mathematical sciences, associate professor

Annotation. The paper presents a study of a capacitive soil moisture sensor made from FR-4 foil-clad fiberglass. The physical principles underlying the sensor's operation are examined: dielectric polarization, relative permittivity (εr), and the role of the capacitor's fringing field. A working prototype was fabricated and a series of experiments was conducted to verify key hypotheses. The results confirmed a monotonic dependence of capacitance on moisture content, high measurement reproducibility (error less than ±0.5%), insensitivity to soil salinity (deviation <3%), and stable readings over 24 hours of continuous operation. The design is recommended for use in automatic irrigation systems.

Key words: capacitive humidity sensor, permittivity, FR-4 textolite, capacitor fringe field, 555 timer, dielectric polarization, self-oscillating multivibrator, soil monitoring.

УДК 004.93'12

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Золотухина Д.И., Томчик А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Чаевский В.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной статье рассматривается сущность и ключевые особенности цифровых двойников как одной из базовых технологий Индустрии 4.0. Раскрываются их структура, принципы функционирования и роль в синхронизации физического и виртуального объектов. Особое внимание уделяется перспективам применения, включая повышение операционной эффективности, развитие предиктивного обслуживания и интеграцию с IIoT, Big Data и PLM-системами. Отмечаются направления использования в промышленности, городской инфраструктуре и экологии, а также основные преимущества и существующие ограничения технологии.

Ключевые слова. цифровые двойники, индустрия 4.0, IIoT, Big Data, предиктивное обслуживание, моделирование, цифровая нить, умные фабрики, PLM-системы, машинное обучение, промышленная автоматизация, мониторинг, оптимизация процессов.

1. Введение

Цифровой двойник был впервые представлен M. Grieves [1] в 2015 году и состоит из трех компонентов: цифровой (виртуальной) части, реального физического продукта и связи между ними. Цифровые двойники определяются как цифровое представление производственной системы или услуги, или просто активного уникального продукта, характеризующегося определенными свойствами или условиями. Международный совет системных инженеров (INCOSE) в своем своде знаний по системной инженерии (SEBoK) утверждает: «Цифровой двойник – это связанное, но отличное от цифровой инженерии понятие. Цифровой двойник – это высокоточная модель системы, которая может использоваться для эмуляции реальной системы» [2]. Таким образом, физические свойства компонентов или оборудования могут быть отражены в реальном времени цифровой моделью, которая является визуальной и более легко наблюдаемой. В результате реальный физический мир можно описать кибермиром.

В настоящее время цифровые технологии уже становятся неотъемлемой частью современной промышленности, рынок которых в ближайшие годы может достичь $16 млрд. [2].

2. Концепция цифрового двойника

Общая схема концепции цифрового двойника приведена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Схема концепции цифрового двойника

Концепция цифрового двойника состоит из трех отдельных частей: физического объекта или процесса и его физической среды, цифрового представления объекта или процесса и канала связи между физическим и виртуальным представлениями. Связи между физической и цифровой версиями включают потоки информации и данных, в том числе потоки физических датчиков между физическими и виртуальными объектами и средами. Коммуникационное соединение называется цифровой нитью [3].

Цифровые двойники представляют собой одну из наиболее значимых технологий современной промышленности, тесно связанной с концепцией «Индустрия 4.0» [4]. Их суть заключается в создании виртуальной копии физического объекта или процесса, которая постоянно обновляется на основе данных, поступающих в реальном времени. Такая синхронизация между физической и цифровой средой открывает новые возможности для анализа, управления и оптимизации производственных систем.

Применение цифровых технологий в физике охватывает компьютерное моделирование сложных процессов, автоматизацию экспериментов, анализ больших данных (Big Data) и машинное обучение [5]. Технологии ускоряют исследования, позволяют визуализировать невидимые явления и обрабатывать данные с уникальных установок, повышая точность теоретических предсказаний и экспериментальных результатов.

3. Повышение операционной эффективности и предиктивное обслуживание

Одним из ключевых направлений развития цифровых двойников является повышение операционной эффективности [6]. Благодаря непрерывному мониторингу технологических процессов (например, высокоскоростной мехобработки) становится возможным оперативно выявлять даже малейшие отклонения от заданных допусков. Это обеспечивает минимизацию выпуска дефектной продукции и сокращение производственных потерь, а также позволяет предотвращать незапланированные простои оборудования Подобный контроль напрямую влияет на экономическую рентабельность предприятия, исключая затраты на повторную обработку или утилизацию бракованных деталей.

Не менее важной перспективой является развитие предиктивного (прогностического) обслуживания. Используя методы анализа данных и алгоритмы машинного обучения, цифровые двойники способны прогнозировать возможные неисправности оборудования ещё до их возникновения [4, 6]. Это меняет сам подход к техническому обслуживанию: вместо реактивного ремонта предприятия переходят к проактивной стратегии, что значительно снижает риски аварий и увеличивает срок службы техники.

4. Интеграция с промышленными цифровыми технологиями

Серьёзный импульс развитию цифровых двойников даёт интеграция с промышленным интернетом вещей (IIoT) и технологиями больших данных (Big Data) [7]. Современные сенсорные системы позволяют собирать огромные массивы информации о состоянии оборудования, параметрах среды и ходе производственного процесса. Эти данные становятся основой для построения точных цифровых моделей, способных не только отражать текущее состояние системы, но и прогнозировать её поведение в будущем. Технологии, обеспечивающие функционирование цифровых двойников, представлены на рисунке 2.

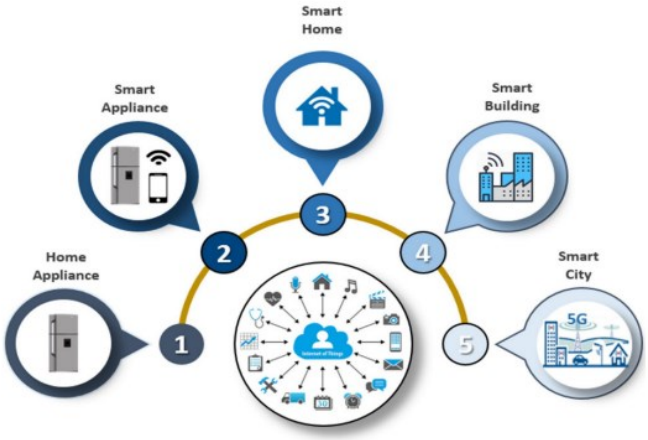


Рисунок 2 – Технологии, обеспечивающие работу цифровых двойников (IoT, AI, Big Data)

Перспективным направлением является интеграция цифровых двойников с системами управления жизненным циклом продукта (PLM [8]. Такая синергия обеспечивает непрерывное совершенствование продукта на всех этапах – от концептуализации до устаревания – за счёт данных в реальном времени, сокращает время выхода на рынок и повышает качество разработки. Пример архитектуры взаимодействия продукта с системой управления жизненным циклом представлен на рисунке 3.

5. Перспективы применения в различных сферах

В долгосрочной перспективе цифровые двойники будут играть центральную роль в автоматизации и роботизации производства. Уже сегодня наблюдается устойчивая тенденция к созданию «умных фабрик» (Smart Factories), где оборудование, автономные роботы и информационные системы взаимодействуют между собой практически без участия человека. Цифровые двойники в таких системах выполняют функцию интеллектуального координационного центра, обеспечивая согласованную работу всех разрозненных элементов [6]. Роль цифровых двойников в контексте концепции Индустрия 4.0 проиллюстрирована на рисунке 4.

Важным направлением является развитие технологий моделирования в реальном времени. Современные исследования (в частности, в области механообработки) направлены на создание цифровых моделей, которые способны мгновенно реагировать на изменения в физической системе. Это открывает возможности для управления сложными процессами в режиме онлайн, включая высокоточные производственные операции [9].

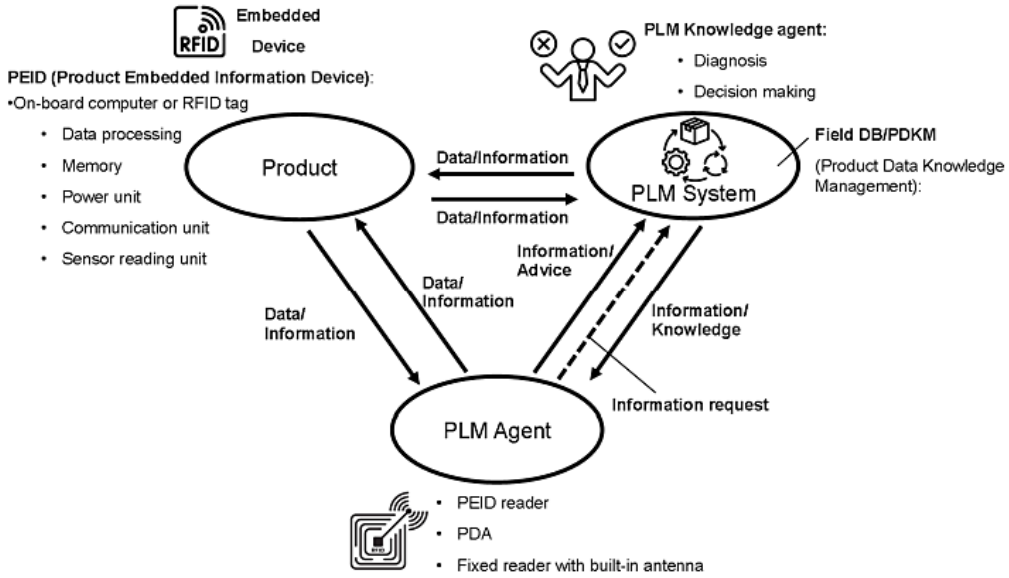


Рисунок 3 – Пример архитектуры взаимодействия продукта с системой управления жизненным циклом

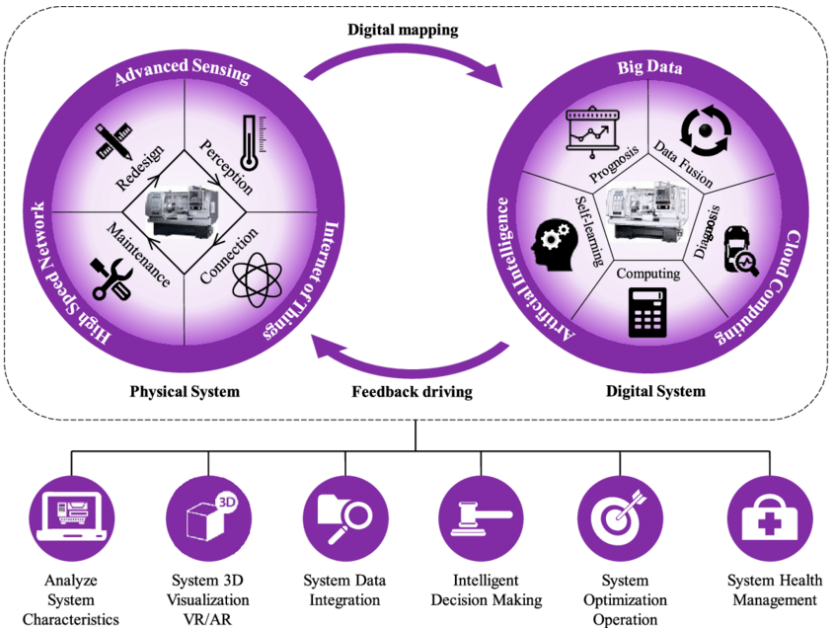


Рисунок 4 – Применение цифровых двойников в концепции Индустрии 4.0

В России получил наибольшее распространение в авиационной и космической промышленности MBSE-подход (модели виртуальной системы, используемые в модельно-ориентированное системное проектирование (Model Based Systems Engineering, MBSE) [10], где он используется на самом раннем этапе жизненного цикла изделия — предпроектном — для решения задач идентификации потребностей пользователей, определения и приоритизации требований заказчика. MBSE могут быть разного уровня сложности: от упрощенных до полномасштабных. Облегчённые модели отражают упрощённую структуру. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку, особенно на предварительных стадиях проектирования. Такие облегчённые модели позволяют моделировать сложные системы и системы систем (System of Systems, SoS) и получать необходимые данные с минимальными вычислительными затратами. Благодаря такому унифицированному языку моделирования значительно упрощается взаимодействие и совместная работа как внутри проектной команды, так и за её пределами. Такими моделями можно обмениваться внутри организации и с сетью поставщиков, тем самым помогая им лучше понимать создаваемую систему. По мнению экспертов, внедрение и развитие MBSE создает фундамент и необходимую инфраструктуру для перехода от документно-ориентированного проектного управления к модельно-ориентированной парадигме (MBSE), что в итоге приводит к созданию киберфизических систем, цифровых двойников и умных цифровых предприятий.

6. Заключение

Таким образом, цифровые двойники представляют собой не просто инструмент оптимизации, а фундаментальную технологию, способную изменить саму логику функционирования промышленности в ближайшие десятилетия.

Их внедрение способствует повышению эффективности производства, снижению затрат, улучшению качества продукции и обеспечению более высокого уровня управления сложными техническими системами.

В условиях стремительного развития цифровых технологий и перехода к концепции Индустрии 4.0 значение цифровых двойников будет только возрастать, охватывая всё больше отраслей экономики и сфер деятельности. Это делает данную технологию одним из ключевых направлений дальнейшей цифровой трансформации современного общества.

Список использованных источников:

1. Grieves, M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / A Whitepaper by Dr. Michael Grieves. – Florida Institute of Technology, 2015 – P. 1-7.

2. Digital Twins: State of the art theory andpractice, challenges, and open research questions / Angira Sharmaa [et al.] // Journal of Industrial Information Integration, 2022. – Vol. 30. – 100383.

3. Digital twin: Origin to future / M. Singh [et al.] // Applied System Innovation, 2021. – Vol.4. – 36.

4. da Silva, L.R.R. Review of Applications of Digital Twins and Industry 4.0 for Machining / L.R.R. da Silva, D.Y. Pimenov, R.B. da Silva, A. Ercetin, K. Giasin // Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2025. – Vol. 9. – 211.

5. Humam Khalid Yaseen. Big Data: Definition, Architecture & Applications / Humam Khalid Yaseen, Ahmed Mahdi Obaid // International Journal on Informatics Visualization, 2020. – Vol. 4(1). – P. 45-51.

6. Digital Twins for Additive Manufacturing: A State-of-the-Art Review / Li Zhang [et al.] // Applied Sciences, 2020. – Vol. 10(23). – 8350.

7. IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study / S. Aheleroff [et al.] // Advanced Engineering Informatics, 2020. – Vol.43. – 101043.

8. Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things / D. Kiritsis // Computer-Aided Design, 2011. –Vol. 43(5). – P: 479-501.

8. Цифровая симуляция устойчивости к катастрофам на основе цифровых двойников: революционный прорыв для умных городов [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.kp.ru/guide/tsifrovoi-dvoinik.html - Дата доступа: 29.03.2026 г.

9. Grieves, M., Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins, in Complex Systems Engineering: Theory and Practice / Editors S. Flumerfelt [et al]. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. – P. 175-200.

10. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering / Azad M. Madni, Carla C. Madni, Scott D. Lucero // Systems, 2019. – Vol. 7. – P. 7.

UDC 004.93'12

PROSPECTS FOR USING DIGITAL TWIN

Zholotuhina D.I., Tomchik A.A., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Chayeuski V.V. – PhD in Physics and Mathematics

Anotation. This article examines the essence and key features of digital twins as a core technology of Industry 4.0. It describes their structure, operating principles, and role in synchronizing physical and virtual objects. Particular attention is given to potential applications, including increased operational efficiency, the development of predictive maintenance, and integration with IIoT, Big Data, and PLM systems. Applications in industry, urban infrastructure, and ecology are highlighted, as well as the key advantages and existing limitations of the technology.

Keywords. digital twins, industry 4.0, IIoT, Big Data, Predictive maintenance, modeling, digital thread, smart factories, PLM systems, machine learning, industrial automation, monitoring, process optimization.

УДК 621.384.3:681.586

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЁТОК

Ясюкевич М.А., Евсюк А.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Сверхрешётки II типа на основе гетероструктур InAs/GaSb представляют собой перспективный класс материалов для создания инфракрасных фотодетекторов со спектрально настраиваемой длиной волны отклика. Пространственное разделение электронов в слоях InAs и дырок в слоях GaSb обеспечивает подавление Оже-рекомбинации и снижение темновых токов. Разрешённые при нормальном падении оптические переходы между минизонами упрощают конструкцию матричных фотоприёмных устройств. В работе рассматриваются физические принципы работы таких датчиков: формирование минизон, механизмы подавления рекомбинации и туннелирования, транспортные свойства, роль интерфейсов и методы теоретического расчёта зонной структуры. Экспериментально подтверждено высокое структурное совершенство таких структур, обеспечивающее большой выход годных элементов при производстве матричных фотоприёмников.

Ключевые слова. Сверхрешётки II типа; InAs/GaSb; инфракрасные фотодетекторы; Оже-рекомбинация; темновой ток; минизоны; туннелирование; интерфейсы; зонная инженерия.

Введение

Обнаружение инфракрасного излучения необходимо для тепловидения, дистанционного зондирования, газового анализа и систем наведения. Традиционные детекторы имеют недостатки: HgCdTe (КРТ, кадмий-ртуть-теллур) — основной материал для ИК-детекторов токсичен, сложен в производстве и дорог; квантово-ямные структуры (QWIP) ограничены правилами отбора — поглощение возможно только для излучения с поляризацией вдоль слоёв, что требует использования дифракционных решёток для работы при нормальном падении.

Внимание привлекают сверхрешётки II типа на основе InAs/GaSb — технологичная альтернатива с высокими характеристиками. Сверхрешётка — искусственная периодическая полупроводниковая структура из чередующихся слоёв двух материалов толщиной в несколько атомных монослоёв, что создаёт дополнительный периодический потенциал и приводит к образованию минизон разрешённых энергий. Концепция предложена в 1987 г. Смитом и Мэйлхиотом, а после создания эффективных фотодиодов и матриц получила развитие.

Основная часть

Ключевой особенностью системы InAs/GaSb является тип II разорванного выравнивания зон (broken-gap alignment): дно зоны проводимости InAs лежит приблизительно на 0,15 эВ ниже потолка валентной зоны GaSb [1]. Это означает, что электроны локализованы преимущественно в слоях InAs, тогда как дырки — в слоях GaSb. Из-за такого расположения зон электроны и дырки оказываются заперты в разных слоях, а их волновые функции перекрываются преимущественно на гетерограницах, что схематически показано на рисунке 1.

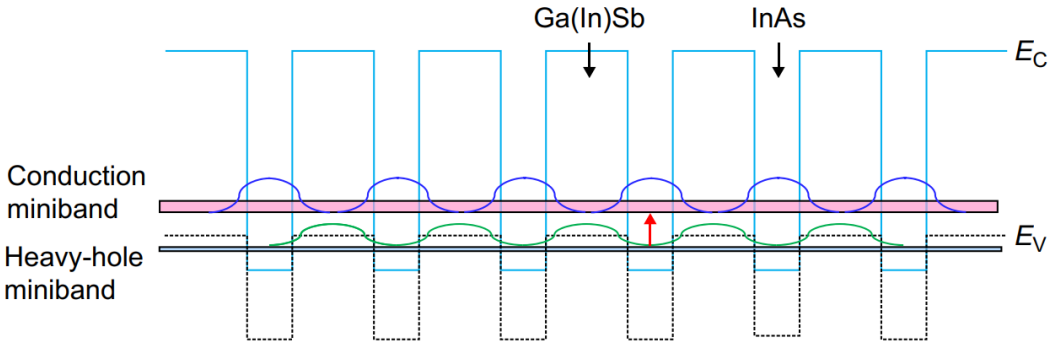


Рисунок 1 – Схема сверхрешётки InAs/GaSb с разорванным выравниванием зон II типа. Показано пространственное разделение волновых функций электронов (в InAs) и тяжёлых дырок (в GaSb). Стрелкой обозначен инфракрасный переход

В одиночной квантовой яме электроны заперты между барьерами, поэтому их энергия принимает лишь дискретные значения. В сверхрешётке же барьеры настолько тонкие, что волновые функции соседних ям перекрываются. В результате каждый дискретный уровень расщепляется в минизону — непрерывную полосу состояний, охватывающую всю структуру. Ширина минизон зависит от проницаемости барьеров. Зазор между первой электронной минизоной C1 и первой минизоной тяжёлых дырок HH1 определяет эффективную ширину запрещённой зоны. Поскольку положение минизон чувствительно к толщинам слоёв, варьирование InAs и GaSb позволяет изменять ширину запрещённой зоны, а значит — настраивать длину волны детектора.

Физический принцип настройки длины волны отклика детектора основан на зависимости положения минизон C1 и HH1 от геометрических параметров структуры. В сверхрешётках II типа эффективная ширина запрещённой зоны определяется разностью энергий между первой электронной минизоной (C1) и первой минизоной тяжёлых дырок (HH1). Увеличение толщины слоёв InAs опускает край электронной минизоны C1, что приводит к сужению запрещённой зоны и, соответственно, к красному сдвигу края поглощения. Увеличение толщины GaSb оказывает более слабое влияние из-за большой эффективной массы дырок.

Экспериментальные данные последних лет демонстрируют управляемое смещение края поглощения в широких пределах. Варьирование толщины слоёв позволяет перекрывать средневолновый и длинноволновый ИК-диапазоны. В частности, изменение толщины слоёв InAs от 8 до 13,5 монослоёв и GaSb от 13 до 7 монослоёв даёт возможность смещать край поглощения от 5,6 до 9 мкм. При проектировании необходимо учитывать также влияние атомного перемешивания на интерфейсах, которое даёт дополнительный красный сдвиг ~0,5 мкм [2].

Возможность работы в длинноволновой области подтверждена в работе, где получены структуры с краем поглощения 10,5 мкм при 77 К, что полностью перекрывает дальний ИК-диапазон (8–14 мкм) [3]. Период составил 7,46 нм, а структура сохраняла монокристалличность даже при 300 периодах. Эти результаты показывают, что сверхрешётки InAs/GaSb могут эффективно работать как в средневолновом (MWIR, mid-wavelength infrared), так и в длинноволновом (LWIR, long-wavelength infrared) диапазонах.

В квантово-ямных фотодетекторах (QWIP) поглощение возможно только для света с поляризацией вдоль слоёв, поэтому при нормальном падении требуется ввод излучения через дифракционные решётки. В сверхрешётках II типа реализуется иной механизм: их запрещённая зона определяется зазором между минизонами C1 и HH1, а оптические переходы являются межзонными [4]. Для таких переходов ограничения на направление света отсутствуют, что упрощает конструкцию матричных фотоприёмников.

Одним из ключевых преимуществ сверхрешёток II типа является подавление Оже-рекомбинации — процесса, при котором энергия рекомбинации электрона и дырки передаётся третьему носителю вместо испускания фотона. Это подавление обусловлено двумя факторами. Во-первых, электроны и дырки пространственно разделены по разным слоям, что снижает вероятность их кулоновского взаимодействия. Во-вторых, в сверхрешётках возникает расщепление подзон тяжёлых (HH1) и лёгких (LH1) дырок; в LWIR-структурах оно превышает ширину запрещённой зоны, делая Оже-7 переходы энергетически запрещёнными [5]. Благодаря этому время жизни носителей в таких структурах может быть на 3–5 порядков больше, чем в детекторах на основе HgCdTe с аналогичной шириной запрещённой зоны.

Эффективное подавление Оже-рекомбинации не приводит к ожидаемо высоким временам жизни носителей: на практике они составляют ~100 нс для MWIR и ~30–35 нс для LWIR, тогда как в HgCdTe могут достигать 1 мкс. Такая разница указывает на доминирование другого механизма — рекомбинации Шокли-Рида-Холла (SRH) на дефектах. В пользу этого говорят температурная зависимость фотолюминесценции ($\sim 1/T^2$) и вклад токов генерации-рекомбинации в темновой ток при 80 К. Природа дефектов пока не ясна: предполагается их локализация вблизи середины запрещённой зоны или у края валентной зоны, но окончательный ответ остаётся предметом исследований [5].

Подавление межзонного туннелирования в сверхрешётках II типа обусловлено большой эффективной массой носителей: мнимый волновой вектор в запрещённой зоне возрастает с увеличением массы, что обеспечивает большую длину туннельного затухания по сравнению с объёмным HgCdTe при той же ширине запрещённой зоны. Благодаря подавлению туннелирования становится возможным использование более высокого уровня легирования, чем в детекторах на основе HgCdTe, что частично компенсирует короткое время жизни носителей, ограниченное SRH-рекомбинацией. Таким образом, анизотропия эффективных масс — не просто физическая особенность, а ключевой инженерный параметр: она одновременно обеспечивает эффективный сбор фототока вдоль слоёв и подавляет туннельные утечки в перпендикулярном направлении.

Транспортные свойства сверхрешёток II типа резко анизотропны, причём для электронов и дырок они проявляются противоположным образом. В структуре InAs/GaSb с периодом (22,6) эффективная масса электронов мала во всех направлениях ($\approx 0{,}022–0{,}023 m_0$), тогда как для тяжёлых дырок в направлении роста она аномально высока ($\approx 1055 m_0$) из-за симметрийного запрета [4]. Это означает, что дырки практически не движутся вертикально, что принципиально важно для понимания транспорта носителей в матричных фотоприёмниках: сбор фототока должен обеспечиваться преимущественно электронами, а конструкция прибора — учитывать слабую вертикальную подвижность дырок.

Особое значение анизотропия приобретает при изготовлении матричных фотоприёмников. Экспериментальное сравнение двух детекторов с одинаковым сопротивлением, но разным темновым током выявило важную закономерность. Устройство с низким темновым током демонстрировало равномерный (плоский) шумовой спектр во всём измеряемом диапазоне частот. В то же время детектор с повышенным током, вызванным утечками по боковым стенкам после формирования отдельных элементов (травления), показал наличие дополнительной составляющей шума, зависящей от частоты [4]. Это означает, что поверхностные утечки не просто увеличивают общий уровень шума, но и принципиально меняют его характер, что способно значительно ухудшить реальные характеристики прибора. Отсюда следует важный практический вывод: даже идеальный объёмный материал может быть испорчен некачественной обработкой поверхности, поэтому контроль процессов травления и пассивации критически важен для сохранения преимуществ детекторов на основе сверхрешёток.

Из-за рассогласования постоянных решёток InAs и GaSb (~0,6%) на гетерограницах возникают упругие напряжения, характер которых зависит от типа интерфейса: InSb-подобный интерфейс частично компенсирует эти напряжения, тогда как GaAs-подобный — усиливает их. При введении тонких слоёв InSb наблюдается увеличение шероховатости интерфейсов, однако, интенсивность фотолюминесценции возрастает в 1,6 раза, а перекрытие волновых функций электронов и дырок увеличивается с 56% до 58–65% за счёт атомного перемешивания [6].

Данный результат показывает, что контролируемое увеличение шероховатости само по себе не ухудшает характеристики структуры, если плотность дислокаций остаётся низкой. В таких условиях атомное перемешивание на интерфейсах выступает не как дефект, а как фактор, повышающий оптическую эффективность за счёт лучшего перекрытия волновых функций. Таким образом, управление процессами атомного перемешивания, то есть взаимного проникновения атомов на границах слоёв, может рассматриваться как дополнительный инструмент оптимизации детекторов на основе сверхрешёток InAs/GaSb.

Ключевая роль интерфейсов подтверждается и при теоретическом моделировании. Для точного предсказания ширины запрещённой зоны и оптических свойств сверхрешёток используется несколько подходов. Одним из наиболее распространённых является k·p-метод, основанный на приближении эффективной массы; он хорошо описывает поведение электронов и дырок в структурах с периодом, соответствующим диапазону 4–10 мкм. Для более тонких слоёв применяют атомистические методы: эмпирический метод псевдопотенциала (EPM) учитывает взаимодействие электронов с атомными остовами, а эмпирический метод сильной связи (ETBM) рассматривает перекрытие атомных орбиталей между соседними атомами. Наиболее строги с фундаментальной точки зрения первопринципные методы, однако они сложны в расчётах и часто занижают запрещённую зону [4]. Важно, что без учёта свойств гетерограниц даже самые точные методы дают существенную погрешность: для длинноволновой сверхрешётки она может достигать 4,5 мкм [4]. Это подтверждает, что понимание процессов на границах слоёв критически важно не только для экспериментальной оптимизации, но и для корректного теоретического описания физических свойств сверхрешёточных структур.

Помимо классической системы InAs/GaSb, существуют и другие сверхрешётки II типа (например, InAs/GaInSb с повышенным поглощением или InAs/InAsSb с увеличенным временем жизни носителей), однако именно гетеропара InAs/GaSb является наиболее изученной и технологически отработанной. Сравнительная характеристика основных типов сверхрешёток II типа обобщена в таблице 1.

Сравнительная характеристика основных типов сверхрешёток II типа

Тип сверхрешётки	Преимущества	Недостатки
InAs/GaSb	Широкий диапазон настройки (2-30 мкм), хорошо изучена	Относительно низкое время жизни (30-100 нс)
InAs/GaInSb	Повышенное поглощение за счёт напряжений	Чувствительность к флуктуациям состава
InAs/InAsSb	Время жизни на порядки выше, меньше дефектов	Ниже поглощение в LWIR-диапазоне

Заключение

Сверхрешётки II типа InAs/GaSb представляют собой систему, в которой разорванное выравнивание зон порождает комплекс взаимосвязанных преимуществ: формирование минизон обеспечивает возможность спектральной перестройки края поглощения в диапазоне от 2 до 30 мкм; расщепление подзон HH1-LH1 и пространственное разделение носителей подавляют Оже-рекомбинацию на 3-5 порядков; большая эффективная масса дырок вдоль направления роста подавляет туннельные токи, позволяя использовать более высокое легирование; межзонный характер оптических переходов обеспечивает поглощение при нормальном падении, упрощая конструкцию матричных фотоприёмников. Основным ограничивающим фактором современных детекторов является рекомбинация Шокли-Рида-Холла через дефектные уровни, дающая время жизни 30-100 нс. Дальнейшее развитие технологии связано с улучшением контроля интерфейсов, где контролируемое атомное перемешивание может повышать оптическую

эффективность, увеличением времени жизни носителей и масштабированием производства на крупноформатные подложки. Уже сегодня такие детекторы позволяют создавать компактные тепловизоры для беспилотных летательных аппаратов и портативных приборов, работающих при повышенных температурах без громоздких систем охлаждения.

Список использованных источников:

1. Ting, D.Z.-Y. Type-II Superlattice Infrared Detectors / D.Z.-Y. Ting, C.J. Hill, A. Soibel, S.A. Keo, J.M. Mumolo, J. Nguyen, S.D. Gunapala // Advances in Infrared Photodetectors / ed. by S.D. Gunapala, D.R. Rhiger, C. Jagadish. – Elsevier, 2011. – P. 1-57.

2. Бакаров, А.К. Сверхрешетки InAs/GaSb для инфракрасных фотоприемников / А.К. Бакаров, М.А. Суханов, А.С. Ярошевич, И.Д. Лошкарев, К.С. Журавлев // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50, № 20. – С. 33-36.

3. Ерошенко, Г.Н. Структурные и оптические свойства InAs/GaSb сверхрешеток, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии / Г.Н. Ерошенко, В.С. Кривобок, И.И. Минаев, А.В. Клековкин, К.А. Савин, А.Е. Гончаров, А.В. Муратов, А.Р. Дубовая, А.А. Пручкина, С.Н. Николаев // Успехи прикладной физики. – 2024. – Т. 12, № 5. – С. 64-68.

4. Fang, S. Simulation of the Band Structure of InAs/GaSb Type II Superlattices Utilizing Multiple Energy Band Theories / S. Fang, R. Hao, L. Zhang, J. Guo, W. Liu // Frontiers in Physics. – 2022. – Vol. 10, Article 822800. – P. 1-19.

5. Kovshov, V.S. Современное состояние разработок и исследований сверхрешеток II типа для приборов ИК-фотоэлектроники (обзор) / V.S. Kovshov, A.V. Nikonov, D.A. Pashkeev, E.A. Lopatina // Успехи прикладной физики. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 97-111.

6. Alshahrani, D. Effect of Interfacial Schemes on the Optical and Structural Properties of InAs/GaSb Type-II Superlattices / D. Alshahrani, M. Kesaria, J.J. Jiménez, D. Kwan, V. Srivastava, M. Delmas, F.M. Morales, B. Liang, D. Huffaker // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2023. – Vol. 15. – P. 8624-8635.

UDC 621.384.3:681.586

PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION OF INFRARED SENSORS BASED ON SUPERLATTICES

Yasyukevich M.A., Evsyuk A.V., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. Type II superlattices based on InAs/GaSb heterostructures represent a promising class of materials for creating infrared photodetectors with spectrally tunable response wavelengths. Spatial separation of electrons in InAs layers and holes in GaSb layers suppresses Auger recombination and reduces dark currents. Optical transitions between minibands, allowed at normal incidence, simplify the design of matrix photodetectors. This paper, based on a literature review, examines the physical principles of operation of such detectors: the formation of minibands, mechanisms for suppressing recombination and tunneling, transport properties, the role of interfaces, and methods for theoretically calculating the band structure. The high structural perfection of such structures, ensuring a high yield of suitable elements in the production of matrix photodetectors, has been experimentally confirmed.

Keywords. Type-II superlattices; InAs/GaSb; infrared photodetectors; Auger recombination; dark current; minibands; tunneling; interfaces; band engineering.

УДК 53.081.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Снопкова А.А., Ворожбицкий М.И. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники1
г. Минск, Республика Беларусь

Кургузова О.Э. – старший преподаватель

Аннотация. В работе мы определяем значение удельного заряда электрона методом отклонения электронного луча осциллографа в поперечном магнитном поле и сравниваем его с табличным значением.

Ключевые слова. Удельный заряд электрона, осциллограф, магнитное поле.

Удельный заряд электрона e/m является одной из важнейших фундаментальных физических величин, характеризующих электрон как элементарную частицу. Данная величина показывает отношение электрического заряда электрона к его массе и широко используется в различных разделах физики, включая электродинамику, атомную физику и физику плазмы. Экспериментальное определение удельного заряда электрона играет важную роль в изучении свойств элементарных частиц и подтверждении основных законов электромагнетизма.

Существует несколько экспериментальных методов определения удельного заряда электрона. Наиболее распространёнными являются методы, основанные на исследовании движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях. В этих методах используется тот факт, что на движущуюся заряженную частицу, находящуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца, которая изменяет направление её движения. Анализируя параметры движения электрона в известных полях, можно определить отношение его заряда к массе.

В работе для определения удельного заряда электрона методом отклонения электронного пучка в поперечном магнитном поле используется вакуумная электронно-лучевая трубка электронного осциллографа со встроенным внутри плоским конденсатором, в которой пучок электронов отклоняется магнитным полем соленоида; стабилизированный выпрямитель В-24; мультиметр для измерения силы тока; реостат с сопротивлением 30 Ом.

На рисунке 1 представлена схема установки для определения удельного заряда электрона методом отклонения электронного пучка в поперечном магнитном поле. Накаливаемый катод *F*, помещенный в трубку, откаченную до предела, допускаемого современной техникой вакуума, является обильным источников электронов. Электроны, эмитирующие из нити накала *F* и ускоренные разностью потенциалов *U*, приложенной между катодом *F* и анодом *A*, приобретаают скорость $\vec{v}$. Двигаясь вдоль оси трубки *x*, они попадают в поперечное магнитное поле, создаваемое катушкой с током *K*. Катушка размещена таким образом, что вектор магнитной индукции $\vec{B}$ создаваемого ею поля направлен вдоль оси *z*, то есть, перпендикулярен скорости движения электронов $\vec{v}$.

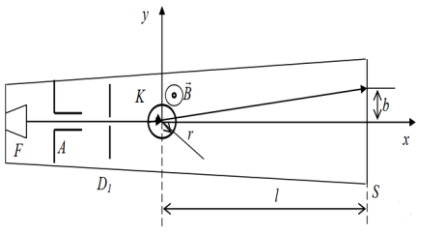


Рисунок 1. Принципиальная схема установки для определения удельного заряда электрона методом отклонения в поперечном магнитном поле

Электроны, эмитирующие из нити накала (катода) *F*, ускоряются в электрическом поле, создаваемом между катодом и анодом *A* и приобретают скорость v, величина которой удовлетворяет равенству

$$\frac{mv^2}{2} = eU, \tag{1}$$

где U – ускоряющая разность потенциалов между катодом и анодом.

Вектор силы Лоренца, действующей на электрон, направлен перпендикулярно векторам $\vec{v}$ и $\vec{B}$ (вдоль оси *y*). Это следует из правила левой руки и векторного произведения в выражении для силы Лоренца. В рассматриваемом случае скорость электрона направлена вдоль оси x, а магнитное поле —

вдоль оси z, поэтому возникающая сила отклоняет электрон в направлении, перпендикулярном обоим векторам. Модуль силы Лоренца определяется выражением

$$F = evB \cdot sin\frac{\pi}{2} = evB. \quad (2)$$

Под действием силы Лоренца скорость электрона изменяется только по направлению, электрон внутри катушки движется по дуге окружности, и изменение скорости характеризуется центростремительным ускорением. Учитывая всё вышеперечисленное второй закон Ньютона приобретает вид

$$F = ma \quad \rightarrow \quad evB = ma \quad \rightarrow \quad evB = \frac{mv^2}{R}. \quad (3)$$

Радиус дуги окружности движения электрона внутри катушки с током, определяется по формуле:

$$R = \frac{r(r+l)}{b}, \quad (4)$$

где *b* – отклонение электронного луча на экране.

Магнитная индукция поля, создаваемого катушкой с током, определяется по формуле:

$$B = \mu\mu_0 In, \quad (5)$$

где μ – магнитная проницаемость среды, μ_0– магнитная постоянная, I – сила тока в катушке, n – число витков катушки на единицу длины.

В результате расчётная формула для определения удельного заряда электрона приобретает вид:

$$\frac{e}{m} = \frac{2Ub^2}{[\mu\mu_0 Inr(l+r)]^2}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения удельного заряда электрона необходимо измерить отклонение электронного луча *b* и силу тока в катушке *I*.

Для определения удельного заряда электрона мы выполнили следующие действия с установками:

1. Включили в сеть осциллограф и выпрямитель.

2. Ручками перемещения луча осциллографа ↕ ↔ вывели электронный пучок в центр экрана осциллографической трубки (нулевое положение).

3. Отрегулировали с помощью ручек «Яркость» и «Фокус» яркость и размеры пятна на экране осциллографа.

4. Установили напряжение U_1 на выходе выпрямителя, измерили 5 раз силу тока I в катушке и величину смещения электронного луча b на экране осциллографа. Повторили эксперимент при других трёх значениях напряжения (U_2, U_3, U_4). Записали результаты измерений в таблицу 1.

5. Вычислили значение удельного заряда электрона по результатам каждого опыта по формуле 6.

6. Вычислили среднее арифметическое значение удельного заряда электрона всех результатов измерений по формуле

$$\frac{\overline{e}}{m} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{e}{m}\right)_i, \quad (7)$$

где *n* – число опытов.

Результаты вычислений занесли в таблицу 1.

Обработка результатов измерений включала следующее:

1. Методом расчёта погрешностей прямых измерений находим относительную ε_I и полную абсолютную погрешность прямых измерений силы тока ΔI в катушке, для чего выполнили следующее:

Таблица 1. Результаты проведения экспериментов

Напряжение	Сила тока I, А	Смещение луча $b \cdot 10^{-3}$, м	Значение $e/m \cdot 10^{11}$, Кл/кг	Среднее значение $(\overline{e/m})_i \cdot 10^{11}$, Кл/кг
U_1	0,825	9	1,701	1,489
	0,827	8	1,341	
	0,822	8	1,349	
	0,820	8	1,352	
	0,825	9	1,701	
U_2	0,925	9	1,517	1,516
	0,927	9	1,514	
	0,925	9	1,517	
	0,925	9	1,517	
	0,927	9	1,514	
U_3	1,075	10	1,612	1,614
	1,072	10	1,616	
	1,062	10	1,613	
	1,062	10	1,613	
	1,072	10	1,616	
U_4	1,250	10	1,386	1,520
	1,232	10	1,406	
	1,227	10	1,412	
	1,232	11	1,702	
	1,237	11	1,695	

1.1) Определили случайные отклонения отдельных измерений и их квадраты следующим образом: $\Delta I = I_i - \bar{I}$; $\Delta I^2 = (I_i - \bar{I})^2$.

1.2) Используя значения, полученные ранее вычислили среднеквадратичную ошибку серии из 5 измерений по формуле

$$S_{\bar{I}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\Delta I^2} = 1{,}30 \cdot 10^{-3} A. \quad (8)$$

1.3) Определили доверительные границы, за пределы которых с заданной доверительной вероятностью не выйдет истинное значение силы тока:

$$\bar{I} - \Delta I_{\text{случ}} \le I \le \bar{I} + \Delta I_{\text{случ}}. \quad (9)$$

1.4) Определили приборную ошибку измерений $\Delta I_{\text{пр}}$, как половину цены деления прибора, использующегося в эксперименте:

$$\Delta I_{\text{пр}} = \frac{1}{2}(\text{цен. дел.}) = 0{,}0125 = 12{,}5 \cdot 10^{-3}\ A. \quad (10)$$

1.5) Определили полную абсолютную погрешность измерения величины I_1:

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_{\text{случ}}{}^2 + \Delta I_{\text{пр}}{}^2} = 13{,}02 \cdot 10^{-3}\ A\,. \quad (11)$$

1.6) Относительную погрешность определили данным образом:

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{\bar{I}} \cdot 100\% = \frac{13{,}02 \cdot 10^{-3}\ A}{0{,}823\ A} \cdot 100\% \approx 1{,}6\%. \quad (12)$$

2. По аналогии вычислили погрешности измерения величин I_2, I_3, I_4, I_4.

3. По аналогии методом расчёта погрешностей прямых измерений находим относительную ε_b и полную абсолютную погрешность прямых измерений смещения электронного луча на экране осциллографа Δb.

Погрешность полученных измерений не превышает значения относительной погрешности в лабораториях физического практикума (1-10%).

4. Определили полную абсолютную погрешность удельного заряда электрона с учётом всех погрешностей измерений, проводимых для определения значение удельного заряда электрона методом отклонения электронного луча поперечным магнитным полем.

Определили полную абсолютную погрешность косвенных измерений значения удельного заряда электрона методом отклонения электронного луча в поперечном магнитном поле по следующей формуле

$$(\Delta\frac{e}{m})_i = \frac{2Ab}{I^2}\Delta b - \frac{2Ab^2}{I^3}\Delta I, \quad (13)$$

где A= $\frac{2U}{\mu^2\mu_0^2n^2r^2(l+r)^2} = 17{,}33\cdot10^{12}$. Результаты вычислений занесли в таблицу 2.

Таблица 2. Погрешности всех измерений, произведенных в части II

№	$\bar{I}_i$, А	ΔI_i, А	$\bar{b}_i \cdot 10^{-3}$, м	$\Delta b_i \cdot 10^{-3}$, м	$\left(\overline{e/m}\right)_i \cdot 10^{11}$, Кл/кг	$\Delta\left(\overline{e/m}\right)_i \cdot 10^{11}$, Кл/кг
1	0,823	0,013	8,3	0,84	1,489	0,003
2	0,926	0,012	9,0	0,50	1,516	0,001
3	1,068	0,015	10,0	0,50	1,614	0,001
4	1,236	0,017	8,3	0,84	1,520	0,001
Среднее значение		-	-	-	1,535	-

Результаты обработки измерений величины $\frac{e}{m}$ записали в интервальной форме: $\frac{e}{m} = (\frac{\overline{e}}{m} \pm \Delta\frac{e}{m})$ Кл/кг.

$$\frac{e}{m} = (1{,}535 \pm 0{,}003)\cdot 10^{11}\ \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}. \quad (14)$$

Далее был вычислен процент расхождения полученного среднего значения удельного заряда электрона с его табличной величиной. В качестве табличного значения использовалось $\frac{e}{m}$ = $1{,}758\cdot 10^{11}$Кл/кг Процент расхождения определялся по формуле

$$\delta = \frac{\left|\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{табл}} - \frac{\overline{e}}{m}\right|}{\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{табл}}}\cdot 100\% \approx 13\%. \quad (15)$$

Все расчеты сделаны на персональном компьютере с использованием табличного процессора Microsoft Excel и программы MathCAD для уменьшения вероятности арифметических ошибок и повышения точности вычислений.

Таким образом, нами был экспериментально определен удельный заряд электрона методом отклонения электронного луча на экране осциллографа в поперечном магнитном поле. Полученное значение равно $\frac{e}{m} = (1{,}535 \pm 0{,}003)\cdot 10^{11}\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

Процент расхождения полученного значения с табличной величиной составляет 13%. Погрешность обусловлена влиянием человеческого фактора и факторов окружающей среды, а также несовершенством экспериментальной установки. Несмотря на это, полученное значение имеет правильный порядок величины и удовлетворительно согласуется с табличными данными, что подтверждает корректность использованного метода и работоспособность экспериментальной схемы определения удельного заряда электрона.

Список используемых источников:

1. Годлевская, А. Н. Физика атома и атомных явлений / А. Н. Годлевская. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2015. – 47 с.

2. Емельянов, В. А. Методы обработки результатов измерений в лаборатории физпрактикума / В. А. Емельянов, Д. Л. Лин, В. Ф. Шолох. – Мн. : Бестпринт, 1997. – 90 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 4 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – М. : КноРус, 2012. – 576 с.

4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Ч. 1 : Атомная физика / Д. В. Сивухин. – М.: Наука, 1986. – 416 с.

5. Трофимова, Т. И. Курс общей физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1985. – 432 с.

UDC 53.081.6

DETERMINATION OF SPECIFIC CHARGE OF ELECTRON

Snopkova A.A., Vorozhbitsky M.I., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kurguzova O.E. – Senior Lecturer

Annotation. In this work, we determine the value of the specific charge of an electron by deflecting the electron beam of an oscilloscope in a transverse magnetic field and compare it with the table value, as a result of which we learn that the result obtained is included in the confidence interval.

Keywords. Specific charge of an electron, oscilloscope, magnetic field.

УДК 004.85:539.121.667

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Устимчук Р.В., Шубаба М.И. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Храмович Е.М. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе рассмотрено применение машинного обучения в физике высоких энергий для преодоления «вычислительного кризиса» на Большом адронном коллайдере. Была описана эволюция методов идентификации струй и использование генеративных моделей (GAN, диффузионные сети) для ускорения симуляций в эксперименте CMS. Особое внимание уделено физически информированным нейросетям (PINN), интегрирующим законы физики в обучение, с примером реализации на PyTorch. Также проанализированы ограничения машинного обучения в физике, включая проблемы обобщения и интерпретируемости.

Ключевые слова. Машинное обучение, физика высоких энергий, эксперимент CMS, идентификация струй, графовые нейронные сети, генеративно-состязательные сети, физически информированные нейронные сети (PINN), автоматическое дифференцирование, триггерная система, Большой адронный коллайдер.

Современная физика столкнулась с огромным потоком данных. Примером может послужить, детектор CMS на Большом адронном коллайдере регистрирует до 40 миллионов столкновений протонов в секунду. Объёмы информации достигают петабайт, и классические методы анализа уже не справляются [1, 2]. Мы решили разобраться, как машинное обучение помогает решать эту проблему. Оно способно быстро фильтровать данные прямо во время эксперимента, а также моделировать сложные физические процессы. В нашей работе мы рассмотрели применение машинного обучения от фильтрации данных до моделирования с помощью физически информированных нейросетей. Особый акцент мы сделали на подготовке к повышению светимости коллайдера (так называемая эра высокой светимости), когда поток данных возрастёт ещё в несколько раз.

Вычислительный кризис и роль машинного обучения в эксперименте CMS. Главная задача физиков высоких энергий заключается в отделении редких сигналов новых частиц от огромного фона. Сложность в том, что мы не измеряем интересующие величины напрямую, а только то, что можем зарегистрировать [2]. Нам приходится решать обратные задачи - связывать измерения с теорией.

В эксперименте CMS для этого используется триггерная система - фильтр реального времени, который за микросекунды решает, сохранять событие или нет. Раньше триггеры работали по простым правилам: она работала на двухуровневой схеме: Первичный уровень (L1) на электронике принимал решение за микросекунды, а последующий - высокоуровневый триггер (HLT) - использовал компьютерные фермы [3]. Однако с ростом интенсивности столкновений старые методы перестали успевать. При мегагерцовой частоте события накладываются друг на друга, и классический фильтр Калмана (метод восстановления треков частиц) не справляется с такими объёмами [4].

Выход нашёлся в глубоких нейросетях, так как они хорошо распознают образы, легко распараллеливаются и масштабируются. Именно это нужно для работы в реальном времени. Сегодня нейросетевые алгоритмы постепенно заменяют классические методы и на этапе триггера, и при восстановлении треков.

Эволюция методов идентификации струй. После столкновения частиц рождаются струи - направленные потоки адронов, которые образуются при превращении кварков и глюонов в частицы. Физикам важно знать, какой именно партон (кварк или глюон) породил струю. Например, нужно отличать струи от b-кварков от струй от лёгких кварков - это необходимо для поиска распада бозона Хиггса на b-кварки [5].

За последние годы методы идентификации струй сильно изменились. Долгое время использовались градиентный бустинг (каждое следующее дерево обучается решать ошибки предыдущих) и случайный лес (использование ансамбля решающих деревьев), которые давали хорошую точность и были понятны человеку. Затем на смену этому пришли свёрточные нейронные сети (CNN). Струю стали представлять как изображение в координатах детектора, где яркость пикселя соответствует энергии частицы. Свёрточные сети научились выделять пространственные закономерности ливня.

Самый современный подход - графовые нейронные сети (GNN). В них частицы внутри струи становятся узлами графа, а связи между ними - рёбрами. Так учитывается сложная структура распада, и не нужно привязываться к фиксированной сетке, как в свёрточных сетях [6]. В работе Саркара показано, что графы и трансформеры достигли рекордной точности идентификации струй в эксперименте CMS [7]. Сравнение методов мы привели в таблице 1.

Отдельно нами была рассмотрена разработка WOMBAT - система триггера на машинном обучении для поиска распадов бозона Хиггса на b-кварки [3]. В этой системе используются две нейросети:

Таблица 1 - Сравнение методов идентификации струй

Метод	Представление данных	Ключевая особенность
Бустируемые деревья	Вектор признаков	Интерпретируемость
Сверточные сети (CNN)	Изображение (η-φ пространство)	Выделение пространственных паттернов
Графовые сети (GNN)	Граф частиц	Учет топологии, отсутствие фикс. сетки
Трансформеры	Последовательность частиц	Механизм внимания, учет контекста

основная и облегчённая версия, которую поместили на FPGA (чип, который можно перестраивать под конкретную задачу). Тесты показали, что новый триггер срабатывает более чем в два раза быстрее старого и может отбирать события с меньшей энергией. Это позволяет не пропускать слабые сигналы, которые раньше терялись.

Ускорение симуляций с помощью генеративных моделей. Симуляции - узкое место любого анализа. Полный просчёт прохождения частиц через детектор в программах типа Geant4 занимает минуты на одно событие. Если нужно набрать статистику для редкого распада, такие расчёты становятся невозможными. Решение нашли в генеративных моделях.

Одними из первых применили генеративно-состязательные сети (GAN). В них одна сеть (генератор) создаёт фальшивый отклик детектора из случайного шума, а другая (дискриминатор) пытается отличить подделку от реальных данных. В результате генератор учится выдавать распределения, неотличимые от настоящих. Симуляция ливней в калориметрах ускоряется на порядки, а ключевые статистические характеристики сохраняются [6]. Например, модель CaloShowerGAN для эксперимента ATLAS легко встраивается в быструю симуляцию и работает лучше предыдущих версий [8].

Более новый подход - диффузионные модели. В работе Петрова показано, что они дают качество на 1,6 % выше, чем GAN [9]. Проблема диффузионных моделей - много шагов генерации, но их научились сокращать, переходя к предсказуемому режиму. Это ускоряет расчёты в десять раз с минимальными потерями качества.

Перевзвешивание событий и доменная адаптация. Когда светимость коллайдера вырастет, хранить отдельные наборы смоделированных событий для каждого варианта расчётов станет невозможно. Мы выяснили, что помогает перевзвешивание с помощью машинного обучения: вместо нового прогона симуляции можно взять готовые события и пересчитать их веса под новые условия [6].

Ещё один метод - доменно-состязательное обучение. Его применили для улучшения поиска мюонов. Классические способы оценки фона опираются на независимость переменных, но если переменные связаны (корреляция), расчёты становятся неточными. Нейросеть, которую обучили отличать нужные мюоны от фоновых, научили также игнорировать информацию о степени изоляции частицы. В итоге связь между решающим признаком и изоляцией уменьшилась, а идентификация мюонов стала точнее [6].

Физически информированное машинное обучение (PINN). Обычные нейросети часто называют “чёрными ящиками”: они могут предсказать что угодно, даже если это противоречит законам физики. Обучаясь на данных, такие сети хорошо работают внутри знакомого диапазона, но за его пределами начинают ошибаться, и объяснить их решения трудно [10].

Физически информированные нейросети (PINN) решают эту проблему иначе: они учатся не только на данных, но и на уравнениях, описывающих процесс [11]. Например, если есть дифференциальное уравнение, сеть принимает на вход координаты и время и пытается восстановить решение. Благодаря автоматическому дифференцированию она может вычислять производные и проверять, выполняется ли уравнение в каждой точке (рисунки 1) [12]. Ошибка считается дважды: если предсказание расходится с известными данными (начальными условиями) и если нарушается само уравнение. Чем меньше вторая ошибка, тем лучше сеть следует физике [13].

В качестве примера рассмотрим затухающие гармонические колебания. Их движение описывается формулой 1:

$$m\frac{d^2u}{dt^2} + \mu\frac{du}{dt} + k\,u = 0, \quad (1)$$

где $\mathrm{m}\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{u}}{\mathrm{dt}^2}$ – сила инерции, $\mu\frac{\mathrm{du}}{\mathrm{dt}}$ – сила вязкого трения, $k\,u$ – сила упругости.

```python
import torch
import torch.nn as nn
import numpy as np

# 1. Определение архитектуры нейросети
class FCN(nn.Module):
    def __init__(self, n_input, n_output, n_hidden, n_layers):
        super().__init__()
        layers = [nn.Linear(n_input, n_hidden), nn.Tanh()]
        for _ in range(n_layers - 1):
            layers.extend([nn.Linear(n_hidden, n_hidden), nn.Tanh()])
        layers.append(nn.Linear(n_hidden, n_output))
        self.model = nn.Sequential(*layers)

    def forward(self, x):
        return self.model(x)

# 2. Параметры системы
d, w0 = 2, 20  # коэффициент затухания и частота
mu, k = 2*d, w0**2

# 3. Подготовка данных
t_physics = torch.linspace(0, 1, 500).view(-1, 1).requires_grad_(True)
t_boundary = torch.tensor([[0.]], requires_grad=True)

# 4. Обучение
pinn = FCN(1, 1, 32, 3)
optimizer = torch.optim.Adam(pinn.parameters(), lr=1e-3)
for i in range(10000):
    optimizer.zero_grad()

    # Loss на начальных условиях
    u_b = pinn(t_boundary)
    loss_boundary = torch.mean((u_b - 1)**2)

    # Физический loss (невязка уравнения)
    u = pinn(t_physics)
    u_t = torch.autograd.grad(u, t_physics, torch.ones_like(u), create_graph=True)[0]
    u_tt = torch.autograd.grad(u_t, t_physics, torch.ones_like(u_t), create_graph=True)[0]

    physics_residual = u_tt + mu*u_t + k*u
    loss_physics = torch.mean(physics_residual**2)

    # Общий loss
    loss = loss_boundary + loss_physics
    loss.backward()
    optimizer.step()

    if i % 1000 == 0:
        print(f"Итерация {i}, Loss: {loss.item():.6f}")
```

Рисунок 1 – Реализация PINN на PyTorch

Ключевые моменты: requires_grad_(True) разрешает вычисление производных по времени, torch.autograd.grad вычисляет производные внутри графа, physics_residual - мера соблюдения физики. Обучение идёт без подачи правильных ответов, только на основе уравнения (рисунки 2а, 2б).

Для более сложных задач подход расширяют [14]. Например, для уравнения теплопроводности (формула 2) нужно учитывать производные по всем координатам:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z}\right), \tag{2}$$

где $\frac{\partial u}{\partial t}$ – скорость изменения величины u во времени, $\alpha\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)$ – конвективный перенос вдоль оси x с коэффициентом α, $\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z}$ – производная второго порядка, которая может описывать, например, диффузионные процессы в анизотропной среде(как в механике сплошных сред).

```
import torch

def heat_equation_residual(model, x, y, t, alpha):
    """
    Вычисляет невязку уравнения теплопроводности u_t = alpha * (u_xx + u_yy)
    для заданных точек (x, y, t).

    Аргументы:
        model: нейросеть, принимающая тензор [x, y, t] и возвращающая u.
        x, y, t: тензоры формы (N, 1) с координатами точек.
        alpha: коэффициент температуропроводности (скаляр или тензор).

    Возвращает:
        Тензор невязки формы (N, 1) для каждой точки.
    """
    # Объединяем координаты в один входной тензор
    inputs = torch.cat([x, y, t], dim=1)
    # Убедимся, что для входов включено вычисление градиентов
    inputs.requires_grad_(True)

    u = model(inputs)

    # Первые производные
    u_x = torch.autograd.grad(
        u, x,
        grad_outputs=torch.ones_like(u),
        create_graph=True,
        retain_graph=True
    )[0]
    u_y = torch.autograd.grad(
        u, y,
        grad_outputs=torch.ones_like(u),
        create_graph=True,
        retain_graph=True
    )[0]
    u_t = torch.autograd.grad(
        u, t,
        grad_outputs=torch.ones_like(u),
        create_graph=True,
        retain_graph=True
    )[0]
    # Вторые производные
    u_xx = torch.autograd.grad(
        u_x, x,
        grad_outputs=torch.ones_like(u_x),
        create_graph=True,
        retain_graph=True
    )[0]
    u_yy = torch.autograd.grad(
        u_y, y,
        grad_outputs=torch.ones_like(u_y),
        create_graph=True,
        retain_graph=True
    )[0]
    # Невязка дифференциального уравнения
    residual = u_t - alpha * (u_xx + u_yy)
    return residual
def compute_physics_loss(model, x, y, t, alpha):
    """
    Вычисляет MSE-потерь для уравнения теплопроводности.
    Аргументы:
        model: нейросеть.
        x, y, t: тензоры координат.
        alpha: коэффициент температуропроводности.
    Возвращает:
        Скалярный тензор – среднеквадратичная невязка.
    """
    residual = heat_equation_residual(model, x, y, t, alpha)
    loss = torch.mean(residual ** 2)
    return loss
```

Рисунок 2а – Реализация PINN на PyTorch (взвешивание ошибок с коэффициентами)

Разные части ошибки могут конфликтовать, поэтому их взвешивают с коэффициентами (формула 3):

$$\text{Loss} = \lambda_{\text{pde}}\text{L}_{\text{pde}} + \lambda_{\text{bc}}\text{L}_{\text{bc}} + \lambda_{\text{ic}}\text{L}_{\text{ic}} + \lambda_{\text{data}}\text{L}_{\text{data}} \quad , \tag{3}$$

где L_{pde} – штраф за то, что предсказания сети нарушают физический закон, L_{bc} – штраф за нарушение условий на границах области, L_{ic} – штраф за нарушение условий в начальный момент времени, L_{data} – обычная ошибка, если есть экспериментальные данные, λ - весовые коэффициенты, которые могут адаптивно меняться в процессе обучения [11].

```
import torch
import torch.nn as nn
import numpy as np

# ---------------------------------------------------------
# 1. Определим простую полносвязную сеть для PINN
# ---------------------------------------------------------
class PINN(nn.Module):
    def init(self, layers):
        super(PINN, self).init()
        self.activation = nn.Tanh()
        self.linears = nn.ModuleList()
        for i in range(len(layers)-1):
            self.linears.append(nn.Linear(layers[i], layers[i+1]))
            # Инициализация Xavier для лучшей сходимости
            nn.init.xavier_normal_(self.linears[-1].weight)
            nn.init.zeros_(self.linears[-1].bias)

    def forward(self, x):
        for i in range(len(self.linears)-1):
            x = self.activation(self.linears[i](x))
        x = self.linears[-1](x)  # без активации на выходе
        return x

# ---------------------------------------------------------
# 2. Функция потерь с весовыми коэффициентами
# ---------------------------------------------------------
def compute_loss(model, x_pde, t_pde, x_bc, t_bc, u_bc, x_ic, t_ic, u_ic,
                 lambda_pde=1.0, lambda_bc=1.0, lambda_ic=1.0, lambda_data=0.0,
                 x_data=None, t_data=None, u_data=None):
    """
    model: нейросеть, принимающая [x, t] и возвращающая u
    x_pde, t_pde: точки внутри области для PDE (коллокационные точки)
    x_bc, t_bc, u_bc: точки на границе с известными значениями
    x_ic, t_ic, u_ic: точки в начальный момент времени
    x_data, t_data, u_data: экспериментальные данные (если есть)
    lambda_*: весовые коэффициенты для каждого слагаемого
    """
    # ---- PDE loss (невязка уравнения) ----
    # Требуем градиенты для x_pde, t_pde
    x_pde.requires_grad_(True)
    t_pde.requires_grad_(True)
    u = model(torch.cat([x_pde, t_pde], dim=1))

    # Производные по времени и пространству
    u_t = torch.autograd.grad(u, t_pde, grad_outputs=torch.ones_like(u),
                              create_graph=True, retain_graph=True)[0]
    u_x = torch.autograd.grad(u, x_pde, grad_outputs=torch.ones_like(u),
                              create_graph=True, retain_graph=True)[0]
    u_xx = torch.autograd.grad(u_x, x_pde, grad_outputs=torch.ones_like(u_x),
                               create_graph=True, retain_graph=True)[0]

    # Уравнение теплопроводности: u_t = alpha * u_xx
    alpha = 0.01  # коэффициент температуропроводности
    pde_residual = u_t - alpha * u_xx
    loss_pde = torch.mean(pde_residual**2)

    # ---- Boundary loss (граничные условия) ----
    u_bc_pred = model(torch.cat([x_bc, t_bc], dim=1))
    loss_bc = torch.mean((u_bc_pred - u_bc)**2)

    # ---- Initial loss (начальные условия) ----
    u_ic_pred = model(torch.cat([x_ic, t_ic], dim=1))
    loss_ic = torch.mean((u_ic_pred - u_ic)**2)

    # ---- Data loss (подгонка под экспериментальные данные) ----
    loss_data = 0.0
    if x_data is not None:
        u_data_pred = model(torch.cat([x_data, t_data], dim=1))
        loss_data = torch.mean((u_data_pred - u_data)**2)

    # Общий loss
    total_loss = (lambda_pde * loss_pde +
                  lambda_bc  * loss_bc +
                  lambda_ic  * loss_ic +
                  lambda_data * loss_data)

    return total_loss, loss_pde, loss_bc, loss_ic, loss_data

# ---------------------------------------------------------
# 3. Генерация обучающих точек (пример для 1D)
# ---------------------------------------------------------
def generate_training_data(N_pde=1000, N_bc=100, N_ic=100, x_range=[0,1], t_range=[0,1]):
    # Внутренние точки для PDE (Latin Hypercube Sampling – здесь просто случайные)
    x_pde = torch.rand(N_pde, 1) * (x_range[1] - x_range[0]) + x_range[0]
    t_pde = torch.rand(N_pde, 1) * (t_range[1] - t_range[0]) + t_range[0]

    # Граничные условия (например, u=0 на обеих границах)
    x_bc_left = torch.ones(N_bc//2, 1) * x_range[0]
    x_bc_right = torch.ones(N_bc - N_bc//2, 1) * x_range[1]
    x_bc = torch.cat([x_bc_left, x_bc_right], dim=0)
    t_bc = torch.rand(N_bc, 1) * (t_range[1] - t_range[0]) + t_range[0]
    u_bc = torch.zeros(N_bc, 1)  # нулевые граничные условия

    # Начальные условия (t=0) – например, u = sin(pi*x)
    x_ic = torch.rand(N_ic, 1) * (x_range[1] - x_range[0]) + x_range[0]
    t_ic = torch.zeros(N_ic, 1)
    u_ic = torch.sin(np.pi * x_ic)

    return x_pde, t_pde, x_bc, t_bc, u_bc, x_ic, t_ic, u_ic

# ---------------------------------------------------------
# 4. Пример обучения
# ---------------------------------------------------------
if name == "main":
    # Параметры
    layers = [2, 50, 50, 50, 1]  # вход: [x, t], выход: u
    model = PINN(layers)
    optimizer = torch.optim.Adam(model.parameters(), lr=1e-3)

    # Генерация данных
    x_pde, t_pde, x_bc, t_bc, u_bc, x_ic, t_ic, u_ic = generate_training_data()

    # Весовые коэффициенты (можно менять в процессе обучения)
    lambda_pde = 1.0
    lambda_bc  = 10.0  # увеличиваем вес граничных условий для жёсткого соблюдения
    lambda_ic  = 10.0
    lambda_data = 0.0  # данных нет

    # Обучение
    for epoch in range(5000):
        optimizer.zero_grad()
        loss, loss_pde, loss_bc, loss_ic, _ = compute_loss(
            model, x_pde, t_pde, x_bc, t_bc, u_bc, x_ic, t_ic, u_ic,
            lambda_pde, lambda_bc, lambda_ic, lambda_data
        )
        loss.backward()
        optimizer.step()

        if epoch % 500 == 0:
            print(f"Epoch {epoch:5d}, Total Loss: {loss.item():.2e}, "
                  f"PDE: {loss_pde.item():.2e}, BC: {loss_bc.item():.2e}, IC: {loss_ic.item():.2e}")

    print("Обучение завершено.")
```

Рисунок 2б – Реализация PINN на PyTorch (взвешивание ошибок с коэффициентами)

Для очень сложных систем используют ResNet-блоки, чтобы градиенты не затухали, и сеть Siren с синусоидальной активацией - она лучше передаёт высокие частоты [14].

Одно из применений PINN - моделирование магнитного поля в детекторе. Вместо огромных таблиц с замерами обучают сеть со встроенными уравнениями Максвелла. Она становится компактным симулятором поля и автоматически следит за выполнением физических законов (например, div B = 0) [14]. Недавние разработки DAL-PINN, основанные на принципе Даламбера, объединяют уравнения для разных режимов и повышают точность [15].

Ещё одна задача - описание квантовых систем многих частиц. Обычными методами невозможно рассчитать волновую функцию даже для нескольких десятков частиц - информации слишком много. Нейросети предлагают компактное представление - нейронные квантовые состояния [6]. Сеть учится представлять волновую функцию, минимизируя энергию системы. Метод хорошо работает там, где стандартный квантовый Монте-Карло пасует (знаковая проблема). Когда в сеть встроили законы сохранения, расчёты молекул ускорились в десять раз с сохранением химической точности [6].

Другая задача - слабое гравитационное линзирование. Тёмная материя искажает формы далёких галактик, и свёрточные сети помогают выделить эти крошечные искажения из шумов [6]. Недавно китайские физики создали сеть, которая не просто предсказывает, а выдаёт символьные формулы для параметров гало тёмной материи. Она указала конкретный диапазон сечения взаимодействия, который проверят телескопы Euclid и JWST [6].

В эксперименте TAIGA нейросети отсеивают фон адронов (превышение фона в 10 000 раз) и за 21 час наблюдений Крабовидной туманности достигли уровня сигнала выше 5σ [16]. Полносвязные сети определяют направление космических ливней с ошибкой около 0,3 градуса [17].

Тем не менее, нейросети часто остаются “чёрными ящиками” - непонятно, на какие признаки они опираются [10, 18]. Кроме того,, они плохо обобщают результаты за пределы данных, на которых учились, а это критично для поиска новой физики. Также обучение некоторых моделей (особенно GAN и нейроквантовых состояний) бывает нестабильным. И наконец, сами нейросети требуют огромных вычислительных ресурсов, и иногда выигрыш в скорости съедается затратами на обучение. В обзоре по PINN дополнительно выделяют проблемы многоцелевой оптимизации и обработки разрывов [10].

Таким образом, в ходе нашей работы было проанализировано применение машинного обучения в физике высоких энергий. Выяснилось, что современные эксперименты, такие как CMS, уже не могут обходиться без нейросетей - они фильтруют данные в реальном времени и помогают восстанавливать события. Была прослежена эволюция методов идентификации струй от бустируемых деревьев до графовых нейронных сетей и обнаружено, что точность распознавания вышла на новый уровень. Генеративные модели (GAN и диффузионные) позволяют на порядки ускорить симуляцию ливней, сохраняя при этом физику.

В работе разобраны физически информированные нейросети (PINN) на примере кода для колебаний и показали, как их масштабируют для решения уравнений Максвелла и Навье - Стокса. Также было рассмотрено применение машинного обучения в квантовой физике и астрофизике. Нейросети остаются трудно интерпретируемыми, они плохо обобщают за пределы обучения и требуют больших ресурсов. Мы считаем, что гибридные подходы, сочетающие физические законы с гибкостью машинного обучения, - самое перспективное направление для дальнейших исследований.

Список использованных источников:

1. Доленко, С.А. Машинное обучение в физике: вводная лекция [Электронный ресурс] / С.А. Доленко. – М., 2023. – Режим доступа: http://phys.msu.ru/lectures/dolenko_ml_2023.pdf. – Дата доступа: 20.03.2026.
2. CMS and machine learning at the forefront of data management [Электронный ресурс] // CERN. – Режим доступа: https://cms.cern/news/cms-and-machine-learning-forefront-data-management. – Дата доступа: 01.02.2026.
3. CMS releases open data for machine learning [Электронный ресурс] // CERN. – Режим доступа: https://cms.cern/news/cms-releases-open-data-machine-learning. – Дата доступа: 04.02.2026.
4. Bileska, M. Design and FPGA Implementation of WOMBAT: A Deep Neural Network Level-1 Trigger System for Jet Substructure Identification and Boosted H→bb¯ Tagging at the CMS Experiment [Электронный ресурс] / M. Bileska // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2505.05532. – Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2505.05532. – Дата доступа: 21.02.2026.
5. Ососков, Г.А. Методы машинного обучения для интеллектуального анализа и обработки экспериментальных данных физики высоких энергий [Электронный ресурс] / Г.А. Ососков // Семинар ЛИТ ОИЯИ. – 2025. – Режим доступа: http://lit.jinr.ru/seminars/ososkov_ml_2025.pdf. – Дата доступа: 19.02.2026.
6. Физически информированное машинное обучение [Электронный ресурс] // Habr / AIRI. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/airi/articles/752480/. – Дата доступа: 17.02.2026.
7. Sarkar, U. Run 3 performance and advances in heavy-flavor jet tagging in CMS [Электронный ресурс] / U. Sarkar // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2412.05863. – Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2412.05863. – Дата доступа: 20.03.2026.
8. Faucci Giannelli, M. CaloShowerGAN, a generative adversarial network model for fast calorimeter shower simulation [Электронный ресурс] / M. Faucci Giannelli, R. Zhang // European Physical Journal Plus. – 2024. – Vol. 139, № 7. – P. 597. – Режим доступа: https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05234-6. – Дата доступа: 27.02.2026.
9. Петров, С.А. Диффузионные модели для симуляции физических процессов [Электронный ресурс] / С.А. Петров // Магистерская диссертация, НИУ ВШЭ. – 2025. – Режим доступа: https://www.hse.ru/edu/vkr/503872346. – Дата доступа: 25.02.2026.
10. Guo, J. Advances in physics-informed neural networks for solving complex partial differential equations and their engineering applications: A systematic review [Электронный ресурс] / J. Guo, H. Wang // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 144. – P. 110-135. – Режим доступа: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.110135. – Дата доступа: 20.02.2026.
11. Raissi, M. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations [Электронный ресурс] / M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. – 2019. – Vol. 378. – P. 686-707. – Режим доступа: https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045. – Дата доступа: 18.02.2026.
12. Численное решение системы уравнений Навье-Стокса в случае сжимаемой среды с использованием нейронных сетей [Электронный ресурс] // Национальный агрегатор открытых репозиториев. – Режим доступа: http://www.openrepository.ru/article?id=1009885. – Дата доступа: 15.02.2026.
13. Moseley, B. Physics-informed neural networks (PINNs): an introductory crash-course [Электронный ресурс] / B. Moseley // GitHub repository. – 2022. – Режим доступа: https://github.com/benmoseley/PINN-intro. – Дата доступа: 17.02.2026.
14. Адаптация PINN для сложных задач [Электронный ресурс] / Материалы по масштабированию физически информированных нейронных сетей. – 2026. – Режим доступа: http://www.physics-ml.ru/papers/pinn_scaling_2026.pdf. – Дата доступа: 06.03.2026.
15. Li, X. DAL-PINNs: Physics-informed neural networks based on D'Alembert principle for generalized electromagnetic field model computation [Электронный ресурс] / X. Li, P. Wang, F. Yang // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2024. – Vol. 168. – P. 105-122. – Режим доступа: https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105122. – Дата доступа: 07.03.2026.
16. Гресь, Е.О. Gamma/hadron separation in the TAIGA experiment with neural network methods [Электронный ресурс] / Е.О. Гресь [и др.] // Сборник аннотаций конференции DLCP. – МГУ, 2024. – Режим доступа: http://conf.msu.ru/dlcp2024/abstracts/137.pdf. – Дата доступа: 04.03.2026.
17. Дубенская, Ю.Ю. Определение направления ШАЛ по данным TAIGA HiSCORE с помощью полносвязных нейросетей [Электронный ресурс] / Ю.Ю. Дубенская [и др.] // Сборник аннотаций конференции DLCP. – МГУ, 2024. – Режим доступа: http://conf.msu.ru/dlcp2024/abstracts/142.pdf. – Дата доступа: 02.03.2026.
18. Goodfellow, I. Deep Learning [Электронный ресурс] / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – MIT Press, 2016. – Режим доступа: https://www.deeplearningbook.org/. – Дата доступа: 05.03.2026.

UDC 004.85:539.121.667

MACHINE LEARNING IN PHYSICS RESEARCH

Ustimchuk R.V., Shubaba M.I., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics[1]
Minsk, Republic of Belarus

Khramovich E. M. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Annotation. In this paper, we examined the application of machine learning in high-energy physics to overcome the computational bottleneck at the Large Hadron Collider. We described the evolution of jet identification methods and the use of generative models (GANs, diffusion networks) to accelerate simulations in the CMS experiment. We focused on physically informed neural networks (PINNs), which integrate the laws of physics into training, with an example implementation in PyTorch. We analyzed the limitations of machine learning in physics, including issues of generalization and interpretability.

Keywords. Machine learning, high-energy physics, CMS experiment, jet identification, graph neural networks, generative adversarial networks, physically informed neural networks (PINN), automatic differentiation, trigger system, Large Hadron Collider.

ПРОЯВЛЕНИЯ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ: КРИВЫЕ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК И ОТКЛОНЕНИЕ СВЕТА

Гук Н.И, Пархонюк М.П., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Иванов М.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрены два независимых доказательств существования тёмной материи: плоские кривые вращения спиральных галактик и аномальное отклонение света вблизи массивных объектов. Показано, что оба эффекта не объясняются видимой барионной материей и требуют введения невидимой массовой компоненты. Приведены физические основы явлений, соответствующие математические соотношения и их интерпретация в рамках концепции тёмного гало.

Проблема скрытой массы во Вселенной была обозначена Ф. Цвикки в 1933 г. при изучении скопления Волосы Вероники: видимой массы галактик оказалось недостаточно для гравитационного удержания скопления. Широкое признание проблема получила в 1970-х годах после систематических наблюдений В. Рубин, показавшей аномальное поведение кривых вращения спиральных галактик. Современные наблюдения предоставляют обширную доказательную базу, указывающую на существование тёмной материи — невидимой массовой компоненты Вселенной. Среди них особое место занимают два независимых эффекта: аномальные кривые вращения и отклонение световых лучей вблизи массивных объектов, регистрируемые принципиально разными методами — динамическим и оптическим. В работе рассмотрены физические основы обоих эффектов и их интерпретация в рамках концепции тёмного гало.

Согласно ньютоновской механике, орбитальная скорость звезды на расстоянии r от центра галактики определяется выражением [1]:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}, \tag{1}$$

где G — гравитационная постоянная; $M(r)$ — масса внутри радиуса r.

Если вся масса галактики сосредоточена в видимой части, на периферии ожидается спад скорости по закону $v \propto r^{-1/2}$. Однако наблюдения спиральных галактик (рисунок 1) показывают постоянство скорости вращения вплоть до больших радиусов, где видимое вещество практически отсутствует. Из условия v = const следует $M(r) \propto r$, то есть масса продолжает расти линейно с радиусом за пределами видимого диска. Это указывает на протяжённое сферическое гало из невидимой материи. Для описания профиля его плотности используется модель Наварро–Френка–Уайта (NFW) [2]:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(\frac{r}{r_s})(1+\frac{r}{r_s})^2}, \tag{2}$$

где ρ_0 — характерная плотность гало; r_s — радиус масштабирования.

Профиль предсказывает высокую плотность в центре и медленное убывание к периферии, что согласуется с наблюдаемыми плоскими кривыми вращения.

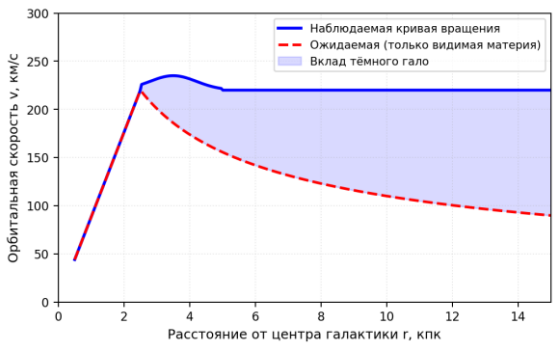


Рисунок 1 – Кривая вращения спиральной галактики: наблюдаемая (сплошная линия) и теоретически ожидаемая для видимой материи (пунктир); закрашенная область — вклад тёмного гало

Независимым свидетельством существования тёмной материи служит отклонение световых лучей вблизи массивных объектов. Согласно общей теории относительности, массивное тело искривляет

пространство-время, и световой луч, проходящий на прицельном расстоянии *b* от объекта массой *M*, отклоняется на угол [3]:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}, \tag{3}$$

где *c* — скорость света; *b* — прицельный параметр.

Наблюдения галактических скоплений показывают, что реальный угол отклонения систематически превышает значение, вычисленное по формуле (3) для видимой барионной массы. Наиболее убедительным примером служит скопление Пули (1E 0657−56): при столкновении двух скоплений горячий газ, составляющий основную барионную массу, замедлился вследствие электромагнитного взаимодействия, тогда как центры гравитационного поля, восстановленные по отклонению света, продолжили движение без торможения. Это указывает на существование невидимой компоненты, не взаимодействующей электромагнитно. Таким образом, оба рассмотренных эффекта — динамический и оптический — дают оценку невидимой массы, что исключает возможность случайной наблюдательной ошибки и существенно укрепляет вывод о реальности тёмной материи.

Следует отметить, что концепция тёмной материи является наиболее принятой, однако не единственной интерпретацией рассмотренных наблюдательных данных. Существуют альтернативные подходы, в частности модифицированная ньютоновская динамика (MOND) и модифицированная гравитация (MOG), которые также воспроизводят кривые вращения и отклонение света без введения невидимой массовой компоненты. Окончательный выбор между конкурирующими гипотезами остаётся открытым вопросом современной астрофизики.

Дополнительным независимым методом поиска тёмной материи служит гравитационное микролинзирование. Когда массивный компактный объект гало (MACHO) проходит вблизи линии наблюдения, его гравитационное поле искривляет световые лучи фоновой звезды, вызывая кратковременное симметричное усиление её яркости без изменения цвета [4] (рисунок 2). Масштабные обзоры MACHO и EROS установили, что подобные объекты составляют лишь незначительную долю тёмного гало, что указывает на небарионную природу основной его части.

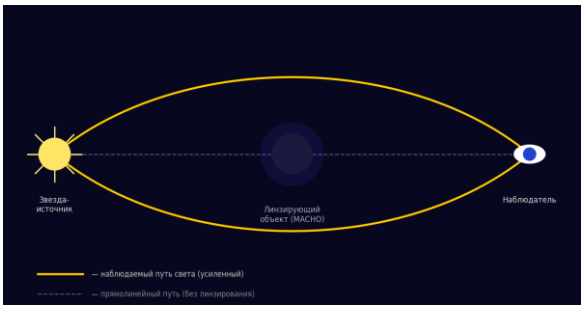


Рисунок 2 – Схема гравитационного микролинзирования: жёлтые лучи — видимый (искривлённый) путь света; серая штриховая линия — прямой путь без линзирования; серый объект в центре — линзирующее тело (MACHO)

Плоские кривые вращения спиральных галактик демонстрируют, что наблюдаемая масса недостаточна для объяснения динамики звёзд на периферии и требуют введения протяжённого тёмного гало с профилем плотности NFW. Аномальное отклонение света вблизи галактических скоплений, в свою очередь, подтверждает наличие невидимой массовой компоненты независимым оптическим методом. Совпадение оценок, полученных принципиально разными способами, свидетельствует о реальности тёмной материи как самостоятельной физической компоненты Вселенной.

Список использованных источников:

1. Rubin, V. C. Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions / V. C. Rubin, W. K. Ford // The Astrophysical Journal. – 1970. – Vol. 159. – P. 379–403.

2. Navarro, J. F. The Structure of Cold Dark Matter Halos / J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. D. M. White // The Astrophysical Journal. – 1996. – Vol. 462. – P. 563–575.

3. Clowe, D. A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter / D. Clowe [et al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2006. – Vol. 648. – P. L109–L113.

4. Alcock, C. The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of Large Magellanic Cloud Observations / C. Alcock [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2000. – Vol. 542. – P. 281–307.

СНИЖЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИПОКИНЕЗИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕЛОВЕКА ТЕРАПИЕЙ БИОУПРАВЛЯЕМЫМ УЛЬТРАЗВУКОМ

Климовец А.И., Китаёв И.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

г. Минск, Республика Беларусь

Андрианова Е.В. – ассистент

Аннотация. В этой работе мы исследовали проблему длительной неподвижности у пациентов в коме. Попробовали использовать биоуправляемую терапию – когда низкочастотные импульсы заполняются высокочастотным ультразвуком (830 кГц), а модуляция идёт по пульсу самого пациента. С теоретической точки зрения показали, что модулированный ультразвук входит в резонанс со стенками капилляров, благодаря чему энергообмен получается максимальным при минимальных затратах энергии. На практике проверяли это на куриных эмбрионах – частота сердцебиения увеличилась на 15-20%, а кровоток в мелких сосудах стал заметно лучше.

Когда человек долго лежит без движения, особенно в коме, у него начинаются серьёзные проблемы со здоровьем. Это состояние называют гипокинезией – то есть резкое снижение или вообще отсутствие двигательной активности. Мышцы слабеют, и от этого страдают абсолютно все органы и системы организма. Что конкретно происходит? Обобщая - организму нужна какая-то искусственная стимуляция микроциркуляции, иначе не избежат

ь пролежней и тромбов.

Мы решили попробовать биоуправляемую терапию ультразвуком. Суть в том, что ультразвуковые волны идут не постоянно, а в режиме пульсограммы – то есть по ритму сердца пациента.

Теоретическая часть. Ещё в 73-м году прошлого века учёный Родионов предположил, что для нормального обмена веществ в капиллярах нужна именно пульсация [1], т. е. кровь должна течь не равномерным потоком, а как бы толчками. Обмен веществ через стенки капилляров он разбил на две части, где главную роль играет именно пульсирующий компонент. А задаёт этот ритм, конечно же, сердце – оно работает как биологический насос-генератор колебаний.

Когда по сосудам идут пульсовые волны давления и скорости, стенки капилляров начинают колебаться. Это можно описать обычным уравнением вынужденных колебаний.

Самое интересное начинается, когда частота внешней силы приближается к собственной частоте системы – возникает резонанс. Амплитуда колебаний резко вырастает. Это как раз то, что нам нужно: максимальный энергообмен при минимальных затратах энергии. А для пациента в тяжёлом состоянии экономия энергии – это вопрос жизни и смерти. Нужно ещё учитывать, как ультразвук затухает в тканях. Чем глубже он проникает, тем слабее становится.

Эксперименты. Проверять всё это мы решили на куриных эмбрионах. Почему именно они? Во-первых, на третьи сутки развития у них как раз начинается кровообращение, сердце только-только формируется и бьётся. Во-вторых, их регуляторные механизмы ещё слабые – чем-то похоже на угнетённое состояние мозга при коме.

Брали яйца из инкубатора на третьи сутки, аккуратно вскрывали верхнюю часть скорлупы. Сквозь плёнку было видно, как бьётся маленькое сердечко и как течёт кровь по сосудам. Заливали область желтка тёплым физраствором и ставили туда ультразвуковой излучатель площадью где-то 1 квадратный сантиметр. Его подключали к генератору прямоугольных импульсов.

Использовали несущую частоту 830 килогерц, а модуляцию делали по частоте сердцебиения эмбриона – это где-то 2-3 герца. И что получилось? Частота ударов сердца выросла на 15-20 процентов! Плюс невооружённым глазом было видно, что кровь в мелких сосудах желточного мешка побежала активнее. Причём эффект держался ещё минут 5-10 после того, как мы выключили аппарат. Это значит, что собственные регуляторные системы организма действительно включаются в работу.

Выводы. Биоуправляемая ультразвуковая терапия – это реально перспективное направление для борьбы с последствиями длительной неподвижности. За счёт резонанса модулированный ультразвук очень эффективно взаимодействует со стенками капилляров, при этом тратится минимум энергии.

Наши опыты показали, что метод действительно улучшает микроциркуляцию и помогает поддерживать ритмическую работу сердца и сосудов. Конечно, это только начало. Дальше нужно точнее подбирать параметры воздействия и пробовать применять это в настоящей реанимации. Ну и для космической медицины, кстати, тоже пригодится – там тоже есть проблемы с гипокинезией.

Список использованных источников

1. Родионов Ю.Я. Пульсирующий характер транскапиллярного обмена // Физиология человека. – 1973. – Т. 4, № 3. – С. 456-463.

ГЕНЕРАЦИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КЛЮЧЕЙ НА ОСНОВЕ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ МАГНИТНОГО МАЯТНИКА

Кудан Т.А., Манько А.А. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Андрианова Е.В. – ассистент

Аннотация. Предложен метод генерации криптографических ключей на базе нелинейной динамики магнитного маятника. Разработана математическая модель его движения в поле трех притягивающих центров с учетом высоты подвеса и квазиупругой силы. Описан алгоритм интегрирования уравнений движения симплектическим методом Бимана. Обоснована методика преобразования флуктуаций начальных условий в равномерно распределенный битовый массив через криптографическое хеширование. Предложен метод построения криптографически стойкого генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ) с открытым исходным кодом (open-source), стойкость которого основана на свойствах детерминированного хаоса.

Введение. Фундаментальной задачей криптографии и статистического моделирования является получение качественных случайных последовательностей. Стандартные алгоритмические генераторы псевдослучайных чисел (ГПСЧ) уязвимы при компрометации их начального состояния (seed), так как работают по детерминированным математическим правилам. Для обеспечения высокого уровня безопасности применяются аппаратные генераторы истинно случайных чисел (ГИСЧ), использующие физические процессы, например, квантовые флуктуации или тепловой шум, к которым предъявляются строгие стандарты оценки энтропии [6].

В современных процессорах (Intel, AMD) существуют встроенные аппаратные инструкции (например, RDRAND), генерирующие случайные числа на основе теплового шума транзисторов с высокой скоростью [5]. Однако использование таких решений в критически важных системах сопряжено с проблемой доверия. Архитектура промышленных процессоров закрыта (принцип «черного ящика»), что делает невозможным независимый аудит схемы на предмет наличия аппаратных закладок или бэкдоров, теоретически позволяющих спецслужбам или производителю предсказывать выходные значения.

В данной работе предлагается концепция «прозрачного» ГПСЧ. В качестве основы алгоритма используется математическая модель макроскопической динамической системы — магнитного маятника. В отличие от стандартных математических абстракций, логика работы данного генератора полностью прозрачна и опирается на физическую теорию динамического хаоса. Система демонстрирует режим детерминированного хаоса: обладая строгим математическим описанием [2], она характеризуется экспоненциальной неустойчивостью фазовых траекторий (положительностью максимального показателя Ляпунова), что делает долгосрочное предсказание ее поведения невозможным при наличии малейших погрешностей измерения начальных условий.

Основная часть. В качестве концептуальной модели системы рассматривается сферический маятник, совершающий колебания в гравитационном поле над горизонтальной плоскостью, на которой закреплены три постоянных магнита. Геометрическая схема установки и выбранная декартова система координат представлены на рисунке 1. Груз маятника снабжен магнитом, ориентированным на притяжение к магнитам в основании.

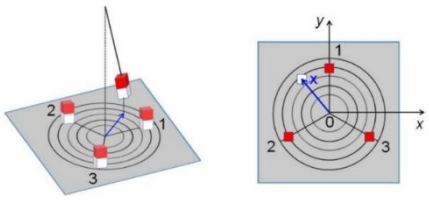


Рисунок 1 – Схема расположения магнитов и системы координат модели

Движение описывается в двумерном приближении малых колебаний радиус-вектором положения в плоскости xy: $\vec{r} = (x, y)$. Согласно второму закону Ньютона, вектор ускорения $\vec{a} = \vec{r}$ определяется суперпозицией действующих сил, отнесенных к массе маятника. В разработанной модели учитываются три ключевых взаимодействия:

1 Квазиупругая возвращающая сила: в приближении малых углов отклонения проекция гравитационной силы на плоскость xy, стремящаяся вернуть маятник в положение равновесия, пропорциональна смещению. В кинематической модели она характеризуется квадратом круговой (собственной) частоты малых колебаний $\omega_0^2 = \frac{g}{L}$ (где g — ускорение свободного падения, L — эффективная длина подвеса).

2. Сила вязкого трения: сопротивление среды, пропорциональное вектору скорости движения $\vec{v} = \dot{\vec{r}}$, характеризуется удельным коэффициентом затухания μ.

3. Магнитное взаимодействие: сила притяжения к каждому из магнитов рассчитывается с учетом постоянного расстояния h по вертикали от плоскости движения груза до плоскости магнитов. Введение параметра h необходимо для корректного моделирования проекции трехмерного поля диполя на двумерную плоскость движения и предотвращения сингулярностей (деления на ноль при прохождении точно над магнитом).

Итоговое дифференциальное уравнение движения (для ускорения) имеет вид (1):

$$\vec{a} = -\mu\vec{v} - \omega_0^2\vec{r} + \sum_{m=1}^{3} \frac{\overrightarrow{r_m}}{\left(h^2 + |\overrightarrow{r_m}|^2\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где $\overrightarrow{r_m}$ – вектор, направленный от маятника к m-му магниту, а знаменатель в формуле (1) $(h^2 + |\overrightarrow{r_m}|^2)^{\frac{3}{2}}$ соответствует закону убывания силы для магнитного диполя с учетом вертикального смещения.

Программная реализация выполнена на C#. Для интегрирования уравнений применен алгоритм Бимана [4], обеспечивающий устойчивое численное интегрирование уравнений движения.

Компьютерная модель трансформирует физическую энтропию в цифровой ключ. Источником первичного уникального зерна (seed) служат младшие разряды системного таймера высокой точности и текущее состояние ОЗУ. Программный модуль симулирует движение маятника до диссипации энергии (полной остановки). Фиксируются два параметра конечного состояния: индекс магнита-аттрактора и длительность переходного процесса. Поскольку одна итерация дает мало энтропии, система проводит серию симуляций с микроскопическим возмущением начальных условий [3]. Полученный массив данных конкатенируется и сжимается криптографической хеш-функцией SHA-256 [7] до равномерно распределенной последовательности длиной 256 бит.

Моделирование для сетки из 800×800 начальных состояний (всего 640 000 индивидуальных траекторий до остановки) позволило получить карту бассейнов притяжения системы (Рисунок 2). Визуализация подтверждает наличие развитой фрактальной структуры границ между областями притяжения магнитов. Это свидетельствует о том, что даже микроскопические изменения начальных условий (на уровне 10^{-6}) приводят к изменению конечного состояния макросистемы, обеспечивая высокую криптографическую стойкость генератора. Основным ограничением является низкая производительность (~15–50 кбит/с), обусловленная вычислительной сложностью метода Бимана, что позиционирует комплекс как решение для генерации мастер-ключей, а не потоковых задач.

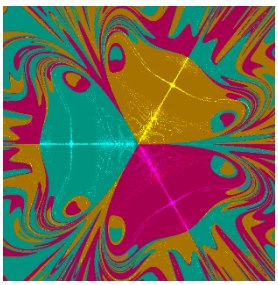


Рисунок 2 – Визуализация фрактальных границ областей притяжения)

Список использованных источников

1.Анищенко, В. С. Сложные колебания в простых системах: механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса / В. С. Анищенко. – Москва : Наука, 1990. – 312 с.

2.Кузнецов, С. П. Динамический хаос: курс лекций / С. П. Кузнецов. – Москва : Физматлит, 2001. – 296 с.

3.Alvarez, G. Some basic cryptographic requirements for chaos-based cryptosystems / G. Alvarez, S. Li // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2006. – Vol. 16, iss. 8. – P. 2129–2151.

4.Beeman, D. Some multistep methods for use in molecular dynamics calculations / D. Beeman // Journal of Computational Physics. – 1976. – Vol. 20, iss. 2. – P. 130–139.

5.Intel Digital Random Number Generator (DRNG) Software Implementation Guide [Electronic resource] / Intel Corporation. – 2018. – Mode of access: https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/guide/intel-digital-random-number-generator-drng-software-implementationguide.html. – Date of access: 06.03.2026.

6.Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation : NIST SP 800-90B [Electronic resource] / National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg : NIST, 2018. – Mode of access: https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-90b/final. – Date of access: 06.03.2026.

7.Secure Hash Standard (SHS) : FIPS PUB 180-4 [Electronic resource] / National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg : NIST, 2015. – Mode of access: https://csrc.nist.gov/publications/detail/fips/180/4/final. – Date of access: 06.03.2026.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Пукало Д.А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Иванов М.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Описан и реализован спектроскопический метод определения постоянной Планка с использованием спектра поглощения дихромата калия (хромпика). Была экспериментально измерена красная граница полосы поглощения и на основе полученных ее значений произведен расчет постоянной Планка.

Квантовая природа света, постулированная Планком при изучении теплового излучения, особенно ярко проявляется в эффекте Комптона, внешнем фотоэффекте, фотохимических реакциях. Постоянная Планка h является фундаментальной физической константой, которая играет ключевую роль в квантовой механике. Экспериментальное определение этой величины имеет важное значение не только для подтверждения квантовой теории, но и для понимания механизмов взаимодействия света с веществом [1,2]. Целью данной работы является экспериментальное определение значения постоянной Планка спектроскопическим методом [3]. В качестве объекта исследования выступает водный раствор дихромата калия ($K_2Cr_2O_7$).

Согласно квантовой теории атомы, ионы и молекулы не только испускают энергию квантами, но также квантами и поглощают. Энергия кванта излучения и поглощения при определенной частоте ν для определенного вещества одинакова. Под действием света происходит химическое разложение молекул, вызвать которое может только квант света с энергией $h\nu \geq h\nu_{\text{гр}}$, достаточной (или большей) для разложения. Рассмотрим водный раствор двухромокислого калия. В воде его молекулы диссоциируют на ионы следующим образом:

$$K_2Cr_20_7 \leftrightarrow 2K^+ + Cr_2O_7^{2-} \quad (1)$$

В процессе реакции в растворе появляются ионы $Cr_2O_7^{2-}$. Если осветить этот раствор белым светом, то под действием поглощенных хромпиком квантов света произойдет распад ионов $Cr_2O_7^{2-}$. При этом каждый ион «захватит» («поглотит») один квант облучающего излучения с энергией $h\nu$. В результате спектр будет иметь полосу поглощения, начало которой соответствует частоте $\nu_{\text{гр}}$. .Реакцию распада записывают следующим образом:

$$Cr_2O_7^{2-} \leftrightarrow CrO_3 + CrO_4^{2-} \quad (2)$$

Энергия этой реакции для одного киломоля хромпика известна из опытов:
$E = 2{,}228 \cdot 10^5 \text{Дж/моль}$. Согласно закону Авогадро, каждый моль вещества содержит одинаковое число атомов, равное числу Авогадро, поэтому для распада одного иона требуется энергия

$$E_1 = \frac{E}{N_A} , \quad (3)$$

где $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ — число Авогадро.
Следовательно, энергия поглощенного светового кванта должна быть больше или равна энергии, необходимой для расщепления одного иона, то есть $h\nu \geq E_1$. С помощью равенства определяют наименьшую частоту кванта, расщепляющего ион:

$$h\nu_{\text{гр}} = \frac{E}{N_A} , \quad (4)$$

где $\nu_{\text{гр}}$– красная граница фотохимической реакции.

Используя связь между частотой ν и длиной волны λ, выражение (4) записывают следующим образом:

$$h\frac{c}{\lambda_{\text{гр}}} = \frac{E}{N_A} , \quad (5)$$

где с – скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$м/с).

Таким образом, измерив $\lambda_{\text{гр}}$, соответствующую границе поглощения, и зная энергию, необходимую для активации одного моля вещества (E), можно рассчитать постоянную Планка по формуле:

$$h = \frac{E \cdot \lambda_{\text{гр}}}{c \cdot N_A}. \quad (6)$$

Эксперимент был выполнен с использованием стандартного спектрального оборудования. Была изготовлена кювета, заполненная водным раствором хромпика (бихромата калия). Экспериментальная установка состоит из источника света с непрерывным спектром и монохроматора МУМ, перед входной щелью которого установлена кювета с хромпиком. Внешний вид установки представлен на Рис.1.

Рисунок 1.– Внешний вид экспериментальной установки

Вращая рукоятку привода дифракционной решетки монохроматора, наблюдают спектр в окуляр. При определенной длине волны спектр резко обрывается, так как все длины волн меньше $\lambda_{\text{гр}}$ поглощаются раствором хромпика. Плавно вращая барабан в сторону длинных волн (от синей области к красной), фиксируем границу между темным фоном и появлением света в выходном окне монохроматара. Это положение соответствует искомой красной границе $\lambda_{\text{гр}}$. Сняв отсчет по счетчику монохрома, получаем значение $\lambda_{\text{гр}}$ в нанометрах. По результатам измерений получено:

$$\lambda_{\text{гр}} = \langle \lambda_{\text{гр}} \rangle \pm \sigma_\lambda = (535 \pm 2.1)\ \text{нм}. \quad (7)$$

При $h = C\lambda_{\text{гр}}$ имеем $\sigma_h = C\sigma_\lambda$, то дает для постоянной Планка получим:

$$h_{\text{изм}} = \langle h \rangle \pm \sigma_h = (6{,}6001 \pm 0{,}0259) \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}. \quad (8)$$

Таким образом, относительная погрешность измерений:

$$\delta\sigma = \left|\frac{\sigma_h}{\langle h \rangle}\right| \cdot 100\% = 0{,}39\%.$$

Полученное экспериментально значение постоянной Планка $h_{\text{изм}}$ согласуется с табличным значением $h_{\text{табл}} = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с в пределах рассчитанной погрешности. Это подтверждает корректность использованной методики и демонстрирует связь между макроскопическими свойствами вещества (окраска, спектр поглощения) и фундаментальными квантовыми константами.

Для повышения точности в дальнейшем можно использовать фотоприемник для измерения спектра света, прошедшего через кювету.

Список использованных источников:

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 5. Атомная и ядерная физика. — М.: Физматлит, 2006.

2. Ландсберг Г.С. Оптика. — М.: Наука, 1976.

3. Методические указания к лабораторной работе «Определение постоянной Планка». https://portal.tpu.ru/departments/kafedra/of/methodic/methodic1/lab3/Tab1/3_16_hydrogen_spectrum.doc

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Ахремчик А.А., Генюш Б.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Дорошевич И.Л. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В статье рассматривается явление поляризации электромагнитных волн: даётся определение понятия, описываются виды поляризации – линейная, круговая и эллиптическая. Приводятся закон Малюса с объяснением физического смысла. Рассматриваются основные механизмы получения поляризованного света, а также практические применения поляризации в радиолокации, жидкокристаллических дисплеях и других технологиях.

Основная часть. Поляризация – свойство поперечных волн: вектор электрического поля $\vec{E}$ колеблется перпендикулярно направлению распространения волны, а характер его ориентации определяет тип поляризации. По форме траектории конца вектора $\vec{E}$ выделяют: линейную ($\alpha = 0$ или $\alpha = \pi$), круговую ($A_1 = A_2$, $\alpha = \pi/2$) и эллиптическую поляризации (рисунки 1, 2).

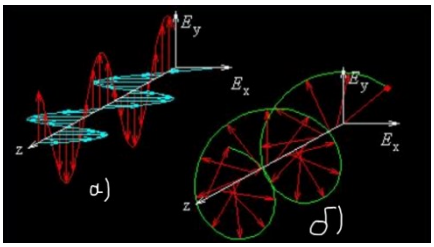


Рисунок 1 – Линейно поляризованная (а) и эллиптически-поляризованная волна (б) [2]

Наиболее общим случаем является эллиптическая поляризация (рисунок 2, а). Проекции вектора $\vec{E}$ на две взаимно перпендикулярные оси в каждый момент времени (формула 1)

$$\begin{cases} \mathrm{Ex} = \mathrm{A}_1 \cdot \cos(\omega t) \\ \mathrm{Ey} = \mathrm{A}_2 \cdot \cos(\omega t + \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды; ω – угловая частота; α – разность фаз.

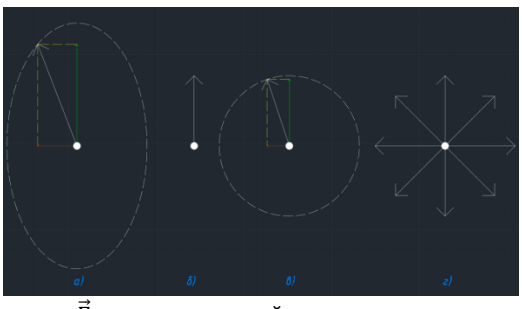


Рисунок 2 – Вектор напряженности $\vec{E}$, расположенный в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны: а – эллиптически-поляризованная; б – линейная; в – круговая; г - неполяризованная

Для получения поляризованного света из естественного используют поляризаторы. Они пропускают колебания, параллельные своей оси, и задерживают перпендикулярные. Основные типы: анизотропные кристаллы (рисунок 3, а) и поляроиды (рисунок 3, б) [7].

а)

б)

Рисунок 3 – Виды поляризаторов. а) – кристалл турмалина; б) – поляроиды.

Частично-поляризованный свет – смесь естественного и линейно поляризованного. Его характеризуют степенью поляризации P, которую определяют следующим образом (формула 2).

$$P = \frac{I_{макс} - I_{мин}}{I_{макс} + I_{мин}} \quad (2)$$

где $I_{макс}$ – максимальная интенсивность; $I_{мин}$ – минимальная интенсивность.

Интенсивность поляризованного света после анализатора (второго поляризатора) определяется законом Малюса (формула 3) [4]:

$$I = I_0 \cos^2\varphi, \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность падающего поляризованного света; φ – угол между осями поляризатора и анализатора.

При φ = 0: $I = I_0$; при φ = π/2: I = 0 (скрещенные поляризаторы). Для естественного света: $I = I_0/2$.

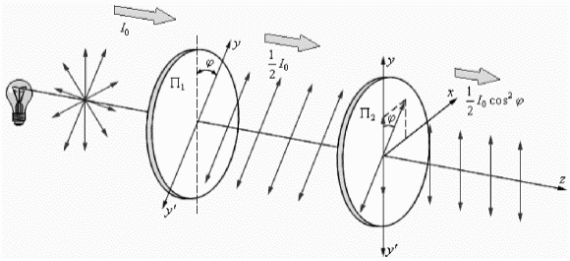


Рисунок 4 – поляризация естественного света с помощью двух поляризаторов.

В радиолокации применяют линейную (при ясной погоде) и круговую поляризацию. Круговая поляризация подавляет отражения от дождевых капель: волна меняет знак вращения при отражении от сферической капли и не улавливается приёмной антенной, настроенной на исходный тип [5].

В основе каждого субпикселя ЖК-дисплея лежат два скрещенных поляризатора и управляемый слой жидких кристаллов. Без напряжения кристаллы образуют спираль, поворачивающую плоскость поляризации на 90°, и свет проходит. При подаче напряжения спираль разрушается, поворота не происходит, и свет блокируется вторым поляризатором (рисунок 5) [6].

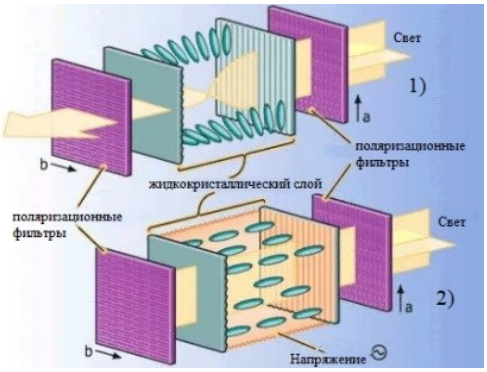


Рисунок 5 – Принцип работы ЖК-субпикселя: 1 – без напряжения (свет проходит); 2 – с напряжением (свет блокируется).

В фотографии поляризационные фильтры (CPL) устраняют блики с воды и стекла, усиливая насыщенность цветов.

Список использованных источников:

1. NASA Scientific Visualization Studio. Electromagnetic Waves and Polarization [Electronic resource]. – 2017. – URL: https://svs.gsfc.nasa.gov/4580/

2. Поляризация электромагнитных волн [Электронный ресурс] / Московский государственный технический университет гражданской авиации. – URL: http://storage.mstuca.ru/jspui/bitstream/123456789/2465/1/

3. OpenStax College Physics. 27.8: Polarization [Electronic resource] / LibreTexts Physics. – URL: https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/College_Physics_1e_(OpenStax)/27%3A_Wave_Optics/27.08%3A_Polarization.

4. Трофимова Т. И. Краткий курс физики: основные законы. – М.: Юрайт, 2020.

5. Радиолокационные основы. Поляризация электромагнитных волн [Электронный ресурс] / Radartutorial.eu. – URL: https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an06.ru.html.

6. Касьянова Л. Как работает ЖК-дисплей? Просто о сложном [Электронный ресурс] / iChip.ru. – 2018. – URL: https://ichip.ru/sovety/kak-rabotaet-zhk-displejj-prosto-o-slozhnom-198532.

7. Лисицына Е. Н. Поляризация света: лекции 12, 13 [Электронный ресурс] / Томский политехнический университет. – Томск, 2013. – URL:https://portal.tpu.ru/SHARED/e/ELENALIS/rabota/Tab3/LK1213.pdf.

8. Поляризация электромагнитных волн. Виды [Электронный ресурс]: учебные материалы по теме «Свойства электромагнитных волн» / Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины. – Гомель, [б. г.]. – URL: https://elib.gsu.by/bitstream/123456789/5005/4/

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Клочко Е.С., Чеботарёва А.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Малевич В. Л.– д-р физ.-мат. наук, профессор

Аннотация. Рассматривается история открытия топологических изоляторов – нового класса конденсированных материалов, которые в объеме являются диэлектриком, а по поверхности проводят электрический ток. Излагается роль топологического порядка в формировании поверхностных электронных состояний с дираковским спектром. Обсуждаются возможные практические применения топологических изоляторов.

Топологические изоляторы представляют собой новый класс материалов, сочетающих свойства объемного диэлектрика и поверхностного проводника.

История открытия таких материалов берёт своё начало в 1980-м году, когда немецкий физик Клаус фон Клитцинг познакомил мир с квантовым эффектом Холла. Следующий прорыв случился в 2005-2006 годах, когда Чарльз Кейн и Юджин Мele предсказали существование таких материалов, где роль внешнего поля играет само внутреннее устройство атомов (спин-орбитальное взаимодействие). Уже в 2007 году группа Лоуренса Моленкампа экспериментально подтвердила эффект топологического изолятора в сверхтонких пленках теллурида ртути с квантовыми ямами.

В отличие от классического эффекта Холла, где холловское сопротивление (R_{xy}) меняется линейно от магнитного поля, квантовый эффект Холла проявляется в виде образования «плато» (ступенек) на графике зависимости сопротивления от магнитного поля. Значения сопротивления на этих плато принимают строго квантованные значения и определяются формулой:

$$R_{xy} = \frac{V_{холл}}{I_к} = \frac{h}{e^2 \nu}, \quad (1)$$

где R_{xy} – холловское сопротивление, $V_{холл}$ – напряжение Холла, $I_к$ – ток канала, e – элементарный заряд, h – постоянная Планка ($6.626*10^{-34}$ Дж*с), ν – коэффициент заполнения.

В топологических изоляторах энергетические зоны «перекручены» особым образом. В качестве примера можно представить себе ленту Мёбиуса. Как бы вы её не крутили, её топологические свойтсва не изменяются, пока вы её не разрежете. Уникальные свойства топологических изоляторов обусловлены существованием топологически защищённых делокализованных поверхностных состояний с дираковским электронным спектром. Эти состояния не могут быть локализованы под действием слабого беспорядка или в результате рассеяния на дефектах. Их спин жёстко связан с направлением движения. Если электрон идёт «вперёд», его спин смотрит «вверх». Чтобы развернуться назад, ему нужно перевернуть спин, что запрещено законом сохранения, пока нет магнитной примеси. Это означает, что ток течёт практически без потерь на нагрев.

Топологические изоляторы могут использоваться в различных областях науки и техники, например в спинтронике. Спинтроника – это раздел квантовой электроники, использующий для обработки информации не только заряд, но и спин электрона. Передача информации спином электрона позволяет существенно уменьшить тепловыделение и создать процессоры в десятки раз быстрее существующих.

Топологические изоляторы являются платформой для создания «майорановых фермионов». Это частицы, которые могут служить идеальными кубитами, устойчивыми к внешним шумам (декогеренции).

Будущее топологических изоляторов связано с переходом от фундаментальных исследований к созданию принципиально новых устройств для применений в микро- и оптоэлектронике, фотонике, а также при создание квантовых компьютеров.

Список использованных источников:

1 Клитцинг, К. фон. Квантовый эффект Холла: (Нобелевская лекция) // Успехи физических наук. — 1986. — Т. 150, вып. 1. — С. 33–107.

2. Kane, C. L. Quantum Spin Hall Effect in Graphene / C. L. Kane, E. J. Mele // Physical Review Letters. — 2005. — Vol. 95, № 22. — Art. 226801.

3. Елисеев, А. А. Топологические изоляторы: терминология, классификация, свойства и методы получения / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин // Успехи химии. — 2014. — Т. 83, № 12. — С. 1162–1182.

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ангур А.П., Семёнов Т.В., Свириденко Р.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Шабусов А.К. – учитель физики ГУО «Средняя школа №1 г. п. Смиловичи»
Храмович Е.М. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе исследуется зависимость силы магнитного торможения неодимового магнита, движущегося по алюминиевой наклонной плоскости, от угла наклона горки и количества магнитов. Проведены теоретический анализ и экспериментальная проверка. Установлено существование оптимального числа магнитов, при котором тормозящая сила максимальна, что объясняется изменением конфигурации магнитного поля и имеет практическое значение для проектирования магнитных тормозов.

Движение постоянного магнита по проводящей поверхности широко известно благодаря явлению электромагнитной индукции: возникающие вихревые токи тормозят магнит. Однако вопросы о направлении тормозящей силы и её зависимости от параметров системы остаются актуальными. В данной работе исследуется движение неодимового магнита по алюминиевой наклонной плоскости.

Цель работы: исследовать зависимость модуля силы торможения при движении неодимовых магнитов по алюминиевой горке от угла наклона плоскости и количества магнитов в «башенке».

При равномерном движении магнита по наклонной плоскости из второго закона Ньютона, закона Кулона–Амонтона получена зависимость скорости от угла наклона α:

$$v = \frac{mg}{k} \cdot (\sin(\alpha) - \mu\cos(\alpha)), \quad (1),$$

где k – коэффициент пропорциональности (зависит от свойств магнита и горки), μ – коэффициент трения скольжения. Из этого выражения следует, что зависимость $v(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$ должна быть линейной, а сила торможения направлена горизонтально.

Исследование зависимости скорости от угла. Использовались: неодимовый магнит d = 14 мм, h = 2 мм, m = 2,3 г; алюминиевая горка толщиной 2,0 мм. Методом наименьших квадратов получен коэффициент трения μ = 0,19 и коэффициент k = 0,12 кг/с. Линейный характер зависимости $v(\alpha)$ подтверждён экспериментально, что доказывает горизонтальное направление результирующей силы магнитного торможения.

Исследование зависимости $v(N)$ [1]. Для изучения влияния высоты магнита применён оригинальный метод «магнитной башенки» – стопки из N одинаковых магнитов. Полученная зависимость нелинейна: минимум скорости наблюдается при N = 2, что опровергает обе выдвинутые гипотезы. С ростом N масса башенки увеличивается пропорционально N, поэтому причина минимума кроется в поведении магнитного потока.

С помощью датчика Холла просканированы башенки из 1, 2 и 3 магнитов. При переходе от одного магнита к двум конфигурация поля существенно изменяется. Магнитный поток, проходящий через поверхность горки, для башенок из 1, 2 и 3 магнитов составил 110, 240 и 330 мкВб соответственно. Поток двух магнитов более чем вдвое превышает поток одного, тогда как масса возрастает лишь в 2 раза – это и объясняет уменьшение скорости. При дальнейшем увеличении N магнитный поток растёт медленнее массы, поэтому скорость башенки возрастает [2, 3].

Зависимость скорости магнита от угла наклона горки близка к линейной; уточнённая зависимость (1) носит строго линейный характер и подтверждает горизонтальное направление силы торможения. Зависимость $v(N)$ имеет минимум при N = 2, объясняемый непропорционально большим ростом магнитного потока при добавлении второго магнита. Существует оптимальное число (высота) магнитов, при котором тормозящая сила максимальна, что важно для проектирования магнитных тормозов.

Список использованных источников:

1. Поцелуев, Р. С. Магнитные горки / Р. С. Поцелуев, И. С. Артименя ; науч. рук. А. К. Шабусов // Материалы XXVII республиканского конкурса работ исследовательского характера (конференция) учащихся по астрономии, биологии, информатике, математике, физике, химии. Секция «Физика». – Смиловичи, 2023.

2. Исаченкова, Л.А. Физика : учебник для 8 кл. / Л.А. Исаченкова, Ю.Д. Лещинский. – Минск : Нар. асвета, 2018. – 176 с.

3.Слободянюк, А.И. Физика для избранных: Магнитостатика. Электродинамика / А.И. Слободянюк. – Минск : Белорус. ассоц. «Конкурс», 2011.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ: ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Веремьёва Е. О., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю. И. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматривается влияние фазового разброса частиц на энергетический разброс пучка в линейном ускорителе. На основе модели ускорения в ВЧ‑резонаторе выполнены расчёты для двух случаев фазовых отклонений, показавшие нелинейный рост энергетического разброса при увеличении длины сгустка. Отмечена высокая чувствительность качества пучка к фазовым нарушениям. Обсуждены современные методы оптимизации ускорителей, включая обучение с подкреплением и физически‑обусловленные алгоритмы машинного обучения, позволяющие учитывать физические ограничения и повышать эффективность настройки ускорительных систем.

Ускорители заряженных частиц являются ключевым инструментом современной физики и применяются как в фундаментальных исследованиях, так и в прикладных задачах. Одним из важнейших параметров качества пучка является энергетический разброс — отклонение энергии отдельных частиц от среднего значения. Его уменьшение повышает точность экспериментов и эффективность работы ускорительных установок [1-4].

Основной причиной возникновения энергетического разброса является различие фаз, с которыми частицы входят в высокочастотный (ВЧ) резонатор. Как отмечено в работе: «передние и задние частицы попадают в разные фазы переменного электрического поля и получают разный прирост энергии». Это приводит к неодинаковому ускорению и формированию распределения энергий в пучке.

Прирост энергии частицы в ВЧ‑резонаторе определяется выражением:

$$\Delta E = e \cdot U \cdot \cos(\varphi), \quad (1)$$

где: e — заряд частицы (для электрона e = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, в относительных расчетах позволим себе принять e = 1); U — амплитуда напряжения на резонаторе (измеряется в мегавольтах, МВ); φ — фаза частицы, то есть момент времени (в угловых градусах), когда частица влетает в резонатор.

Если в пучке есть N частиц с разными фазами, мы можем рассчитать энергию каждой по формуле (1), а затем найти среднюю энергию и среднеквадратичный разброс [5,6].

Средняя энергия:

$$E\text{ср} = (E_1 + E_2 + \ldots + E_N) / N \quad (2)$$

Среднеквадратичный разброс:

$$\sigma_E = \sqrt{[((E_1 - E_{\text{ср}})^2 + (E_2 - E_{\text{ср}})^2 + \ldots + (E_N - E_{\text{ср}})^2) / N]} \quad (3)$$

Чем меньше σ_E, тем выше качество CEBAF.

В расчетной части рассматривались два случая: малый разброс фаз (20°) и большой (40°). При напряжении U =10 МВ и пяти моделируемых частицах получены следующие результаты (таблица 1).

Таблица 1 – Энергетический разброс при различных фазовых отклонениях

Разброс фаз	Средняя энергия, МэВ	Энергетический разброс, кэВ
20°	9.92	62
40°	9.70	251

Увеличение фазового разброса в 2 раза приводит к росту энергетического разброса более чем в 4 раза. Это демонстрирует высокую чувствительность качества пучка к фазовым отклонениям и объясняет необходимость точной синхронизации и минимизации длины сгустка.

Современные ускорители содержат десятки и сотни регулируемых параметров, что делает ручную оптимизацию крайне сложной задачей [7,8]. В последние годы активно развиваются методы машинного обучения (ML), включая обучение с подкреплением (RL). RL‑агент исследует пространство параметров ускорителя и формирует оптимальную стратегию настройки, максимизируя целевую функцию качества пучка.

Перспективным направлением является физически‑обусловленное машинное обучение (PIML), в котором в алгоритм заранее включаются физические ограничения. Например, в функцию награды может входить ограничение на тепловыделение в резонаторах:

$$P_{heat} = \Sigma\ (U_i^2 / (R_i \cdot Q_i))\ , \tag{4}$$

где R_i – шунтовое сопротивление, Q_i – добротность i-го резонатора.

На сайте CERN (Европейская организация по ядерным исследованиям) есть возможность найти статью, где данная формула представлена в таком виде:

$$P_{diss} = V_{acc}^2 / (R/Q \cdot Q_0), \tag{5}$$

где: V_{acc} – ускоряющее напряжение (аналог U_i); R/Q – геометрический фактор резонатора; Q_0 – собственная добротность.

Такой подход позволяет получать физически корректные решения даже при отсутствии экспериментальных данных для обучения.

Проведённый анализ показывает, что энергетический разброс пучка существенно зависит от фазового распределения частиц (рисунок 1).

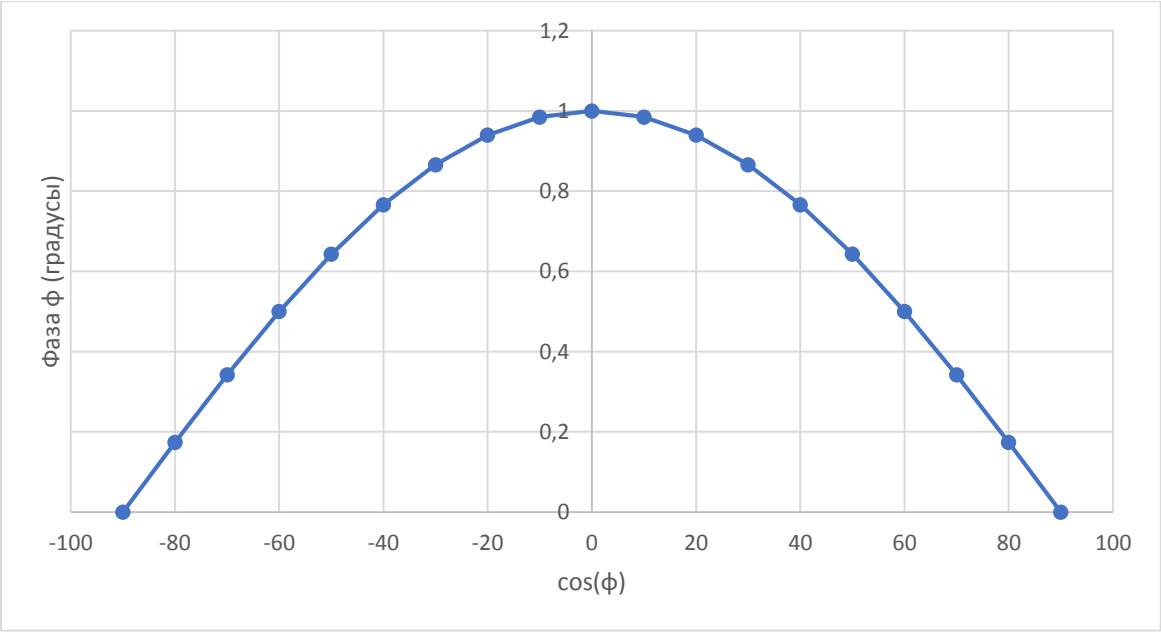


Рисунок 1 – Зависимость ускоряющего фактора cos(φ) от фазы частицы

Увеличение разброса фаз приводит к нелинейному росту энергии пучка, что требует высокой точности синхронизации ускоряющих структур. Современные методы ML, включая RL и PIML, позволяют эффективно решать задачу многопараметрической оптимизации и повышать качество пучка в линейных ускорителях.

Список использованных источников:

1. Ауслендер, В. Л. Физика ускорителей : учеб. пособие / В. Л. Ауслендер. – Новосибирск : НГУ, 2017. – 320 с.

2. Лебедев, А. Н. Физика и техника ускорителей : учебник / А. Н. Лебедев. – М. : МИФИ, 2015. – 450 с.

3. Padamsee, H. RF Superconductivity: Science, Technology and Applications / H. Padamsee. – Weinheim : Wiley‑VCH, 2009. – 528 p.

4. Wiedemann, H. Particle Accelerator Physics / H. Wiedemann. – 4th ed. – Cham : Springer, 2015. – 1021 p.

5. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / В. Е. Гмурман. – 12‑е изд. – М. : Юрайт, 2020. – 478 с.

6. Среднеквадратическое отклонение // Википедия — свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Среднеквадратическое_отклонение (дата доступа: 10.02.2026).

7. Maslennikov, S. RF heating efficiency of the terahertz superconducting hot‑electron bolometer / S. Maslennikov // arXiv preprint, 2014. – No. 1404.5276. – Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1404.5276 (дата доступа: 15.02.2026).

8. CEBAF // Jefferson Lab Official Website. – Режим доступа: https://www.jlab.org/cebaf (дата доступа: 15.02.2026).

9. AI Helps Scientists Investigate the Universe's Biggest and Smallest Phenomena // U.S. Department of Energy Office of Science, 2025. – Режим доступа: https://www.energy.gov/science/articles/ai-helps-scientists-investigate-universes-biggest-and-smallest-phenomena (дата доступа: 15.02.2026).

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ ПАССИВНОГО РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Левченко К.М., Королёнок В.И., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Рассмотрены физические принципы пассивного радиационного охлаждения, основанного на использовании фотонных кристаллов. Описан механизм формирования фотонной запрещённой зоны в периодических диэлектрических структурах и его применение для управления спектром теплового излучения. Проанализированы ключевые экспериментальные результаты, включая достижение суб-амбиентного охлаждения при прямом солнечном освещении. Обсуждены перспективы применения фотонно-кристаллических покрытий в строительстве и текстильной промышленности.

Фотонные кристаллы представляют собой структуры с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью, в которых для электромагнитных волн формируется аналог электронной запрещённой зоны — фотонная запрещённая зона (ФЗЗ). Концепция фотонных кристаллов была независимо предложена в 1987 году Э. Яблоновичем, рассмотревшим подавление спонтанного излучения в периодических диэлектрических средах [1], и С. Джоном, предсказавшим сильную локализацию фотонов в диэлектрических сверхрешётках [2]. В диапазоне частот, соответствующем ФЗЗ, распространение электромагнитных волн в структуре запрещено, что позволяет целенаправленно управлять отражением и излучением на заданных длинах волн. Классификация фотонных кристаллов определяется размерностью периодичности: одномерные (1D) — чередующиеся плоские слои, двумерные (2D) — периодические структуры в плоскости, трёхмерные (3D) — объёмные решётки с полной запрещённой зоной для всех направлений распространения.

Одним из наиболее перспективных практических приложений фотонных кристаллов является пассивное радиационное охлаждение. Физический механизм основан на том, что любое нагретое тело излучает энергию в инфракрасном диапазоне в соответствии с законом Планка. Атмосфера Земли обладает окном прозрачности в диапазоне длин волн 8–13 мкм, через которое тепловое излучение земной поверхности может беспрепятственно уходить в космическое пространство, имеющее эффективную температуру около 3 К. Если поверхность спроектирована так, что она максимально отражает падающее солнечное излучение (0,3–2,5 мкм) и одновременно обладает высокой излучательной способностью в окне прозрачности атмосферы, то чистый радиационный поток направлен от поверхности в космос, и поверхность охлаждается ниже температуры окружающего воздуха — без затрат электроэнергии [3]. Принцип радиационного охлаждения, спектры солнечного излучения и атмосферного поглощения, а также характеристики селективного излучателя представлены на рисунке 1.

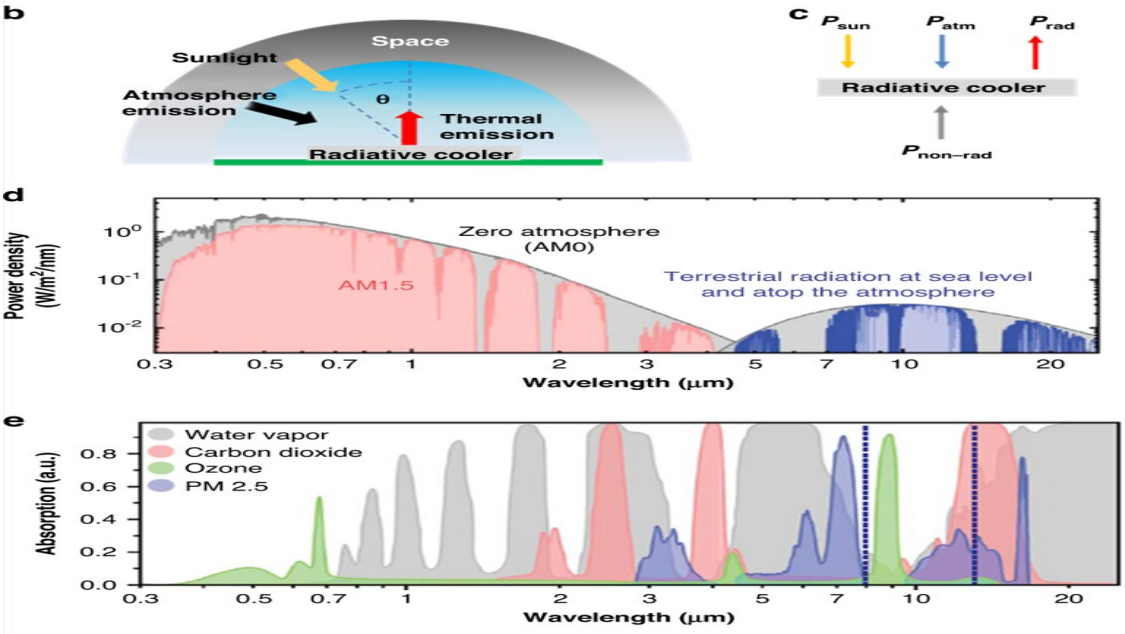


Рисунок 1 – *Принцип радиационного охлаждения (b), спектры солнечного излучения (d), полосы поглощения атмосферы (e)*

Именно фотонные кристаллы позволяют реализовать селективное управление спектром. В 2013 году Э. Рефаэли, А. Раман и Ш. Фань теоретически показали, что оптимизированная многослойная фотонная структура способна обеспечить ультраширокополосное отражение солнечного излучения и селективное излучение в атмосферном окне прозрачности, что достаточно для дневного охлаждения ниже температуры среды [4]. Годом позже А. Раман с соавторами экспериментально подтвердили эту концепцию, создав одномерный фотонный кристалл из семи чередующихся слоёв HfO_2 и SiO_2 на серебряной подложке. Структура отражала 97% падающего солнечного излучения и обладала высокой излучательной способностью в диапазоне 8–13 мкм. В эксперименте при солнечном потоке свыше 850 Вт/м² было достигнуто охлаждение на 4,9 °C ниже температуры окружающего воздуха с мощностью охлаждения 40,1 Вт/м² [5]. Это стало первой экспериментальной демонстрацией дневного суб-амбиентного пассивного радиационного охлаждения.

Важным шагом к практическому применению стала разработка масштабируемых технологий. В 2017 году И. Чжай с соавторами предложили гибридный стеклополимерный метаматериал — плёнку из полиметилпентена (TPX) с внедрёнными микросферами SiO_2, обладающими фононным резонансом в инфракрасном диапазоне. Плёнка демонстрировала излучательную способность свыше 0,93 в окне прозрачности атмосферы и обеспечивала мощность охлаждения 93 Вт/м² при прямом солнечном свете. Принципиальным достоинством данного подхода является возможность рулонного производства (roll-to-roll), что открывает путь к промышленному масштабированию [6].

Современные исследования направлены на преодоление ключевого ограничения — высокоэффективные радиационные охладители традиционно имеют белый цвет, поскольку максимальное отражение солнечного света требует отсутствия селективного поглощения в видимом диапазоне. В 2024–2025 годах были продемонстрированы фотонно-кристаллические структуры, обеспечивающие одновременно яркий структурный цвет и суб-амбиентное охлаждение. Трёхмерные фотонные кристаллы, например на основе целлюлозных нанокристаллов, формируют цвет за счёт брэгговской дифракции, поглощая при этом лишь около 3% солнечного излучения, сохраняя излучательную способность свыше 90% в ИК-диапазоне и обеспечивая охлаждение на 4 °C ниже температуры среды [7]. Параллельно развиваются текстильные применения: спектрально-инженерные ткани, использующие фотонные принципы управления ИК-излучением, демонстрируют температуру на 1,8 °C ниже стандартного хлопка в условиях городского теплового острова [8].

Практическое значение фотонно-кристаллического радиационного охлаждения определяется тем, что кондиционирование воздуха потребляет до 20% электроэнергии, расходуемой зданиями. Применение радиационно-охлаждающих покрытий на крышах и фасадах способно снизить нагрузку на системы кондиционирования на 10–20% без каких-либо эксплуатационных затрат [9]. В совокупности с текстильными применениями и цветными покрытиями, допускающими архитектурную интеграцию, фотонно-кристаллическое радиационное охлаждение представляет собой энергоэффективную и экологичную технологию с существенным потенциалом для снижения глобального потребления энергии.

Список использованных источников:

1. Yablonovitch, E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics / E. Yablonovitch // Physical Review Letters. — 1987. — Vol. 58, No. 20. — P. 2059–2062.

2. John, S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices / S. John // Physical Review Letters. — 1987. — Vol. 58, No. 23. — P. 2486–2489.

3. Fan, S. Photonics and Thermodynamics Concepts in Radiative Cooling / S. Fan, W. Li // Nature Photonics. — 2022. — Vol. 16. — P. 182–190.

4. Rephaeli, E. Ultrabroadband Photonic Structures To Achieve High-Performance Daytime Radiative Cooling / E. Rephaeli, A. Raman, S. Fan // Nano Letters. — 2013. — Vol. 13, No. 4. — P. 1457–1461.

5. Raman, A.P. Passive Radiative Cooling Below Ambient Air Temperature Under Direct Sunlight / A.P. Raman, M.A. Anoma, L. Zhu [et al.] // Nature. — 2014. — Vol. 515, No. 7528. — P. 540–544.

6. Zhai, Y. Scalable-Manufactured Randomized Glass-Polymer Hybrid Metamaterial for Daytime Radiative Cooling / Y. Zhai, Y. Ma, S.N. David [et al.] // Science. — 2017. — Vol. 355, No. 6329. — P. 1062–1066.

7. Wang, T. Colored Radiative Cooling: From Photonic Approaches to Fluorescent Colors and Beyond / T. Wang, Y. Liu, Y. Dong [et al.] // Advanced Materials. — 2025. — Vol. 37, No. 15. — Art. 2414300.

8. Wu, R. Spectrally Engineered Textile for Radiative Cooling Against Urban Heat Islands / R. Wu, C. Sui, T.-H. Chen [et al.] // Science. — 2024. — Vol. 384, No. 6701. — P. 1203–1212.

9. Lee, M. Photonic Structures in Radiative Cooling / M. Lee, G. Kim, Y. Jung [et al.] // Light: Science & Applications. — 2023. — Vol. 12. — Art. 134.

ЭВОЛЮЦИЯ КОНЦЕПЦИИ БЕЛЫХ ДЫР

Филичкин И. А., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Андрос Е. В. – старший преподаватель

Аннотация. В данной работе рассматривается эволюция представлений о белых дырах, начиная математическими моделями Фламма и Эйнштейна-Розена до астрофизической гипотезы И.Д. Новикова и современных исследований в рамках петлевой квантовой гравитации (LQG). Выводится потенциальная роль белых дыр в объяснении природы темной материи и разрешении информационного парадокса черных дыр Хокинга.

Белая дыра — это гипотетический астрофизический объект, предсказываемый уравнениями общей теории относительности Эйнштейна и представляющий собой антипод черной дыры. В то время как черная дыра — это область пространства-времени, из горизонта событий которой не выйти, белая дыра, напротив, является областью, допускающей только исходящие траектории. Белые дыры математически допустимы, но их физическая реализуемость долгое время остается под вопросом ввиду квантовой нестабильности.

Первым математическую возможность существования белой дыры отметил Людвиг Фламм в 1916 году, анализируя решение уравнений Эйнштейна для сферически-симметричного гравитационного поля (метрика Шварцшильда) [1]. Расчеты показали, что уравнения допускают два решения, одно из которых описывает черную дыру, а другое — объект со свойствами, противоположными ей. Более того, было обнаружено, что эти две области пространства-времени могут быть соединены между собой пространственно-временным каналом — прообразом того, что сегодня называют «кротовой норой». Позже эта гипотеза была развита в статье Эйнштейна и Розена 1935 года, ставшей фундаментальной для понимания связи черных и белых дыр и получившей название «Мост Эйнштейна-Розена» [2].

Игорь Дмитриевич Новиков в 1964 году искал объяснение квазарам — мощным и неизвестным на то время выплескам энергии в космосе. Исследование предполагало, что из-за неоднородности Большого взрыва некоторые области пространства, «запаздывающие ядра» (lagging cores) [3], могли задержаться в своем расширении, оставаясь в состоянии, близком к сингулярности. Для внешнего наблюдателя такой объект ничем не отличался бы от черной дыры, так как из-под его горизонта событий ничто не могло бы выйти, и он оставался бы невидимым. Однако, согласно представленной модели, ядро должно было начать стремительно расширяться спустя миллиарды лет, высвобождая колоссальную энергию. Таким образом, это была первая астрофизическая модель белой дыры, хотя она и была опровергнута самим автором спустя 10 лет [4], поскольку первые расчеты не учитывали рождение частиц вблизи сингулярности.

Гамма-всплеск GRB 060614, зарегистрированный 14 июня 2006 года на красном смещении z ~ 0,125, позволил иначе взглянуть на то, как белые дыры могут проявлять себя во Вселенной. О Главная аномалия заключалась в том, что при длительности 102 секунды (что соответствует классу длинных всплесков, >2 секунд) он не обладал обязательными характеристиками: отсутствовала сверхновая, а спектральные задержки и пиковая светимость были свойственны классу коротких всплесков (<2 секунд) [5]. Это было проверено благодаря двум снимкам галактики после всплеска GRB 060614. На первом снимке, сделанном 27 июня, хорошо видно послесвечение (см. рисунок 1). На втором же, сделанном 15 июля, послесвечение исчезло, но свет от сверхновой не зафиксирован (см. рисунок 2).

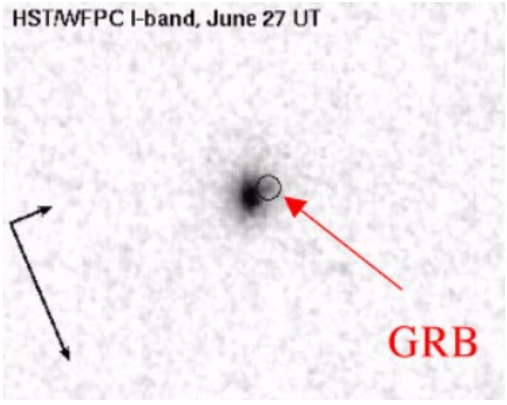


Рисунок 1 – Снимок галактики с гамма-всплеском GRB 060614 27 июня 2006 года

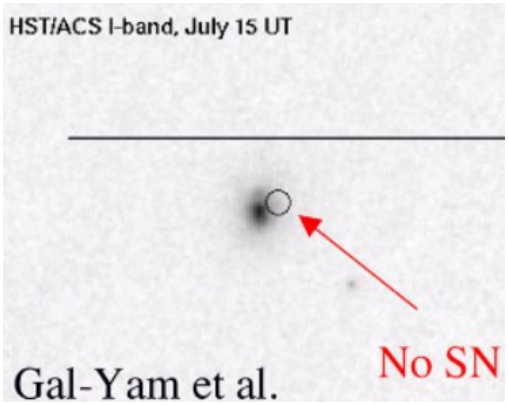


Рисунок 2 – Снимок галактики с гамма-всплеском GRB 060614 15 июля 2006 года

Проанализировав это несоответствие, в 2011 году израильские астрофизики Алон Реттер и Шломо Хеллер выдвинули предположение, что GRB 060614 мог быть прямым наблюдением белой дыры. Такое явление было названо «Малым взрывом» (Small Bang) по аналогии с Большим взрывом (Big Bang). Исследования привели к гипотезе, что Большой взрыв и сам мог являться следствием колоссального импульса белой дыры [6]. Считается, что Большой взрыв произошел из космологической сингулярности, что косвенно подкрепляет это предположение. Таким образом, можно допустить, что такие «взрывы» гипотетически способны своей чрезвычайно мощной энергией создавать новые вселенные, однако на данный момент эти суждения спекулятивны, как и сама гипотеза о связи гамма-всплесков и белых дыр.

Современные гипотезы белых дыр опираются на теорию петлевой квантовой гравитации (Loop Quantum Gravity, LQG). В этой теории пространство-время описывается как дискретная структура, состоящая из мельчайших квантовых ячеек планковских масштабов. По расчетам LQG, вещество, коллапсирующее в черную дыру, не доходит до сингулярности, а сжимается до максимально возможной (планковской) плотности, образуя «планковскую звезду» (Planck star) [7]. В этот момент квантовые эффекты гравитации меняют знак, после чего сжатие сменяется стремительным расширением, формируя белую дыру, выбрасывающую захваченную материю наружу. Исследования показывают, что время жизни белой дыры может быть пропорционально четвертой степени ее начальной массы, превышая предполагаемый возраст Вселенной. Это послужило образованию гипотезы Карло Ровелли и Франческо Видотто, что микроскопические белые дыры, оставшиеся от ранней Вселенной, могут составлять темную материю [8]. Кроме того, теория отскока разрешает проблему Хокинга (исчезновения информации в черной дыре), поскольку информация, сжатая в черных дырах, не исчезает и не уничтожается, а возвращается выталкивающим импульсом белой дыры [9].

Таким образом, концепция белых дыр прошла полную эволюцию, начиная с математических моделей Фламма и Новикова и заканчивая связью с теорией петлевой квантовой гравитации, фундаментально влияющей на представление о законах Вселенной, особенно в квантовом мире. Наиболее значимым результатом современных исследований является то, что белые дыры, возникающие в результате квантового отскока, могут не только объяснить природу темной материи, но и разрешить информационный парадокс Хокинга. Поиск новых наблюдательных данных, подобных гамма-всплеску GRB 060614, позволит приблизиться к подтверждению или опровержению этой теории.

Список использованных источников:

1. Flamm, L. Beiträge zur Einsteinschen Gravitationstheorie / L. Flamm // Physikalische Zeitschrift. – 1916. – Vol. 17. – P. 448-454.

2. Einstein, A. The Particle Problem in the General Theory of Relativity / A. Einstein, N. Rosen // Physical Review. – 1935. – Vol. 48, No. 1. – P. 73.

3. Новиков, И. Д. О запаздывающем расширении вселенной и квазарах / И. Д. Новиков // Астрономический журнал. – 1964. – Т. 41. – С. 1075.

4. Zel'dovich, Ya. B. Quantum effects in white holes / Ya. B. Zel'dovich, I. D. Novikov, A. A. Starobinskii // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1974. – Vol. 39, No. 6. – P. 933.

5. Fynbo, J. P. U. GCN Circular 5277: GRB060614: Detection of the host galaxy but no supernova emission / J. P. U. Fynbo [et al.] // NASA GCN. – 2006.

6. Retter, A. The revival of white holes as Small Bangs / A. Retter, S. Heller // arXiv preprint arXiv:1105.2776. – 2011.

7. Rovelli, C. Planck stars / C. Rovelli, F. Vidotto // International Journal of Modern Physics D. – 2014. – Vol. 23, No. 12. – P. 1442026.

8. Rovelli, C. Pre-big-bang black-hole remnants and past low entropy / C. Rovelli, F. Vidotto // arXiv preprint arXiv:1805.03224. – 2018.

9. Haggard, H. M. Black hole fireworks: quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling / H. M. Haggard, C. Rovelli // arXiv preprint arXiv:1407.0989. – 2014.

ОБРАБОТКА И РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ НА КОЛЛАЙДЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Пурус А.О., Голубев А.А., Дивас А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Бурый А.В. – ассистент

Аннотация. В работе исследуется применение методов машинного обучения для реконструкции событий в экспериментах на коллайдерах. Рассмотрены ограничения классических алгоритмов (фильтр Калмана) в условиях высокой светимости и зашумленности. Проведен обзор современных архитектур нейронных сетей, включая графовые и сверточные сети. Показано, что методы машинного обучения позволяют эффективно обрабатывать зашумленные данные, выявлять сложные корреляции и повышать точность реконструкции, что делает их перспективным инструментом для систем сбора и обработки данных следующего поколения.

Современные эксперименты на Большом адронном коллайдере (LHC) сталкиваются с беспрецедентными объемами данных [1]. При переходе к сверхвысокой светимости (HL-LHC) частота взаимодействий достигает мегагерцового диапазона, что приводит к экспоненциальному росту комбинаторной сложности при реконструкции событий.

Классические алгоритмы, такие как фильтр Калмана, демонстрируют недостаточную эффективность в условиях pile-up (до 200 и более взаимодействий на одно пересечение сгустков), что ставит задачу поиска новых подходов [2].

Ключевой характеристикой коллайдера является энергия в системе центра масс. Для встречных пучков с энергиями E_1 и E_2 , сталкивающихся под углом θ, она вычисляется по формуле:

$$\sqrt{\mathrm{S}} = \sqrt{2\mathrm{E}_1\mathrm{E}_2 + 2\mathrm{p}_1\mathrm{p}_2\cos\theta} \quad (1)$$

где p_1 и p_2 — импульсы частиц.

При лобовом столкновении (θ = π) и равных энергиях ($E_1 = E_2 = E$) выражение упрощается до $\sqrt{S} = 2E$ [3].

Величина $\sqrt{S} = 2E$ определяет порог рождения новых частиц и напрямую влияет на сложность реконструкции событий.

Основная сложность анализа заключается в том, что детекторы регистрируют не сами короткоживущие частицы, а сигналы (хиты) в трековых системах и энерговыделения в калориметрах. Для реконструкции треков заряженных частиц используется измерение радиуса кривизны R в магнитном поле B, что позволяет определить импульс частицы:

$$p = \mathrm{q}BR\,, \quad (2)$$

где q — заряд, B — индукция поля, а R — радиус кривизны.

Традиционные методы, основанные на кинематической подгонке, приводят к комбинаторному взрыву и накапливают систематические ошибки в условиях высокой зашумленности [4].

В работе [5] проведен обзор методов машинного обучения, применимых для решения этих задач.

Особое внимание уделяется графовым нейронным сетям (GNN) для реконструкции треков, где данные детектора естественным образом представляются в виде графа, а также сверточным нейронным сетям (CNN) для обработки калориметрической информации как изображений [6]. Для обучения моделей используется функция потерь — кросс-энтропия, которая измеряет различие между истинным распределением вероятностей и предсказанием модели:

$$L = -\Sigma y_1 \log(p_i) \quad (3)$$

где y_i — истинная метка класса, а p_i — вероятность, предсказанная нейронной сетью [7]. Оптимизация весов осуществляется с помощью алгоритма Adam.

В работе [8] описан процесс подготовки данных с использованием симуляций Монте-Карло (GEANT4), включающий очистку от шумов, нормализацию и разделение выборки.

Применение нейросетевых подходов позволяет не только эффективно распараллеливать вычисления, но и выявлять скрытые паттерны в данных, недоступные для аналитических алгоритмов. Установлено, что использование методов машинного обучения существенно повышает точность идентификации частиц и устойчивость реконструкции к фоновым шумам [9].

Полученные результаты подтверждают, что нейросетевые архитектуры могут стать основой для систем триггера и обработки данных следующего поколения, что особенно актуально в свете модернизации ускорительного комплекса LHC [10].

Список использованных источников:

1. Evans, L., Bryant, P. LHC Machine // Journal of Instrumentation. -- 2008. -- Vol. 3, No. 08. -- P. S08001.

2. Agostinelli, S. et al. (GEANT4 Collaboration). GEANT4---a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. -- 2003. -- Vol. 506, No. 3. -- P. 250-303.

3. The ATLAS Collaboration. Electron and photon performance measurements with the ATLAS detector using the 2015-2017 LHC proton-proton collision data // Journal of Instrumentation. -- 2019. -- Vol. 14, No. 12. -- P. P12006.

4. Frühwirth, R. Application of Kalman filtering to track and vertex fitting // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. -- 1987. -- Vol. 262, No. 2-3. -- P. 444-450.

5. The CMS Collaboration. Description and performance of track and primary-vertex reconstruction with the CMS tracker // Journal of Instrumentation. -- 2014. -- Vol. 9, No. 10. -- P. P10009.

6. Radovic A., Williams M., Rousseau D. et al. Machine learning at the energy and intensity frontiers of particle physics // Nature. -- 2018. --- Vol. 560. --- P. 41--48 .

7. Guest D., Cranmer K., Whiteson D. Deep Learning and its Application to LHC Physics // Annual Review of Nuclear and Particle Science. --- 2018. --- Vol. 68. --- P. 161--181.

8. CERN. GEANT4 --- Simulation Toolkit for Particle Physics Experiments. --- URL: https://geant4.web.cern.ch/ (дата обращения: 21.02.2026).

9. ATLAS Collaboration. ATLAS Open Data Portal. --- URL: https://opendata.atlas.cern/ (дата обращения: 21.02.2026).

10. Kingma D., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // arXiv:1412.6980. --- URL: https://arxiv.org/abs/1412.6980 (дата обращения: 21.02.2026).

ФИЗИКА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ДИСПЛЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Доронин Д.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Кургузова О.Э. – старший преподаватель

Аннотация. В работе рассматриваются физические основы жидких кристаллов и их практическое применение в современных дисплейных технологиях. Описаны основные типы жидких кристаллов (нематические, смектические, холестерические) и механизм их взаимодействия с электрическим полем на основе эффекта Фредерикса. Разобран принцип работы жидкокристаллических дисплеев (LCD), включая анализ технологий TN, IPS и VA. Рассмотрены перспективные направления развития, включая гибкие дисплеи и полимерно-дисперсные жидкие кристаллы. Материалы работы могут быть полезны для понимания физики современных экранов и телевизоров.

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют собой особое агрегатное состояние вещества, промежуточное между изотропной жидкостью и кристаллическим твёрдым телом. В этом состоянии вещество сохраняет текучесть жидкости, но при этом обладает анизотропией оптических, электрических и магнитных свойств, характерной для кристаллов [1]. Открытие жидкокристаллического состояния принадлежит Ф. Рейнитцеру, который в 1888 г. обнаружил, что холестерилбензоат при нагревании проходит через мутную фазу, обладающую двойным лучепреломлением [2]. Благодаря работам этого учёного и его последователей, в XX веке были раскрыты физические механизмы, лежащие в основе жидкокристаллических явлений, что позволило создать на их основе дисплейные технологии.

По характеру молекулярного упорядочения жидкие кристаллы подразделяются на три основных типа: нематические, смектические и холестерические [1]. В нематических жидких кристаллах молекулы ориентированы преимущественно вдоль одного направления, определяемого вектором-директором $\vec{n}$, однако их центры масс расположены хаотично. Нематики обладают оптической и диэлектрической анизотропией и являются наиболее распространённым типом, используемым в дисплейных устройствах. Смектические жидкие кристаллы, помимо ориентационного порядка, обладают также одномерным позиционным порядком — молекулы организованы в слои с определённым расстоянием между ними. Слоистая структура смектиков делает их более вязкими, что ограничивает их применение в быстродействующих дисплеях, однако они находят применение в специализированных устройствах. Холестерические жидкие кристаллы представляют собой разновидность нематических, в которых директор $\vec{n}$ непрерывно поворачивается в пространстве, образуя спиральную структуру с определённым шагом [2]. Эта уникальная спиральная организация молекул приводит к селективному отражению света определённых длин волн и яркой интерференционной окраске.

Ключевым свойством жидких кристаллов, обеспечивающим их применение в дисплейных технологиях, является способность молекул переориентироваться под действием внешнего электрического поля. Данное явление описывается эффектом Фредерикса — пороговым переходом ориентации директора при достижении критического значения напряжённости поля [3]. Этот эффект, открытый советским физиком В.К. Фредериксом в 1927 году, стал основой для создания всех современных ЖК-дисплеев. Пороговое напряжение перехода Фредерикса определяется выражением:

$$U_c = \pi \sqrt{\frac{K}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}} \quad , \tag{1}$$

где K — модуль упругости Франка; ε_0 — электрическая постоянная; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{||} - \varepsilon_{\perp}$ — анизотропия диэлектрической проницаемости жидкого кристалла [3]. Типичные значения порогового напряжения составляют 1-3 В, что является исключительно низким по сравнению с другими электрооптическими материалами, обеспечивая высокую энергоэффективность и быстрый отклик ЖК-дисплеев. Константа Франка K характеризует упругость молекулярной структуры ЖК и зависит от типа деформации (изгиб, кручение или сплейсинг).

Принцип работы жидкокристаллического дисплея (LCD) основан на управлении поляризацией света. Конструкция типичного LCD-элемента включает два поляризатора, скрещённых под углом 90°, между которыми расположен слой жидкого кристалла и два прозрачных электрода из оксида индия-олова (ITO) [4]. В отсутствие электрического поля молекулы нематического жидкого кристалла, закрученные на 90° ориентирующими слоями подложек (так называемая твист-структура), поворачивают плоскость поляризации проходящего света на 90°, и свет проходит через второй поляризатор, создавая яркое (белое) изображение. При подаче напряжения, превышающего пороговое значение, молекулы переориентируются вдоль направления электрического поля, твист-структура разрушается, вращение плоскости поляризации прекращается, и свет

блокируется вторым поляризатором [4]. Регулируя величину приложенного напряжения, можно плавно изменять степень переориентации молекул и контролировать интенсивность проходящего света, получая различные уровни яркости пикселя.

В современных дисплейных технологиях используются различные модификации жидкокристаллических ячеек. Технология TN (Twisted Nematic) основана на описанном выше принципе закручивания молекул на 90° и отличается высоким быстродействием (время отклика 1–5 мс), что делает её популярной для игровых мониторов и бюджетных дисплеев, однако имеет ограниченные углы обзора и посредственную цветопередачу [5]. Технология IPS (In-Plane Switching), разработанная компанией Hitachi в 1996 году, использует горизонтальное расположение электродов на одной подложке, что позволяет переориентировать молекулы в плоскости экрана и обеспечивает широкие углы обзора до 178° и высокую точность цветопередачи (время отклика 4-8 мс) [5]. Эта технология стала стандартом для смартфонов, планшетов и профессиональных графических мониторов. Технология VA (Vertical Alignment) применяет вертикальную начальную ориентацию молекул с положительной диэлектрической анизотропией ($\varepsilon_0 > 0$), что обеспечивает исключительно высокую контрастность изображения [5]. VA-матрицы обладают глубоким чёрным цветом и статической контрастностью до 3000:1, но могут проявлять цветовые сдвиги при экстремальных углах просмотра. Выбор технологии зависит от конкретного применения: TN используется, где критична скорость отклика, при IPS требуется точная цветопередача и широкие углы обзора, VA нужна для максимальной контрастности.

Важной характеристикой жидкокристаллических дисплеев является температурная стабильность, поскольку мезофаза существует в ограниченном диапазоне температур, что определяет условия эксплуатации устройств [1]. Современные ЖК-композиции представляют собой многокомпонентные смеси органических соединений, что позволяет существенно расширить рабочий температурный диапазон и улучшить эксплуатационные характеристики дисплеев [3]. Значительное влияние на качество изображения оказывает также ориентация молекул на границе с подложкой, которая формируется специальной обработкой ориентирующих слоёв [2]. В современных матрицах применяется активная адресация с использованием тонкоплёночных транзисторов (TFT), обеспечивающая независимое управление каждым пикселем и высокое качество динамического изображения [5].

Помимо классических LCD-дисплеев, жидкие кристаллы находят применение и в перспективных технологиях. Полимерно-дисперсные жидкие кристаллы (PDLC) используются в «умных» окнах с электрически переключаемой прозрачностью, где микроскопические капельки ЖК диспергированы в полимерной матрице [6]. Без напряжения такое окно рассеивает свет и выглядит матовым, а при подаче электрического напряжения молекулы ЖК выстраиваются, и окно становится прозрачным. Эта технология находит применение в офисных перегородках, автомобилях и архитектурных конструкциях. Холестерические жидкие кристаллы применяются в отражательных дисплеях с бистабильной памятью, не требующих энергии для поддержания изображения после переключения пикселя [6], что делает их идеальными для электронных ценников и электронных книг. Активно развиваются гибкие жидкокристаллические дисплеи на полимерных подложках, позволяющие создавать изогнутые, сгибаемые и даже сворачиваемые дисплеи для использования в носимой электронике и инновационных устройствах. Жидкокристаллические пространственные модуляторы света (SLM) находят применение в адаптивной оптике для коррекции искажений в телескопах, голографии, 3D-дисплеях и технологиях виртуальной и дополненной реальности [6].

Таким образом, жидкие кристаллы представляют собой уникальный класс материалов, физические свойства которых — анизотропия, чувствительность к электрическому полю и способность управлять поляризацией света — обусловили их широчайшее применение в дисплейных технологиях. Эффект Фредерикса позволяет эффективно и энергоэкономично управлять оптическими характеристиками ЖК-устройств при низких напряжениях. Разнообразие существующих технологий LCD-матриц демонстрирует адаптивность жидкокристаллических материалов для различных задач — от высокоскоростных игровых мониторов до профессиональных дисплеев с идеальной цветопередачей. Дальнейшее развитие этой области связано с созданием новых жидкокристаллических композиций с улучшенными электрооптическими характеристиками, совершенствованием методов управления молекулярной ориентацией и расширением областей применения ЖК-технологий в информационных и оптических системах будущего.

Список использованных источников:

1. Де Жен, П. Ж. Физика жидких кристаллов / П. Ж. де Жен, Ж. Пру. — М. : Мир, 1982. — 488 с.
2. Блинов, Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / Л. М. Блинов. – М. : Наука, 1978.– 384 с.
3. Сонин, А. С. Введение в физику жидких кристаллов / А. С. Сонин. – М. : Наука, 1983. – 320 с.
4. Yeh, P. Optics of Liquid Crystal Displays / P. Yeh, C. Gu. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2010. – 640 p.
5. Den Boer, W. Active Matrix Liquid Crystal Displays: Fundamentals and Applications / W. Den Boer. – Burlington : Newnes, 2009.– 256 p.
6. Yang, D.-K. Fundamentals of Liquid Crystal Devices / D.-K. Yang, S.-T. Wu. – 2nd ed. – Chichester : Wiley, 2014. – 592 p.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СУХОМ И ВЛАЖНОМ СОСТОЯНИЯХ

Кускова В.А., Андрушкевич Э.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Кургузова О.Э.– старший преподаватель

В работе представлен экспериментальный анализ эффективности теплоизоляции распространенных материалов (шерсть, вата, поролон, синтепон). Исследовано влияние влажности на теплопроводность утеплителей. Экспериментально подтверждено, что синтетические материалы с закрытой пористой структурой превосходят натуральные аналоги, а намокание снижает теплоизоляционные свойства всех образцов на 15–22% из-за вытеснения воздуха водой, имеющей высокую теплопроводность.

Проблема энергоэффективности и сохранения тепла является актуальной как в строительстве, так и в производстве одежды. Физической основой теплоизоляции служит низкая теплопроводность материала. Согласно закону Фурье, который является основным законом теплопроводности, плотность потока (количество теплоты, проходящее через единицу площади в единицу времени) прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \operatorname{grad} T\,, \tag{1}$$

где $\vec{q}$ – вектор плотности теплового потока, λ – коэффициент теплопроводности материала, $\operatorname{grad} T$ – градиент температуры, показывающий направление и скорость изменения температуры.

Знак минус означает, что тепловой поток направлен в сторону, противоположную вектору градиента, то есть от более горячих участков к более холодным.

Таким образом, количество теплоты, передаваемое через материал, прямо пропорционально градиенту температуры и коэффициенту теплопроводности λ [1]. Идеальным утеплителем является неподвижный воздух, коэффициент теплопроводности которого составляет $\lambda_{\text{возд}}$ = 0,026 Вт/(м·К). Большинство современных утеплителей функционируют за счет удержания воздуха в порах своей структуры. Однако существенным фактором, ухудшающим теплоизоляционные свойства, является влага: теплопроводность воды $\lambda_{\text{вод}}$ = 0,6 Вт/(м·К), что примерно в 23 раза выше, чем у воздуха [4]. При намокании вода вытесняет воздух из пор, резко увеличивая потери тепла. Отметим, что теплоизоляционные материалы характеризуются низкой теплопроводностью (обычно λ не превышает 0,175 Вт/(м·К)) и плотностью (до 500-600 кг/м^3), что достигается за счет пористой или волокнистой структуры. Ключевые свойства таких материалов включают влагостойкость, огнестойкость, прочность на сжатие и стабильность размеров (формостабильность). Основная их функция – удержание тепла за счет замкнутых пор, наполненных воздухом.

Целью данной работы является сравнительный анализ теплоизоляционных свойств четырех доступных материалов (натуральная шерсть, хлопковая вата, поролон, синтепон) в сухом и влажном состояниях, а также количественная оценка деградации их защитных свойств при увлажнении.

Экспериментальная методика была основана на моделировании процесса остывания нагретого тела. Использовались пять стеклянных банок объемом 250 мл. В каждую банку наливали 200 мл воды с начальной температурой t_0 = 70°C. Первая банка служила контрольным образцом без изоляции. Остальные четыре банки были обернуты слоями исследуемых материалов толщиной 2 см. Измерение температуры проводилось каждые 5 минут в течение 40 минут. После завершения первой серии экспериментов процедура была полностью повторена с теми же материалами, предварительно насыщенными водой до состояния полного увлажнения. В результате фиксировалась конечная температуре воды спустя 40 минут (t_{40}) после начала измерения.

Результаты эксперимента для сухих материалов представлены в таблице 1. Анализ полученных результатов показывает, что все исследуемые материалы эффективно замедляют процесс теплоотдачи по сравнению с контрольным образцом. Однако наблюдается четкое разделение по эффективности: синтетические материалы (синтепон и поролон) обеспечили сохранение температуры на уровне 53°C, что на 3°C выше показателей натуральных материалов (шерсть и вата). Это объясняется структурными особенностями синтетики: наличие мелких закрытых пор препятствует конвекции воздуха внутри материала и надежнее удерживает газовую прослойку [2]. Натуральные волокна имеют более открытую структуру, что способствует микроконвекции и чуть более интенсивному теплообмену. Таким образом, с точки зрения снижения тепловых потерь в условиях естественного охлаждения синтетические теплоизоляторы демонстрируют преимущество перед натуральными аналогами. Полученные данные согласуются с литературными сведениями о роли пористости и закрытости ячеек в теплозащитных свойствах материалов.

Таблица 1 – Температура воды через 40 минут при использовании сухих утеплителей.

Материал	Температура t_{40}, °C	Разница с контролем, °C
Без изоляции (контроль)	34	-
Шерсть	50	+16
Вата	50	+16
Поролон	53	+19
Синтепон	53	+19

Важным этапом исследования стало изучение влияния влаги на теплоизоляционные свойства различных материалов. Данные сравнения сухих и мокрых образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение эффективности сухих и мокрых материалов

Материал	t_{40}(сухой), °C	t_{40}(мокрый), °C	Потеря эффективности,°C	Относительное падение, %
Синтепон	53	45	8	15,1
Поролон	53	44	9	17
Вата	50	40	10	20
Шерсть	50	39	11	22

Как видно из таблицы 2, намокание приводит к значительному снижению теплоизоляционных свойств всех материалов. Абсолютная потеря температуры составила от 8 до 11°C. Наибольшую устойчивость к влаге продемонстрировал синтепон, потерявший лишь 15% эффективности. Это связано с его гидрофобными свойствами: он практически не впитывает воду в свою структуру, и влага остается преимущественно на поверхности или в крупных межволоконных пространствах, не полностью замещая воздух в порах. Напротив, натуральные материалы (вата и шерсть) обладают высокой гигроскопичностью. Вода активно проникает в капилляры волокон, вытесняя воздух и создавая «мостики холода». Для шерсти падение эффективности составило 22%, что делает мокрую шерстяную одежду опасной для здоровья в зимних условиях.

Полученные результаты согласуются с теоретическими данными о теплофизических свойствах веществ [3]. Увеличение теплопроводности влажного материала объясняется заменой воздуха на воду в объеме утеплителя. Кроме того, во влажных материалах усиливается перенос тепла за счет фазовых переходов и миграции влаги внутри пористой структуры.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы: 1) Среди рассмотренных материалов наилучшими теплоизоляционными свойствами в сухом состоянии обладают синтетические утеплители (синтепон, поролон), превосходящие натуральные аналоги (шерсть, вата) благодаря оптимальной пористой структуре. 2) влажность является фактором, снижающим эффективность любой теплоизоляции. Намокание уменьшает способность материала удерживать тепло в среднем на 18%. 3) Синтетические материалы демонстрируют большую стабильность характеристик во влажной среде по сравнению с натуральными, что обуславливает их преимущество для использования в условиях повышенной влажности и осадков.

Практическая значимость работы заключается в обосновании выбора синтетических утеплителей для зимней одежды и строительных конструкций в климатических условиях Беларуси, где высокая влажность является частым явлением. Рекомендуется приоритетное использование материалов с закрытой пористой структурой и обязательная защита утеплителей от прямого попадания влаги паро- и гидроизоляционными мембранами.

Список использованных источников:

1. Фурье, Ж.Б. Аналитическая теория тепла / Ж.Б. Фурье. – М. : Наука, 1985. – 480 с.

2. Лыков, А.В. Тепломассообмен: Справочник / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.

3. Ягубкин, А.Н. Оценка влияния влажности на теплопроводность строительных и текстильных материалов / А.Н. Ягубкин, А.А. Бакатович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия А. Естественные и технические науки. – 2025. – № 4. – С. 60–67.

4. ГОСТ 7076-87. Материалы строительные. Метод определения теплопроводности в стационарном тепловом режиме. – Введ. 1988-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 12 с.