

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

**Компьютерные и информационные  
технологии в науке, инженерии  
и управлении**

«КомТех-2024»

Материалы Всероссийской научно-технической  
конференции с международным участием

*В двух томах*

**Том II**

Ростов-на-Дону – Таганрог  
Издательство Южного федерального университета  
2024

УДК 004:[001+62+005](063)

ББК 32.973+72 я431

К63

*Ответственный редактор С. И. Клевцов*

К63 Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2024» : материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием : в 2 т. / отв. ред С. И. Клевцов ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2024.

ISBN 978-5-9275-4717-3

Т. 2. – 364 с.

ISBN 978-5-9275-4719-7 (Т. 2)

В настоящее издание вошли доклады по материалам Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О. Н. Пьявченко «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении», рекомендованные к опубликованию Оргкомитетом.

Во второй том материалов конференции вошли доклады участников конференции, посвященные авиационным системам, технологиям беспилотных летательных аппаратов, современным микро- и нанoeлектронным системам и технологиям, системам связи и навигации, моделированию физических процессов, контролю и управлению в технических системах, системам диагностики, вопросам промышленного дизайна, компьютерным технологиям в инженерной подготовке, проблемам мехатроники и робототехники.

Доклады могут быть интересны научным работникам, преподавателям, инженерам и студентам, специализирующимся в применении компьютерной обработки информации в различных областях деятельности человека.

УДК 004:[001+62+005](063)

ББК 32.973+72 я431

ISBN 978-5-9275-4719-7 (Т. 2)

ISBN 978-5-9275-4717-3

© Южный федеральный университет, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция – **Авиационные системы, технологии беспилотных летательных аппаратов**

Асовский Валерий Павлович, Кузьменко Алла Сергеевна  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПРЫСКИВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ  
ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ..... 10

Асовский Валерий Павлович, Кузьменко Алла Сергеевна,  
Асовский Алексей Валериевич  
РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СНОСА  
ПРИ ОПРЫСКИВАНИИ БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ  
СУДАМИ НА БАЗЕ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАССЕЙЯНИЯ  
ВЕЩЕСТВ..... 19

Носрати Мехрад, Аббасов Ифтихар Балакишиевич  
ИССЛЕДОВАНИЯ В КОСМОСЕ: ОЦЕНКА МЕСТА ПОСАДКИ  
ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАРСА..... 30

Берлова Мария Максимовна  
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РАЗРАБОТКИ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ..... 36

Джаныбеков Руслан Юсуфович, Аббасов Ифтихар Балакишиевич  
ЭКРАНОПЛАН КАК НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ В СТРОЕНИИ  
ВОЕННО-МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ..... 43

### Секция – **Современные микро- и нанoeлектронные системы и технологии**

Нагаенко Александр Владимирович,  
Полянский Тимофей Алексеевич  
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
СОСТАВ-СТРОЕНИЕ-СВОЙСТВА ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ..... 57

<p>Мараховский Михаил Алексеевич,  Дыкина Любовь Александровна, Филь Вадим Владимирович,  Панич Александр Анатольевич  ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСНЫХ ФАЗ  ИСХОДНОГО СЫРЬЯ НА СВОЙСТВА  СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ СИСТЕМЫ ЦТС.....</p>	65
<p>Панич Евгений Анатольевич  ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ,  ФОРМИРУЕМЫХ НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  ФАЗ КИСЛОРОДНО-ОКТАЭДРИЧЕСКОГО ТИПА.....</p>	70
<p>Жук Алексей Андреевич, Сергеенко Марсель Алексеевич  АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫЙ ВЫХОДНОЙ КАСКАД  БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ  С ВХОДНЫМ P-N-P БИПОЛЯРНЫМ ТРАНЗИСТОРОМ.....</p>	77
<p>Васильев Константин Александрович  ПРИМЕНЕНИЕ РАЗМЫТИЯ ДЛЯ МАСКИРОВАНИЯ  ИНФОРМАЦИИ И УРОВНЕНИЯ ФРЕДГОЛЬМА ПЕРВОГО  РОДА ДЛЯ ЕЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ.....</p>	85
<p>Денисенко Дарья Юрьевна, Бутырлагин Николай Владимирович,  Прокопенко Николай Николаевич, Иванов Юрий Иванович  ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВЫЙ ФИЛЬТР НИЗКИХ ЧАСТОТ  ВТОРОГО ПОРЯДКА НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ  КОНДЕНСАТОРАХ С ОДНОЭЛЕМЕНТНОЙ  ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ ПОЛЮСА .....</p>	91
<p>Пилипенко Александр Михайлович,  Портных Дмитрий Александрович  ПРИНЦИПЫ ШАБЛОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....</p>	99
<p>Андреева Ирина Марковна, Одинец Евгений Дмитриевич  ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В МЕДИЦИНЕ И  БИОТЕХНОЛОГИЯХ.....</p>	104



Лахина Екатерина Александровна, Черненко Наталия Евгеньевна,  
 Кириченко Данил Владимирович, Шандыба Никита Андреевич,  
 Балакирев Сергей Вячеславович, Солодовник Максим Сергеевич  
 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОТЖИГА  
 ПОДЛОЖКИ GaAs(111) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
 НАНОУГЛУБЛЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ  
 ФОКУСИРОВАННЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ..... 113

Пленингер Максимилиан, Балакирев Сергей Вячеславович,  
 Солодовник Максим Сергеевич  
 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1.3  
 МКМ В ЛОГИЧЕСКОМ КОМПАРАТОРЕ НА ОСНОВЕ GaAs..... 122

Секция – **Промышленный дизайн и аддитивные технологии**

Авраменко Светлана Игоревна,  
 Гривцов Владимир Владиславович, Корецкая Сандра Сергеевна  
 ДИЗАЙН ДЕТСКОЙ КНИГИ В. П. КАТАЕВА  
 «ЦВЕТИК -СЕМИЦВЕТИК»..... 128

Калашникова Татьяна Григорьевна,  
 Дружинина Александра Дмитриевна,  
 Михеев Вячеслав Алексеевич, Богунова Александра Павловна,  
 Завернина Елизавета Евгеньевна, Нежнова Антонина Валерьевна  
 ДИЗАЙН-КОНЦЕПЦИЯ ДЕТСКОЙ ИГРОВОЙ ПЛОЩАДКИ ..... 136

Секция – **Компьютерные технологии в инженерной  
 подготовке**

Панычев Андрей Иванович, Максимов Александр Викторович  
 РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
 ОСОБЕННОСТЕЙ ОДНОФАЗНЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ  
 ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ..... 144

Шиндор Ольга Владимировна, Кокунин Петр Анатольевич  
 СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В СРЕДЕ  
 ГРАФИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ  
 ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО  
 ИНЖЕНЕРНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ..... 150

Секция – **Инфокоммуникационные технологии**

Резников Денис Александрович, Леонова Антонина Валерьевна, Шпаковская Оксана Юрьевна РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТ- РОВ В ПОМЕЩЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОД- НЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.....	158
Мирошниченко Дарья Вячеславовна АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА: ПЕРЕВОД ТЕСТА В ШАБЛОН С ПОМОЩЬЮ PYTHON.....	165
Мирошниченко Дарья Вячеславовна ЦИФРОВАЯ АНАЛИТИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ.....	170
Мирошниченко Дарья Вячеславовна СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ: МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ.....	174
Хельфауи Абдерауф, Пилипенко Александр Михайлович ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ 6G.....	179
Андреева Ирина Марковна, Одинец Евгений Дмитриевич РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПЕРСПЕКТИВЫ В РОССИИ.....	184
Данилова Ирина Игоревна ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	193
Марьев Александр Александрович ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР НА БАЗЕ ПЛАТЫ RASPBERRY PI PICO.....	299
Тимошенко Данил Александрович ЦИФРОАНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ДВОЙНОЙ БУФЕРИЗАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА НА БАЗЕ RASPBERRY PI PICO.....	206

Белик Владимир Андреевич АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ С ОДНОПОЛЯРНЫМ ПИТАНИЕМ ДЛЯ БЛОКА ВВОДА-ВЫВОДА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ.....	211
Нагорный Владимир Александрович, Белый Иван Сергеевич КВАДРАТУРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРА.....	218
Максимова София Михайловна ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АНАЛИЗЕ ФИНАНСОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ.....	225
Федосов Валентин Петрович, Циркуленко Артемий Викторович ЦИФРОВОЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО КАНАЛА СВЯЗИ СИСТЕМЫ ММО-OFDM НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ .....	232
Понимаш Захар Алексеевич НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ИЗ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ТРАНСФОРМЕР.....	238
<b>Секция – Системы связи и навигации</b>	
Деркачев Владимир Александрович, Лысюк Юрий Алексеевич, Новодранова Любовь Владимировна, Селиванов Артем Владиславович БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ РАДИОСИСТЕМЫ.....	245
Косак Роман Эдуардович ВЛИЯНИЕ ВСТАВОК ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА КРОМКУ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ВИВАЛЬДИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ .....	251

Жилин Сергей Викторович, Архипенко Владимир Владимирович, Басан Елена Сергеевна АДАПТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.....	256
Сердюков Владимир Владимирович, Коротков Константин Станиславович К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ В СМЕСИТЕЛЕ.....	264
Сердюков Владимир Владимирович, Коротков Константин Станиславович, Голан Антон Васильевич, Маньшина Александра Тарасовна, Каложная Софья Евгеньевна ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ФАЗ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ И СВЧ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МОДУЛЯХ СИСТЕМ СВЯЗИ С МНОГОУРОВНЕВЫМИ ФОРМАТАМИ МОДУЛЯЦИИ.....	270
<b>Секция – Мехатроника и робототехника</b>	
Горобцов Александр Сергеевич ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ.....	278
Кучев Дмитрий Николаевич РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИТРУБНЫМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ.....	283
Хуссейн Фирас Айманович РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ.....	289
Наим Муханнад МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТУРНИКА, УСТАНОВЛЕННОГО В НАЧАЛЕ НА ВИБРИРУЮЩЕЙ ЖЕСТКОЙ ПЛАТФОРМЕ.....	295
Чикрин Дмитрий Евгеньевич, Смольникова Камилла Рустемовна ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ.....	300

Слюсаренко Михаил Анатольевич, Веревкина Лина Станиславовна КВАДРОКОПТЕР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ОБЪЕКТОВ.....	306
Светличный Никита Игоревич ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРЯНОГО КОЛЕСА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ.....	311
Мильчуков Иван Андреевич РАСЧЕТ И ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА.....	318
Власов Владимир Михайлович АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ШЕСТИКОЛЁСНОЙ МЕКАНУМ-ПЛАТФОРМЫ.....	325
Русских Мария Дмитриевна, Сафина Лилия Наилевна, Тимершин Булат Айратович, Пашин Дмитрий Михайлович, Чикрин Дмитрий Евгеньевич РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ШАХМАТНОГО МАНИПУЛЯТОРА.....	333
Фархуд Азхар Кадим, Абу Хамдан Низар ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ В ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ.....	339
Шкаруппа Валерий Евгеньевич, Шпаковская Оксана Юрьевна, Леонова Антонина Валерьевна ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МЭМС-ТЕХНОЛОГИЙ ПОРТАТИВНОГО КАРДИОАНАЛИЗАТОРА ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА.....	347
Емелина Е.А., Овсянникова Ж.А., Шпаковская А.В. ИСПЫТАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ТРЕНИНГА ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ.....	354

Секция – **Авиационные системы, технологии беспилотных летательных аппаратов**

УДК 629.735.015

Асовский Валерий Павлович, Кузьменко Алла Сергеевна

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПРЫСКИВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ**

*Рассмотрены вопросы использования компьютерного моделирования процессов и показателей опрыскивания с применением беспилотных воздушных судов вертолетного типа для решения актуальных научно-практических задач. С использованием разработанного и апробированного расчетно-программного комплекса моделирования проведены многовариантные расчеты показателей опрыскивания гексакоптером типа DJI Agras T20 в характерных условиях проведения обработок. Определены качественные и количественные соотношения между отдельными параметрами и целевыми показателями защитного опрыскивания, а также ряд значимых многофакторных степенных регрессий для оценки целевых показателей такого опрыскивания.*

*Беспилотное воздушное судно (БВС), мультикоптер, опрыскивание, моделирование, норма внесения, покрытие каплями, качество внесения, эффективность обработки.*

Asovsky Valery Pavlovich, Kuzmenko Alla Sergeevna

**COMPUTER SIMULATION OF PROCESSES AND INDICATORS OF SPRAYING BY UNMANNED AIRCRAFT**

*The article discusses the use of computer simulation of spraying processes and indicators using helicopter-type unmanned aerial vehicles to solve current scientific and practical problems. Multivariate calculations of spraying parameters with a DJI Agras T20 hexacopter under typical treatment conditions were carried out using the developed and tested computational modeling software package. Qualitative and quantitative relationships between individual parameters and target indicators of protective spraying have been determined, as well as a number of significant multivariate power regressions for assessing the target indicators of such spraying.*

*Unmanned aircraft (UAV), multicopter, spraying, simulation, application rate, droplet coating, application quality, processing efficiency.*

## **Введение**

Одним из наиболее перспективных направлений развития гражданских беспилотных систем в настоящее время считается использование беспилотных воздушных судов (БВС) в сельском хозяйстве. В этой сфере в ближайшие годы может быть задействовано до 80-90 % всех гражданских БВС, при этом значительная их часть (30 - 40 %) будет использована для внесения пестицидов и агрохимикатов ([1]).

Приоритетным для такого внесения характеристик являются БВС вертолётного типа, прежде всего мультироторной схемы - мультикоптеры (МК) ([2]). В связи с ростом объемов применения таких БВС наблюдается расширение количества в основном экспериментальных исследований различных аспектов такого применения для разнообразных типов БВС, обрабатываемых культур, рабочих режимов полета, параметров внесения веществ, внешних условий обработок и других факторов.

Анализ исследований в области обработок БВС ([3]) показал, что для них наблюдаются бессистемность, ограниченный характер и во многих случаях противоречивость использованных методов и полученных результатов, в связи с чем одной из важнейших задач для обеспечения внедрения БВС в массовое сельскохозяйственное производство определена необходимость создания и использования средств моделирования процессов и показателей внесения БВС рабочих веществ, прежде всего в части оценки влияния параметров внесения на целевые показатели опрыскивания.

В настоящее время для исследования разных процессов используются методы физического и математического (компьютерного) моделирования.

Использование методов физического моделирования внесения БВС рабочих веществ ввиду его сложного характера, как показывает анализ, ограничивается преимущественно исследованиями отдельных процессов внесения, например, скоростей потока винтов БВС ([4]), работы вращающихся распылителей жидкости в потоке ([5]), распределения капель для реального МК в закрытом пространстве ([6]) и т.д. К сожалению, физическое моделирование достаточно затратно и не позволяет системно описать обработки БВС, однако дает возможность решать узкоспециальные

задачи, результаты которых могут быть использованы в т.ч. и для компьютерного моделирования внесения веществ.

В части компьютерного моделирования авиационного внесения веществ до настоящего времени использовались в основном упрощенные подходы описания индуктивного следа пилотируемых воздушных судов и движения частиц вещества в нем, которые могут быть адаптированы и для БВС ([7]). За рубежом в последние годы в этом направлении был выполнен ряд работ, базирующихся на использовании более мощных и точных специальных сеточных методов решения полной системы уравнений Навье-Стокса для моделирования некоторых элементов внесения БВС рабочих веществ, например, описания поля скоростей МК в их ближнем следе ([8]) и динамики движения облака распыленных с БВС частиц ([9]), которые, однако, не дают возможности полномасштабного моделирования внесения БВС веществ для решения практических задач обеспечения их внедрения в массовое сельскохозяйственное производство

В России, в частности, в НПК «ПАНХ», к настоящему времени сформирован обширный задел по компьютерному моделированию внесения веществ и обработок сельхозугодий с использованием различных видов пилотируемой ([10]) и беспилотной (например, [11]) авиационной техники, который может быть использован для решения актуальных научно-практических задач, в т.ч. в рамках принятой «Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» ([12]).

### **Основная часть**

Имеющийся научно-технический задел в процессе исследований был реализован посредством разработки и практической апробации расчетно-программного комплекса моделирования процессов и показателей внесения БВС вертолетного типа рабочих жидкостей (опрыскивания). Исходными данными комплекса являются характеристики БВС и системы опрыскивания, показатели участка (покрытие, уклоны), внешние условия (параметры атмосферы, включая скорость и направление ветра и стратификацию приземного слоя), свойства рабочих жидкостей (состав, физико-химические параметры компонентов), данные выпуска и диспергирования жидкости и технологические параметры опрыскивания (норма внесения, схема настройки, рабочая скорость и высота полета). Использование комплекса позволяет для принятых параметров выполнить компьютерное моделирование полета БВС и его индуктивного следа, осаждения в нем выпущенного полидисперсного



капельного облака и формирования волны осаждения рабочей жидкости на обрабатываемую поверхность, выполнение обработки участка с определением системы показателей разного уровня, описывающих данные процессы.

Апробация расчетно-программного комплекса на примере ряда отечественных и зарубежных БВС подтвердила приемлемую достоверность, адекватность и точность результатов компьютерного моделирования в сравнении с экспериментальными данными, что позволяет использовать разработанный комплекс для решения широкого перечня научно-практических задач.

Важнейшей научно-практической задачей обеспечения внедрения БВС в сельскохозяйственное производство в настоящее время является формирование регламентов внесения ими препаратов, обеспечивающих эффективное и безопасное проведение авиационных работ (обработок) соответствующих культур.

На сегодняшний день для решения этой задачи выполняются десятки трудоемких и дорогостоящих многовариантных экспериментальных работ по определению в разных условиях влияния на показатели внесения и эффективность обработок различных сочетаний технологических параметров опрыскивания. Разработанный комплекс позволяет оперативно и с меньшими затратами решать такие задачи и расширить границы и глубину соответствующего анализа.

Для оценки влияния параметров и условий обработки БВС на показатели опрыскивания и обработки сельскохозяйственных культур с использованием разработанного комплекса были проведены многовариантные расчеты опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20 с полетной массой 42 кг горизонтальных участков водным раствором типовых пестицидов с нормой их внесения 1 л/га при рабочей ширине захвата 6 м при характерном для этого МК варьировании рабочей скорости ( $V_p$ ) и высоты ( $H_p$ ) полета, нормы внесения рабочей жидкости ( $H_{вн}$ ) и степени ее начального диспергирования (медианно-объемный диаметр капель  $D_m$ ) используемыми при этом форсунками типа Tee Jet XR 110 с учетом взаимосвязей их расходных и дисперсных характеристик, условий стратификации приземного слоя атмосферы (параметр Тернера  $P_T$ ) и боковой составляющей ветра ( $W_{2z}$ ) в нем и некоторых других параметров.

Для полученных при компьютерном моделировании данных был проведен корреляционный анализ связей параметров и показателей опрыскивания, некоторые результаты которого (парные коэффициенты

корреляции  $r_{xy}$ ) для указанных выше параметров с отдельными показателями (размах волны осаджения  $Z_{go}$ , степень осаджения выпущенных капель ( $K_k$ ) и объема препарата ( $K_p$ ), средняя дозировка препарата ( $C_{cp}$ ) и плотность покрытия каплями ( $N_{cp}$ ) при сплошной обработке и их коэффициенты вариации ( $K_{vc}$  и  $K_{vp}$ ), расчетная биологическая эффективность внесения рабочей жидкости для обработки гербицидами пшеницы ( $P_{эф}^{гм}$ ) и риса ( $P_{эф}^{гп}$ ), фунгицидом риса ( $P_{эф}^{фп}$ ), а также средняя экономическая эффективность указанной обработки фунгицидом ( $K_{эф}^{фп}$ ) с соответствующими диапазонами изменчивости представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты парной корреляции параметров и расчетных показателей опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20

Параметры / показатели	$V_p$ (5–7 м/с)	$H_p$ (3–5 м)	$H_{вн}$ (5 – 20 л/га)	$D_m$ (170-250 мкм)	$P_T$ (0,2–5,8)	$W_{2z}$ (0–2 м/с)
Показатели волны осаджения						
$Z_{go}$ (34 - 48 м)	-0,331	0,170	0,019	-0,263	-0,763	0,636
$K_k$ (9,6 – 34,4 %)	-0,485	-0,301	0,202	0,093	0,223	-0,507
$K_p$ (70,5 – 96,3 %)	-0,083	-0,051	0,160	0,174	0,162	-0,619
Показатели сплошной обработки						
$C_{cp}$ (765-922 мл/га)	0,025	-0,065	0,127	0,282	0,193	-0,578
$N_{cp}$ (7,3 – 86,2 см <sup>2</sup> )	-0,537	-0,060	0,859	-0,429	0,320	-0,328
$K_{vp}$ (8,6 – 98,1 %)	0,835	0,093	-0,293	0,601	0,445	-0,219
$K_{vc}$ (7,8 – 46,2 %)	0,701	0,133	-0,184	0,386	0,382	0,186
Показатели эффективности обработки						
$P_{эф}^{гм}$ (0,2879 – 0,9992)	-0,876	-0,245	0,470	-0,553	0,180	-0,309
$P_{эф}^{гп}$ (0,2467 – 0,9992)	-0,728	-0,137	0,518	-0,491	0,264	-0,496
$P_{эф}^{фп}$ (0,2401 – 0,9901)	-0,611	-0,055	0,620	-0,466	0,321	-0,495
$K_{эф}^{фп}$ (1,238 – 4,803)	-0,575	-0,007	0,474	-0,457	0,240	-0,432

Из таблицы, в частности, можно отметить:

- ни один из параметров внесения не определяет однозначно рассмотренные целевые показатели опрыскивания БВС (в среднем  $|r_{xy}| \approx 0,35$ ), т.е. такие показатели являются многофакторными и обусловлены комплексом параметров;

- рост рабочих скоростей и высот полета МК в рассмотренном диапазоне их вариаций в целом ухудшает качественные показатели сплошной обработки (уменьшение средних и равномерности внесения) и ее эффективности на характерных видах работ ( $r_{xy} < 0$ );

- увеличение норм опрыскивания  $N_{вн}$  до 20 л/га, напротив, благотворно и серьезно сказывается на целевых показателях качества и эффективности обработок, не смотря на некоторое снижение их производительности для больших норм внесения;

- укрупнение выпуска жидкости ( $D_M$ ) для небольших норм внесения МК положительно сказывается на объеме осевших на участок веществ и негативно на плотность капель при падении равномерности внесения, что отрицательно влияет на эффективность обработок;

- рост параметра  $P_T$  (устойчивости приземного слоя) благоприятно сказывается на степени осадения капель и объемов препарата при некотором ухудшении равномерности их внесения и в целом повышает расчетную эффективность рассмотренных видов обработок БВС;

- усиление бокового ветра  $W_{2Z}$  приводит к росту поперечного размаха волны осадения жидкостей с БВС при перераспределении параметров ее эпюры и в конечном итоге отрицательно влияет на эффективность обработок, что требует использования ограничений по этому параметру.

Характеризуя многофакторность процессов и показателей авиационного внесения веществ БВС для полученного при моделировании массива данных дополнительно был выполнен его регрессионный анализ для принятых выше факторов с построением множественных степенных регрессий вида  $Y_i = A_i \prod_{j=1}^{j=n} X_j^{B_{ij}}$ .

Параметры  $A_i$  и  $B_{ij}$  некоторых выявленных при этом регрессий оценки показателей опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20 и их статистической значимости (коэффициент детерминации  $R^2$  и критерий Фишера  $F_{6/15}$ ) для примера показаны в табл. 2, где фактор  $W_{2Z}$  с учетом физической природы процесса заменен на комбинацию  $1+|W_{2Z}|$ .

Таблица 2

Параметры множественных степенных регрессий оценки отдельные показатели опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20

Показатель $Y_i$	$A_i$	Факторы $X_j$						$R^2/F_{6/15}$
		Vp	Hp	Hвн	Дм	Pт	1+ W <sub>z</sub> z	
Zgo, м	39,36	-0,405	0,210	-0,004	0,081	-0,045	0,166	0,892 / 20,68
Kk, %	0,59	-2,550	-0,117	-0,016	1,508	0,039	-0,769	0,910 / 25,18
Ncp, см <sup>-2</sup>	4025,90	-2,419	-0,008	0,964	-0,555	0,066	-0,693	0,955 / 52,59
Kvn, %	0,0017	3,416	-0,607	-0,149	0,937	0,492	0,054	0,914 / 26,68
$P_{эф}^{фр}$	20,30	-1,996	-0,011	0,527	-0,240	0,031	-0,880	0,929 / 32,68
$K_{эф}^{фр}$	114,58	-1,963	-0,025	0,439	-0,238	0,029	-0,881	0,915 / 26,92

Из представленных данных можно отметить высокую статистическую значимость полученных многопараметрических регрессий ( $F_{6/15} \gg F_{табл}=2,79$  для значимости 0,05), которые для 6 характерных параметров описывают примерно 90 % изменчивости оцениваемых показателей и могут быть использованы для решения практических задач, например, выбора параметров и ограничений обработок с применением БВС. Значения степеней выявленных регрессий не противоречат сделанным ранее выводам о качественном влиянии отдельных параметров опрыскивания на его целевые показатели, при этом данные выражения позволяют уточнить количественные аспекты такого влияния.

В частности, увеличение в сопоставимых условиях рабочей скорости на 1 м/с с целью повышения производительности и снижения себестоимости обработок МК примерно на 5 % приводит к падению уровня осаждения капель фунгицида и его неравномерности, что в комплексе более чем на 25 % уменьшает ожидаемую биологическую и экономическую эффективность обработки, т.е. локальный рост производительности может вызвать ухудшение целевых показателей обработки.

В свою очередь, повышение нормы внесения, например, с 10 до 20 л/га, уменьшает производительность на ~30 %, однако существенное улучшение при этом качественных показателей внесения и распределения фунгицида определяет в конечном итоге рост расчетной эффективности такой обработки на 35 %, который, впрочем, может быть уменьшен примерно на 5 % использованием для обеспечения большего выпуска форсунок следующей ступени принятого типоразмерного ряда (рост Дм на 30 мкм).

Эти обстоятельства определяют высокую значимость выбора системы технологических параметров внесения при формировании регламента применения препаратов для соответствующих обработок. Примечательно также, что время выполнения обработок с рациональными параметрами внесения оказывает существенное влияние на их эффективность, например, эффективность дневных обработок риса фунгицидом (сильная неустойчивость атмосферы при  $P_T = 0,2$ ) может быть ниже утренней и вечерней (нейтральная стратификация,  $P_T \approx 2,5$ ) примерно на 7 %, а ночных (сильная устойчивость) - наоборот выше их на 2 %.

### **Выводы**

Полученные с использованием результатов компьютерного моделирования защитного опрыскивания характерного МК общие и частные качественные и количественные соотношения между параметрами и целевыми показателями внесения и обработок совместно с выделенными при этом коэффициентами корреляции и множественных степенных регрессий позволяют более объективно формировать базовые регламенты авиационного применения пестицидов с использованием разных типоразмеров БВС вертолетного типа и выполнять их корректировку в зависимости от условий выполнения различных защитных обработок в сельскохозяйственном производстве.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Del Cerro J, Cruz Ulloa C, Barrientos A, et al.* Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. *Agronomy*. 2021; 11(2): 203. DOI: 10.3390/agronomy11020203.
2. *Chen H B, Lan Y B, Fritz B K, Hoffmann W C, Liu S B.* Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). *Int J Agric & Biol Eng*, 2021; 14(1): 38–49. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211401.5714
3. State of the Knowledge Literature Review on Unmanned Aerial Spray Systems in Agri-culture. OECD Working Party on Pesticides (WPP), OECD Drone Sub-Group Bonds Consulting Group LLC, Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority. June 2021. - 34.
4. *Liu X, Zhang W, Fu H B, Fu X M, Qi L Q.* Distribution regularity of downwash airflow under rotors of agricultural UAV for plant protection. *Int J Agric & Biol Eng*, 2021;14(3):46–57. DOI:10.25165/j.ijabe.20211403.4036.
5. *Zhu H, Jiang Y, Li H Z, Li J X, Zhang H H.* Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV. *Int J Precis Agric Aviat*, 2019; 2(1): 18–25. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20190201.0025

6. Hanif AS, Han X, Yu S-H, Han C, Baek SW, Lee C-G, Lee D-Hand Kang YH (2023) Modeling of the control logic of a UASS based on coefficient of variation spraying distribution analysis in an indoor flight simulator. *Front. Plant Sci.* 14:1235548. DOI: 10.3389/fpls.2023.1235548

7. Teske M.E., D.A. Wachspress, Thistle H.W. Prediction of Aerial Spray Release from UAVs. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018, Vol. 61(3): 909-918. <https://doi.org/10.13031/trans.12701>

8. Zhang H Y, Lan Y B, Shen N W, Wu J Y, Wang T, Han J, Wen S. Numerical analysis of downwash flow field from quad-rotor unmanned aerial vehicles. *Int J Precis Agric Aviat*, 2020; 3(4): 1–7. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200304.138

9. Zhang R R, Chen L P, Wen Y, Tang Q, Li L L. Key technologies for testing and analyzing aerial spray deposition and drift: A comprehensive review. *Int J Precis Agric Aviat*, 2020; 3(2): 13–27. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.80

10. Асовский В.П. Теория и практика авиационного распределения веществ. - М.: Воздушный транспорт, 2008. - 580 с.

11. Асовский В.П., Кузьменко А.С. Особенности опрыскивания с использованием беспилотных воздушных судов вертолетного типа // Защита и карантин растений. 2019. № 5. С. 40-44.

12. Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года, утв. Распоряжением Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р.

**Асовский Валерий Павлович**, доктор технических наук, ученый секретарь НПК «ПАНХ», Россия, город Краснодар, ул. Кирова 138, 350000, e-mail: [vasov63@mail.ru](mailto:vasov63@mail.ru).

**Кузьменко Алла Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры летательных аппаратов Южного федерального университета, 347900 Россия, город Таганрог, переулок Тургеневский, 44, e-mail: [akuzm@sfedu.ru](mailto:akuzm@sfedu.ru).

**Asovsky Valery Pavlovich**, Doctor of Technical Sciences, scientific secretary of NPK «PANH», 350000, Russia, Krasnodar, 138 Kirova Str., e-mail: [vasov63@mail.ru](mailto:vasov63@mail.ru).

**Kuzmenko Alla Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Aircraft of Radio Engineering Southern Federal University, 347900, Russia, Taganrog, trans. Turgenevsky, 44, e-mail: [akuzm@sfedu.ru](mailto:akuzm@sfedu.ru).

УДК 629.735.015

Асовский Валерий Павлович, Кузьменко Алла Сергеевна,  
Асовский Алексей Валериевич

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СНОСА  
ПРИ ОПРЫСКИВАНИИ БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ  
СУДАМИ НА БАЗЕ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАССЕЯНИЯ  
ВЕЩЕСТВ**

*Показана актуальность оценки сноса при опрыскивании сельскохозяйственных угодий с применением беспилотных воздушных судов, рассмотрены особенности и существующие методики оценки сноса загрязняющих веществ, предложены программные средства для расчетно-теоретических оценок сноса на базе локальной модели рассеяния при опрыскивании беспилотными воздушными судами вертолетного типа, представлены отдельные результаты оценки сноса препаратов при защитном опрыскивании гексакоптером типа DJI Agras T20 в ожидаемых условиях выполнения авиационных работ, сделаны выводы по влиянию на показатели сноса значимых факторов проведения обработок сельскохозяйственных культур и рекомендации по использованию полученных результатов.*

*Беспилотное воздушное судно (БВС), опрыскивание, снос капель, локальная модель, параметры внесения, плотность выпадения препарата.*

Asovsky Valery Pavlovich, Kuzmenko Alla Sergeevna,  
Asovsky Alexey Valeryevich

**CALCULATION AND THEORETICAL ASSESSMENT OF  
DEMOLITION WHEN SPRAYING BY UNMANNED AIRCRAFT BASED  
ON A LOCAL SUBSTANCE DISPERSION MODEL**

*The article shows the relevance of assessing drift when spraying agricultural land using unmanned aerial vehicles. The features and existing methods for assessing the drift of pollutants are considered, software tools are proposed for theoretical and theoretical assessments of drift based on a local model of dispersion during spraying by helicopter-type unmanned aerial vehicles. Separate results of assessing the drift of preparations during protective spraying with a DJI Agras T20 hexacopter under the expected conditions of aerial work are presented. Conclusions were drawn on the influence of significant factors of crop treatment on the drift indicators and recommendations on the use of the results obtained.*

*Unmanned aircraft (UAV), spraying, droplet drift, local model, application parameters, drug deposition density*

## **Введение**

Снос как явление неуправляемого переноса внесенных при обработке рабочих жидкостей за пределы обрабатываемого участка является важной и значимой проблемой обеспечения эффективности и экологической безопасности процессов химизации сельского и лесного хозяйства ([1-3 и др.]). Особую остроту и злободневность оценка сноса приобретает применительно к новым агротехническим приемам, одним из которых является защитное опрыскивание с применением беспилотных воздушных судов (БВС), прежде всего вертолетного типа.

Применительно к любому агротехническому приему опрыскивания заданным препаратом с соответствующей нормой внесения рабочей жидкости и дозировкой препарата к наиболее существенным показателям сноса относятся удаление переноса опасных веществ от обрабатываемого участка и их распределение в зоне оседания в условиях проведения обработки. Эти показатели, как показывает анализ, определяются, в частности, физико-химическими свойствами вносимого вещества, начальными параметрами выпуска и дисперсным составом частиц вещества, состоянием приземного слоя атмосферы и другими факторами. В этой связи можно отметить, что снос является сложным многофакторным процессом, описание которого обусловлено необходимостью определения и оперирования множества разнообразных исходных параметров, что, с одной стороны, чрезвычайно затрудняет процедуру показателей сноса, и, с другой, повышает неопределенность оцениваемых показателей.

Снос капель рабочей жидкости при выполнении опрыскивания по своей сути является одной из разновидностей процессов распространения (дрейфа) в приземном слое атмосферы (ПСА) и выпадения на подстилающую поверхность мелкодисперсных частиц различных загрязняющих (представляющих опасность) твердых и жидких веществ. Ввиду многообразия и важности этих процессов для состояния окружающей среды к настоящему времени у нас в стране и за рубежом разработаны разнообразные методики оценки показателей этих процессов, преимущественно для отравляющих, радиоактивных и других особо опасных загрязняющих веществ ([4-8 и др.]). В основе этих методик лежит методический подход представления дрейфа и выпадения частиц в виде случайного гауссовского процесса с



учетом в его детерминированной части известных значимых факторов и вероятностных параметров рассеяния частиц в процессе их движения.

В рамках настоящей работы в качестве основы для проведения оценок была использована «Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах» ([7]). Представленная в ней локальная модель рассеивания частиц позволяет для стационарных горизонтально-однородных метеоусловий оценить показатели сноса, включая плотность выпадения вещества частиц на подстилающую поверхность, на удалениях от их источника до 10 км при высоте выбросов частиц до 150 м. Достоинствами этой методики, в частности, являются возможность широкого варьирования значимых факторов ( дисперсность частиц, высота и мощность их выпуска за единицу времени, состояние ПСА и т.д.), использование в ней значительного объема экспериментальных данных и эмпирических выражений, описывающих внутренние и внешние связи процесса сноса, возможность проведения специальных расчетов , например, по размерам частиц, с последующим интегрированием по всему диапазону изменений, а также ориентированность модели на ее программную реализацию.

В процессе исследований применительно к опрыскиванию БВС сельскохозяйственных культур была выполнена адаптация изложенной в [7] последовательности и математических моделей проведения оценок, сформирован и апробирован программный код расчетов по определению плотности выпадения пестицида на подстилающую поверхность ( $\text{мл}/\text{м}^2$ ) в зависимости от удаления зоны выпуска жидкости в заданных условиях обработок. Отдельные результаты проведенных с использованием этого кода оценок сноса пестицидов представлены ниже.

### **Основная часть**

Исходные данные для проведения расчетно-теоретических оценок сноса по локальной модели рассеяния при опрыскивании БВС, прежде всего мощности и высоты выпуска препаратов, в процессе исследований формировались на базе принятых технологических параметров и внешних условий обработок для заданного БВС с использованием данных анализа результатов моделирования процессов осаждения капель рабочей жидкости разных фракций. Как показали выполненные ранее исследования ([1-3, 9, 10 и др.]), при опрыскивании сносу и потерям подвержены в основном капли с начальным размером (диаметром) до 80-100 мкм, в связи с чем для проведения оценок использовался дискретный ряд размерностей капель рабочей

жидкости в указанных пределах с приведением к ним данных «прилежащих» диапазонов из спектра выпущенных форсунками БВС капель.

На рис. 1 для примера использования сформированного в работе программного кода показаны расчетные величины приведенной плотности выпадения препарата капель размером 15, 25 и 35 мкм при выполнении гексакоптером DJI Agras T20 обработки полевых культур с нормой внесения рабочей жидкости (водный 10 % раствор «среднего» пестицида ([2])) 10 л/га (по пестициду – 1 л/га ( $0,1 \text{ мл/м}^2$ )) на скорости 5 м/с и высоте 3 м при ширине захвата 6 м (используются 4 штатные форсунки типа TeeJet XR110-01 с общим выпуском жидкости 1,8 л/мин. (30 мл/с) с ее диспергированием, соответствующем медианно-объемному диаметру (МОД) 190 мкм) в утреннее время (7.00) летнего периода (начало июня) при небольшой облачности ( 2 балла) и ветре 1 м/с (слабая неустойчивость, категория С (параметр Тернера  $P_T = 2,27$ )).

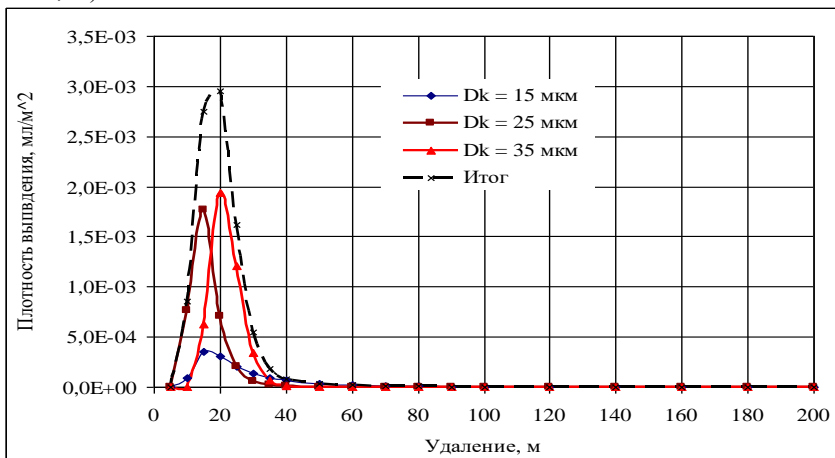


Рис. 1. Расчетная приведенная плотность выпадения капель препарата с характерными размерами при выполнении гексакоптером обработки с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 3 м в условиях слабой неустойчивости и ветре 1 м/с

Как видно из этого графика, при единичном пролете БВС в заданных условиях наибольший осадок при сносе капель рабочей жидкости наблюдается в непосредственной близости от линии пролета (10 – 40 м), при этом максимальная приведенная плотность препарата для сносимых капель разных фракций пропорциональна мощности их выпуска. В свою очередь, при сносе более крупные и менее летучие капли препарата выпадают на

поверхности более плотно и концентрировано, а мелкие характеризуются более «размытым» характером выпадения и повышенными значениями дрейфа (сноса). Примечательно, для рассмотренного пролета уровень загрязнения существенно падает даже при небольших удалениях от линии пролета и составляет 10, 1 и 0,1 % от максимальной итоговой плотности, составляющей около 3 % от требуемой на участке дозировки препарата ( $X_w = 20$  м), при  $X_w$  соответственно примерно 30, 50 и 110 м. Важнейшим и достаточно очевидным фактором, влияющим на снос мелкодисперсных частиц, является скорость ветра. Для оценки влияния этого фактора на показатели сноса препарата на рис. 2 показаны интегральные по размерам капель приведенные плотности выпадения препарата для указанного выше режима в условиях слабой неустойчивости атмосферы для скоростей ветра 1, 2 и 4 м/с.

Из представленных на графике данных можно, в частности, отметить:

- рост скорости ветра при опрыскивании БВС при прочих равных условиях приводит к более сильному растягиванию капель в направлении ветра и уменьшению при этом максимальных величин плотности выпадения препарата (при скоростях ветра 2 и 4 м/с примерно в 1,4 и 2,1 раза в сравнении со слабым ветром 1 м/с);

- эффект растягивания при сносе капель при усилении ветра проявляется также в увеличении удалений от линии пролета выпадения вещества с одинаковой плотностью, в частности, плотности осадка на уровне 0,1 и 0,01 % заданной для обработки дозировки препарата (0,1 мл/м<sup>2</sup>) при скоростях ветра 1, 2 и 4 м/с достигаются соответственно на удалениях примерно 38, 55 и 75 м и 75, 140 и 230 м, т.е., несмотря на более низкие локальные максимумы плотности выпадения препарата, при усилении ветра наблюдается рост удалений от линии пролета зон с сопоставимыми абсолютными величинами плотностей осадка.

На параметры сноса препаратов в заданных внешних условиях определенное влияние оказывают и технологические параметры авиаопрыскивания, такие как рабочая высота полета, норма внесения рабочей жидкости и концентрация препарата в ней, дисперсный состав вносимой жидкости и т.д.

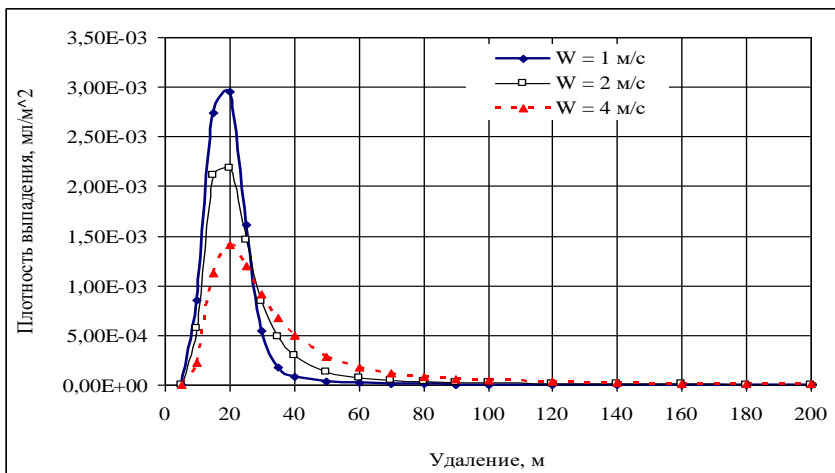


Рис. 2. Расчетная приведенная плотность выпадения мелкодисперсных капель препарата при выполнении БВС обработки с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 3 м в условиях слабой неустойчивости при разной скорости ветра

Влияние рабочей высоты на показатели сноса для базового варианта опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20 в условиях слабой неустойчивости ПСА и ветре 2 м/с иллюстрирует рис. 3.

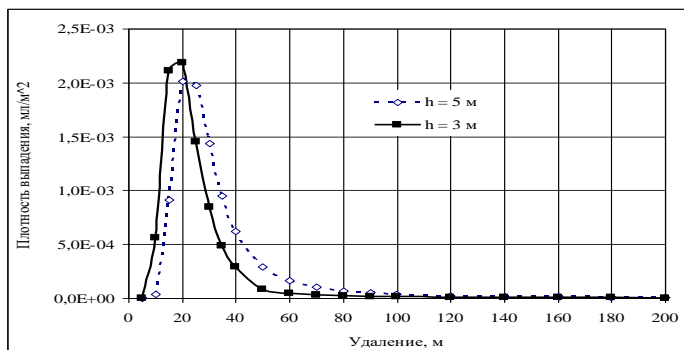


Рис. 3 - Расчетная приведенная плотность выпадения мелкодисперсных капель препарата при выполнении гексакоптером обработки с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с в условиях слабой неустойчивости при ветре 2 м/с для разных высот внесения

Как видно из этого рисунка, изменение высоты полета БВС не оказывает принципиального влияния на показатели сноса пестицида, однако

уменьшение высоты полета с 5 до 3 м приводит к более компактному выпадению препарата направлению ветра и некоторому уменьшению пороговых для заданного уровня плотности осадка удалений от линии пролета, например, для  $q_{пр}$  на уровне  $10^{-4}$  и  $10^{-5}$  мл/м<sup>2</sup> соответственно с 70 до 45 м и со 175 до 115 м, т.е. примерно на 30 %.

Современные БВС для внесения веществ в сельском хозяйстве имеют важную опцию, связанную с возможностью проведения работ в ночное время. В этой связи представляет интерес показатели сноса в разное время суток. Для этого были рассмотрены характерные варианты выполнения обработок в летний период (июнь) в условиях Южного федерального округа при характерных метеопараметрах:

- утром (7.00) – при слабой неустойчивости ПСА (класс С,  $R_t = 2,27$ ) при температуре 20°C и ветре 2 м/с;
- днем (14.00) – при умеренной неустойчивости (класс В,  $R_t = 1,96$ ) при температуре 25°C и ветре 4 м/с;
- ночью (2.00) – при умеренной устойчивости (класс F,  $R_t = 5,33$ ) при температуре 15°C и ветре 1 м/с;

Для этих вариантов на рис. 5 показаны приведенные плотност выпадения препарата при опрыскивании БВС с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 3 м.

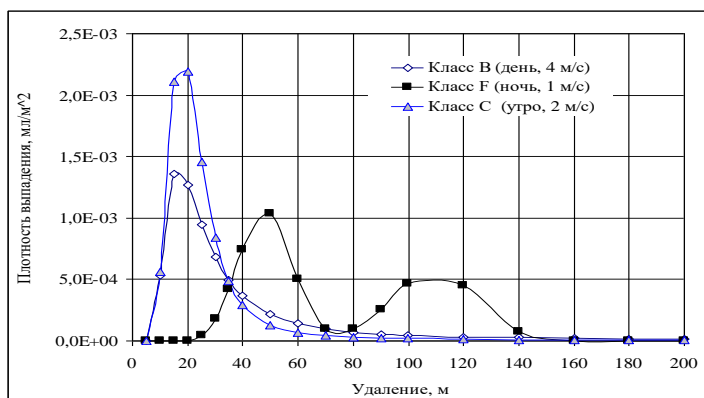


Рис. 4. Расчетная приведенная плотность выпадения капель препарата для обработки гексакоптером с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 3 м в различных условиях стратификации приземного слоя атмосферы

Из представленных сравнительных данных можно выделить следующее:

- утренняя обработка (класс С) при небольшом ветре отличается наивысшим уровнем максимальной плотности выпадения пестицида примерно в 20 м от линии пролета БВС и компактным характером распределения осадка с превышением уровня, например, 0,1 % от заданной дозировки на участке на удалении до 55 м с последующим постепенным уменьшением плотности осадка при увеличении  $Xw$ ;

- дневная обработка (класс В) при сильном ветре отражает отмеченные ранее особенности влияние скорости ветра и характеризуется уменьшением величины максимума плотности выпадения препарата относительно утренней обработки при его сопоставимом положении ( $Xw \approx 15$  м) и более объемным осадком по мере смещения капель от линии пролета с пороговым удалением отмеченного выше уровня около 75 м при снижении плотности выпадения для больших удалений;

- ночная обработка (класс F) при слабом ветре по показателям сноса существенно отличается от предыдущих вариантов, что обусловлено наличием на эпюре распределения плотности осадка двух локальных максимумов плотности, «сдвинутых» по направлению ветра соответственно на 50 и 100 м от линии пролета, при их более низких абсолютных величинах в сравнении с другими вариантами и практически полного отсутствия выпадения препарата на удалении от источника более 200 м (расчетные  $q_{пр}$  менее  $10^{-12}$  мл/м<sup>2</sup>, для вариантов утренней и дневной обработок на уровне соответственно менее  $10^{-6}$  и  $10^{-5}$  мл/м<sup>2</sup>).

С учетом представленных замечаний следует отметить, что широко распространенное в настоящее время мнения об полном или практическом отсутствии сноса при выполнении БВС защитного опрыскивания в ночное время не соответствует действительности, поскольку для этого варианта снос исчезающее мал на значительных удалении от линии пролета (200 м и более), в то время как на меньших удалении значимое выпадение препарата имеет место.

Полученные плотности выпадения препарата при единичном пролете БВС позволяют оценить качественные и количественные особенности сноса мелкодисперсных капель рабочей жидкости при выполнении опрыскивания, однако не отражают общий уровень загрязнения в результате сноса на примыкающие к участку обработки зоны при выполнении последовательных проходов БВС над участком.

Эти показатели оценивались посредством моделирования сплошной обработки БВС заданного участка и наложением на примыкающую к нему зону «хвостов» соответствующих эпюр для каждого последующего прохода.

На рис. 5 для примера представлены расчетные данные интегральной приведенной плотности выпадения капель препарата на участок и за его пределы при выполнении БВС различного количества  $N$  проходов над участком при его обработке с нормой 10 л/га и шириной захвата 6 м в условиях слабой неустойчивости (утро) и боковом ветре 2 м/с для рабочей высоты 3 м.

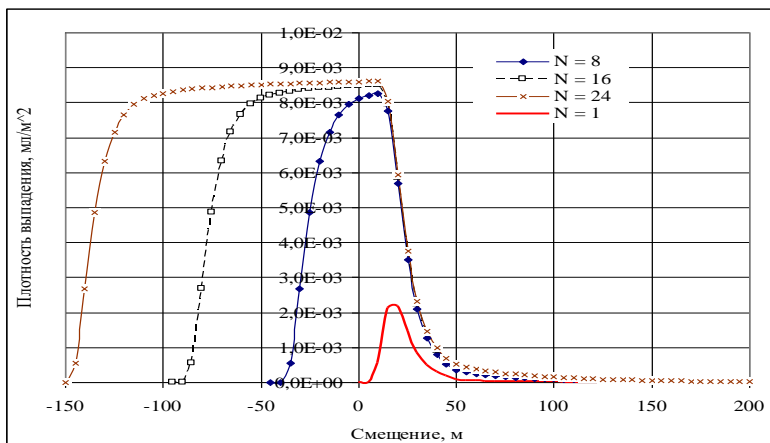


Рис. 5. Интегральная приведенная плотность выпадения капель препарата при выполнении БВС проходов при типовой обработке с нормой 10 л/га на рабочей высоте 3 м в условиях слабой неустойчивости и боковом ветре 2 м/с

Сравнение полученных данных позволяет выделить ряд важных обстоятельств реализации и последствий сноса препаратов при производстве обработок:

- общее распределение плотности выпадения капель препаратов при обработке участка как совокупности наложения эпюр единичных проходов БВС существенным образом отличается от соответствующих базовых единичных эпюр и зависит от ширины обрабатываемого участка (количества проходов (гонов)  $N$ );

- максимальная приведенная плотность выпадения препарата в зоне сноса при обработке БВС участков наблюдается в пределах 20 м от границы

участка и в 3,5-5 раз превосходит соответствующие величины для единичных проходов и растет при увеличении количества гонов (проходов) при обработке;

- при удалениях от границы обрабатываемого участка более 50 м плотность выпадения препарата при обработках может на порядок (до 10-12 раз) превосходить показатели для единичных проходов БВС с увеличением такого превышения при росте числа проходов при обработке;

- с учетом роста интегральных приведенных плотностей выпадения препарата при производственных обработках в сравнении с единичными проходами пороговые границы сноса для фиксированных значений плотности осадка существенно расширяются, в частности, для уровня осадения  $10^{-4}$  мл/м<sup>2</sup> (0,1 % от заданной дозировки препарата на участке) с 45 до 120 м для рабочей высоты полета 3 м и с 70 до 160 м соответственно для высоты 5 м (примерно в 2,5 раза);

- для рассмотренных выше средних условий выполнения гексакоптером DJI Agras T20 защитного опрыскивания с нормой внесения 10 л/га и дозировкой препарата 1 л/га в качестве ориентира опасного сноса препаратов на уровне 1 % от заданной дозировки препарата можно определить расстояние в пределах 40-60 м;

- при производстве обработок БВС суммарная доля выпавших за пределами участка подверженного сносу при единичных пролетах объема препаратов для рабочей высоты полета 3 (5) м при увеличении числа пролетов (гонов) с 8 до 24 снижается с 38 (52) до примерно 13 (19) %,

т.е. для разных вариантов примерно 62 – 87 % потенциально опасных с точки зрения сноса объемов препарата в мелкодисперсных каплях фактически «возвращаются» на участок, выравнивая тем самым плотность покрытия объектов обработки каплями и внесенную на них дозировку препарата.

### **Выводы**

На основании проведенных на базе локальной модели рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере расчетно-теоретических оценок показателей сноса пестицидов при опрыскивании БВС на примере гексакоптера DJI Agras T20 сформирован и апробирован программно-методический инструментарий для соответствующих оценок и получен достаточный массив расчетных данных и качественных теоретических закономерностей для разработки технологических инструкций по применению БВС вертолетного типа для производства авиационных работ по защитному опрыскиванию полевых культур.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техника и технология безопасного применения средств защиты растений: Лекции курсов по контролю за качеством применения пестицидов. - Госагропром СССР: Сибга-Гейга АГ, 1989.
2. Технические средства и технологические особенности применения гербицидов и арборицидов на объектах несельскохозяйственного пользования: Научно-практическое руководство. - М.: РАСХН-ГНУ ВНИИФ, 2009. — 68 с.
3. Опрыскивание от А до Я. 3-е изд. «Теория и практика опрыскивания». Lechler GmbH, Метцинген, Германия. 2020. - 80 с.
4. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369-74. – М.: Стройиздат (Госстрой СССР), 1975 - 40 с.
5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, ОНД-86.-Л.: Гидрометеоздат, 1986.-94 с.
6. Методика определения площади зоны защитных мероприятий, устанавливаемой вокруг объектов по хранению химического оружия и объектов по уничтожению химического оружия. Утв. Министерством обороны Российской Федерации 26.03.1999 г.
7. Методика расчета рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. Руководящий документ РД 52.18.717-2009. – Обнинск: ООО «Принт-Сервис», 2009. –113 с.
8. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Утв. Приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273. – 79 с.
9. *Асовский В.П.* Теория и практика авиационного распределения веществ. - М.: Воздушный транспорт, 2008. - 580 с.
10. *Robert N. Klein.* Spray Drift Management. / Proceeding of the 2007 CPM Shot Course and MCPR Trade Show – Minneapolis Convention Center. 04-06.2007.

**Асовский Валерий Павлович**, доктор технических наук, ученый секретарь НПК «ПАНХ», Россия, город Краснодар, ул. Кирова 138, 350000, e-mail: [vasov63@mail.ru](mailto:vasov63@mail.ru).

**Кузьменко Алла Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры летательных аппаратов Южного федерального университета, 347900 Россия, город Таганрог, переулок Тургеневский, 44, e-mail: [akuzm@sfedu.ru](mailto:akuzm@sfedu.ru).

**Асовский Алексей Валериевич**, инженер-программист НПК «ПАНХ», Россия, город Краснодар, ул. Кирова 138, 350000, e-mail: [asoval@mail.ru](mailto:asoval@mail.ru).

**Asovsky Valery Pavlovich**, Doctor of Technical Sciences, scientific secretary of NPK «PANH», 350000, Russia, Krasnodar, 138 Kirova Str., e-mail: [vasov63@mail.ru](mailto:vasov63@mail.ru).

**Kuzmenko Alla Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Aircraft of Radio Engineering Southern Federal University, 347900, Russia, Taganrog, trans. Turgenevsky, 44, phone: +7 (8634) 37-16-97, e-mail: [akuzm@sfnedu.ru](mailto:akuzm@sfnedu.ru).

**Asovsky Aleksey Valerievich**, Software engineer of NPK «ПАНХ», 350000, Russia, Krasnodar, 138 Kirova Str., e-mail: [asoval@mail.ru](mailto:asoval@mail.ru).

УДК.519.876.5

Носраты Мехрдад, Аббасов Ифтихар Балакишиевич

## **ИССЛЕДОВАНИЯ В КОСМОСЕ: ОЦЕНКА МЕСТА ПОСАДКИ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАРСА**

*По мере того, как человечество осваивает космос, планета Марс становится ключевой целью. Выбор правильных посадочных площадок имеет решающее значение для успеха и безопасности миссии. Эта статья посвящена исследованию потенциальной посадочной площадке на Марсе Oxia Planit. Используя данные с высоким разрешением, исследователи изучают особенности рельефа и свойства поверхности Oxia Planit. Передовые методы геоинформационных систем (ГИС), такие как картографирование высот и контурный анализ, проливают свет на его пригодность в качестве посадочной площадки. Исследование выявило различные геологические особенности, включая древние русла рек и ударные кратеры, что создает проблемы, но также открывает научные возможности.*

*Исследование Марса, Oxia Planit, анализ места посадки, геологические особенности, топология поверхности, планирование миссии.*

Nosrati Mehrdad, Iftikhar B. Abbasov

## **EXPLORATORY INSIGHTS IN SPACE: LANDING SITE EVALUATION FOR ADVANCING MARS EXPLORATION**

*As human exploration of space advances, Mars emerges as a key target. Selecting the right landing sites is crucial for mission success and safety. This paper focuses on Oxia Planum, a potential landing area on Mars. Using high-resolution data from NASA, the study examines Oxia Planum's terrain features and surface properties. Advanced Geographic Information System (GIS) techniques, like elevation mapping and contour analysis, shed light on its suitability as a landing site. The research reveals diverse geological features, including ancient riverbeds and impact craters, posing challenges but also offering scientific opportunities.*

*Mars exploration, Oxia Planum, Landing site analysis, Geological features, Surface topology, Mission planning.*

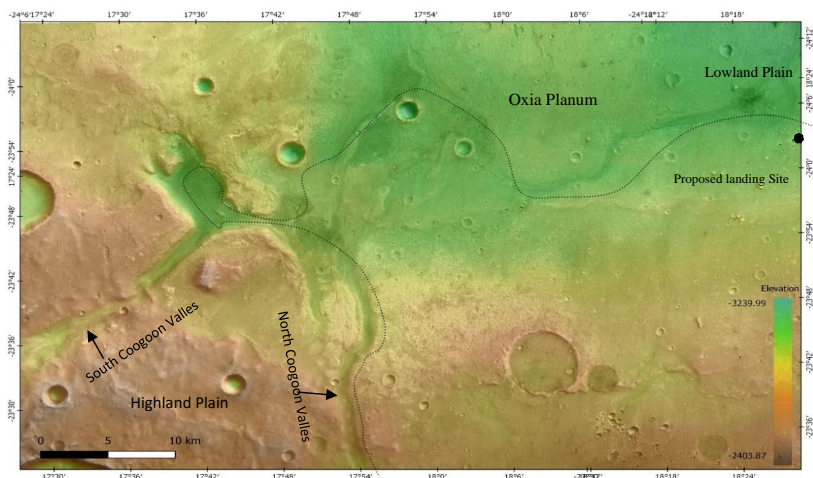
### **Введение**

За последние десятилетия в исследовании Марса были достигнуты значительные успехи, что сделало выбор мест посадки ключевым фактором успеха миссии. В этой статье рассматривается оценка местности Oxia Planum как потенциального места посадки, для анализа которой используются спутниковые данные и цифровые модели рельефа высокого разрешения (DEMs). В нем подчеркивается ценный вклад таких ключевых инструментов, как стереокамера высокого разрешения Mars Express (HRSC) [1], система цветного и стереоизображения поверхности орбитального аппарата Trace Gas Orbiter (CaSSIS) [2], а также контекстная камера (CTX) орбитального аппарата Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) и система получения изображений высокого разрешения Эксперимент (HiRISE) [3] по предоставлению подробных данных о рельефе местности. Цель этого исследования, оценить пригодность Oxia Planum для будущих исследовательских миссий и подчеркнуть важность топографической информации и точных моделей для принятия обоснованных решений.

### **Особенности посадочной площадки**

Для расширяющихся миссий по исследованию Марса поиск подходящих посадочных площадок вышел за рамки простого логистического планирования и стал краеугольным камнем успеха этих миссий в будущем. Одним из мест, которые можно исследовать на Марсе, является регион Oxia Planum. Oxia Planum это Ноахская равнина, расположенная на 18 ° с.ш. и

335 ° восточной долготы, на выходе из системы Coogoon Valles [4]. Oxia Planum является одним из крупнейших участков глинистых пород на Марсе, и благодаря этому с помощью спектроскопии были проанализированы богатые глиной образцы. Эти минералы, идентифицированные как каолиниты, смектиты, богатые алюминием, и смектиты, богатые железом и магнием, имеют решающее значение для понимания ожидаемого геологического строения Марса, особенно в таких регионах, как Oxia Planum [5]. На рис. 1 показаны вид приземления и предполагаемая траектория движения марсохода в районе Oxia Planum.



*Рис. 1. Возможный регион и траектория места посадки марсохода ExoMars Oxia Planum, исходный набор данных. Набор данных мозаики CTX DEM, используемый для обработки QGIS.*

## **Наборы данных и их обработка**

### **1. Сбор данных**

Набор данных, использованный в этом исследовании, был взят из архива данных HiRISE, который предлагает широкий спектр продуктов, включая запись необработанных экспериментальных данных (EDR), запись откалиброванных сокращенных данных (RDR) и цифровые модели местности (DTM), полученные в ходе миссии Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). [6]. Этот набор данных содержит важную информацию для оценки Oxia Planum как потенциального места посадки для будущих миссий на Марс. Снимки с высоким разрешением, полученные HiRISE, позволяют провести детальный

анализ особенностей марсианской поверхности, помогая определить ключевые топографические характеристики, имеющие решающее значение для оценки пригодности места посадки [7]. Кроме того, интеграция передовых технологий визуализации и 3D-моделирования, примером которой является успех марсохода Perseverance, улучшает навигацию космического аппарата во время спуска, что открывает перспективы для будущих миссий на Oxia Planum и за ее пределы [8].

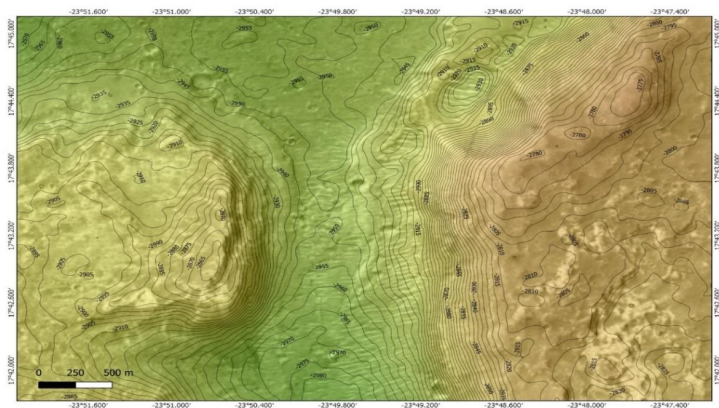
## 2. Анализ географической информационной системы (ГИС)

Анализ географической информационной системы (ГИС) с использованием программного обеспечения квантовой ГИС (QGIS) сыграл ключевую роль в понимании топографии Oxia Planum на Марсе. QGIS упростил такой анализ, как изменение высоты, контурное картирование и оценка уклона, помогая идентифицировать потенциальные места посадки на основе уклона, высоты и характеристик поверхности [9]. Интегрируя различные типы данных, QGIS обеспечил комплексное картографирование и принятие обоснованных решений для будущих миссий на Марс.

## 3. QGIS Топографическое картографирование и контурный анализ

Чтобы понять топографию Oxia Planum и определить места посадки, были использованы передовые ГИС-технологии, в основном Квантовая ГИС (QGIS). Вот как это было сделано:

Цифровые модели рельефа высокого разрешения (ЦМР) из архива НАСА HiRISE были обработаны с использованием специализированного программного обеспечения, Обработанные ЦМР и дополнительные данные были легко интегрированы в QGIS, что позволило легко манипулировать различными форматами планетарных данных. GIS использовала многогранный подход, комбинируя векторные и растровые данные для создания подробных топографических карт, классификации различных элементов местности и проведения контурного анализа. Контурный анализ, проведенный с помощью QGIS, позволил выявить волнистые контуры Oxia Planum, определить ключевые ориентиры и понять общую морфологию местности. Оценка склонов с помощью инструментов QGIS позволила точно определить районы, пригодные для безопасных посадок в будущих миссиях на Марс. На рис. 2 иллюстрированы топографические виды долины Coogoon Valles в Oxia Planum.



*Рис. 2. топографические виды Coogoon Valles*

### 3.4. 3D-моделирование места посадки "ЭкзоМарса" (Oxia Planum)

3D-моделирование места посадки ExoMars дает трехмерное изображение региона Oxia Planum. Благодаря тщательной обработке данных высокого разрешения из архива HiRISE мы создали подробные цифровые изображения этого марсианского ландшафта. Используя передовые методы квантовой ГИС (QGIS), наш анализ проливает свет на сложные топографические и геологические особенности Oxia Planum. Трехмерное моделирование, представленное на рис. 3, представляет собой комплексную платформу визуализации, позволяющую исследователям рассматривать потенциальные препятствия и оптимизировать стратегии миссии с беспрецедентной точностью.

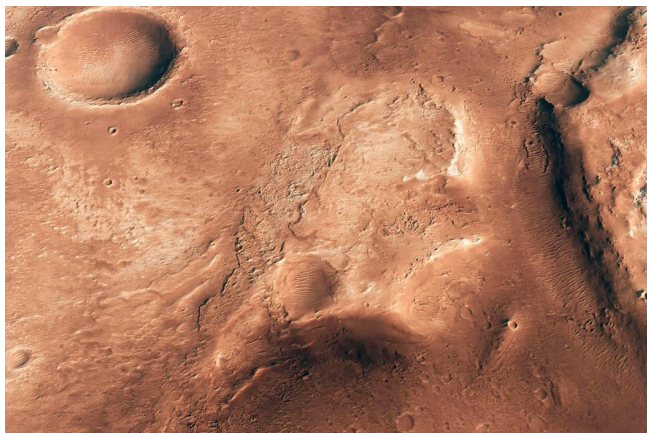


Рис .3. 3D-моделирование Oxia Planum с использованием цифровой карты местности HiRISE и модифицированного изображения

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Gwinner, K., et al.*, The High-Resolution Stereo Camera (HRSC) of Mars Express and its approach to science analysis and mapping for Mars and its satellites. *Planetary and Space Science*, 2016. 126 : p. 93-138.
2. *Tao, Y., et al.*, Ultra-high-resolution 1 m/pixel CaSSIS DTM using super-resolution restoration and shape-from-shading: Demonstration over oxia planum on Mars. *Remote sensing*, 2021. 13(11): p. 2185.
3. *Kim, J., S.-Y. Lin, and H. Xiao*, Remote Sensing and Data Analyses on Planetary Topography. *Remote Sensing*, 2023. 15(12): p. 2954.
4. *Egea-Gonzalez, I., et al.*, regional heat flow and subsurface temperature patterns at Elysium Planitia and Oxia Planum areas, Mars. *Icarus*, 2021. 353: p. 113379.
5. *Demaret, L., et al.*, Raman analyses of Al and Fe/Mg-rich clays: Challenges and possibilities for planetary missions. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2023. 54(8): p. 823-835.
6. *Mcewen, A., et al.*, The high-resolution imaging science experiment (HiRISE) in the MRO extended science phases (2009–2023). *Icarus*, 2023: p. 115795.
7. *Pajola, M., et al.*, Planetary mapping for landing sites selection: The Mars case study. *Planetary Cartography and GIS*, 2019: p. 175-190.
8. *Носрату М., Аббасов И.Б.* Моделирование высокоточного ландшафта реальной планетарной среды для космических миссий в программной среде Unreal Engine // *Авиакосмическое приборостроение*. 2024. № 4. С.36-52.  
DOI:10.25791/aviakosmos.4.2024.1405

9. QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. <http://www.qgis.osgeo.org/>.

**Носрати Мехрдад**, аспирант кафедры инженерной графики и компьютерного дизайна, Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета, Россия, 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, тел.: +7 (8634) 37-17-94, [nosrati.mehrdad.7@gmail.com](mailto:nosrati.mehrdad.7@gmail.com)

**Аббасов Ифтихар Балакишиевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной графики и компьютерного дизайна, Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета, Россия, 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, тел.: +7 (8634) 37-17-94, [iftikhar\\_abbasov@mail.ru](mailto:iftikhar_abbasov@mail.ru)

**Nosrati Mehrdad**, PhD student, Department of Engineering Graphics and Computer Design, Engineering and Technology Academy of the Southern Federal University, Russia, 347928, Taganrog, ul. Chekhova, 22, tel.: +7 (8634) 37-17-94, [nosrati.mehrdad.7@gmail.com](mailto:nosrati.mehrdad.7@gmail.com)

**Abbasov Iftikhar B.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Graphics and Computer Design, Engineering Technological Academy of the Southern Federal University, Taganrog, Russia, tel.: +7 (8634) 37-17-94.

УДК 65.011.8

Берлова Мария Максимовна

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РАЗРАБОТКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*В данной статье исследуется система стандартизации в области разработки беспилотных летательных аппаратов. Техническими комитетами по стандартизации 034 «Воздушный транспорт» (1), ТК 323 «Авиационная техника» (7) и ТК 274 «Пожарная безопасность» (1) были внесены к утверждению 9 стандартов серии «Беспилотные авиационные системы». Спецификой этих стандартов является нацеленность на применение в области беспилотных авиационных систем гражданского назначения. В соответствии с российским законодательством применение стандартов является добровольным, при этом обязательным для производителей является соблюдение требований технических регламентов. Важную роль в управлении качеством разработки беспилотных летательных аппаратов играет технический регламент ТР ТС 020/2011*



*«Электромагнитная совместимость технических средств». Решению вопросов по качеству изделий способствует прохождение процедуры сертификации. В ходе исследования было выявлено, что в настоящее время не выработана четкая государственная политика по сертификации беспилотных авиационных систем.*

*Беспилотные летательные аппараты, управление качеством, стандартизация, сертификация, технический регламент.*

Berlova Maria Maksimovna

## **DEVELOPMENT QUALITY MANAGEMENT UNMANNED AERIAL VEHICLES**

*This article investigates the standardization system in the field of unmanned aerial vehicle development. Technical Committees for Standardization 034 "Air Transport" (1), TC 323 "Aviation Technology" (7) and TC 274 "Fire Safety" (1) introduced for approval 9 standards of the series "Unmanned Aerial Systems". The specificity of these standards is the focus on application in the field of unmanned aircraft systems for civil purposes. In accordance with Russian legislation, the application of standards is voluntary, while compliance with the requirements of technical regulations is mandatory for manufacturers. An important role in quality management of unmanned aircraft systems development is played by technical regulations TR TS 020/2011 "Electromagnetic compatibility of technical means". Passing the certification procedure contributes to solving the issues of product quality. The study revealed that at present there is no clear state policy on standardization and certification of unmanned aircraft systems.*

*Unmanned aerial vehicles, quality management, standardization, certification, technical regulations.*

### **Введение**

В последние десятилетия беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали важным элементом современных технологий, оказывая значительное влияние на различные сферы человеческой деятельности. БПЛА способны выполнять разнообразные задачи без непосредственного участия человека, что делает их незаменимыми в условиях, где использование пилотируемых аппаратов затруднено или небезопасно [1]. БПЛА активно используются в военной, гражданской и коммерческой областях, что подчеркивает их значимость и многофункциональность [2].

Поэтому на сегодняшний день становятся актуальными вопросы управления качеством БПЛА. Мировая практика управления качеством

показывает значимость систем стандартизации и сертификации, задающих ключевые требования и критерии оценивания показателей качества изделий.

В Российской Федерации в разработке стандартов, регулирующих вопросы разработки и эксплуатации беспилотных авиационных систем, были задействованы Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского»» и Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации». Согласно действующему порядку, были внесены к утверждению техническим комитетом по стандартизации ТК 323 «Авиационная техника». В его составе имеется 26 подкомитетов, один из которых напрямую связан с темой данной статьи – ПК 11 «Беспилотные авиационные системы».

Спецификой этих стандартов является нацеленность на применение в области беспилотных авиационных систем гражданского назначения. В соответствии с российским законодательством применение стандартов является добровольным, при этом обязательным для производителей является соблюдение требований технических регламентов.

Прямого технического регламента по беспилотным авиационным системам не разработано. Но, как известно, «тестирование электромагнитных помех является важным компонентом разработки и эксплуатации БПЛА, так как электромагнитная интерференция (EMI) может отрицательно повлиять на производительность, надежность и безопасность беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)» [3]. Поэтому рекомендуется при разработке БПЛА учитывать требования технического регламента ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств».

Также в мировой практике показала свою эффективность процедура сертификации изделий, способствующая повышению качества путем оценки соответствия независимой компетентной стороной.

Требования к качеству подготовки предъявляются и к внешним пилотам. «Беспилотники — не самое дешевое оборудование. Управлять ими должен подготовленный человек, чтобы исключить аварии, нарушения воздушного законодательства, а значит штрафы и траты на ремонт» [4].

### **Основная часть**

Стандартизации в сфере разработки БПЛА стала развиваться в последнее десятилетие, хотя история их создания началась еще в начале XX века. Государственные национальные стандарты разрабатываются в целях повышения эффективности производства, обеспечения стабильного качества. В

настоящее время перечень действующих национальных стандартов серии «Беспилотные авиационные системы» содержит 9 стандартов, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Перечень стандартов «Беспилотные авиационные системы» (БАС)

Обозначение	Заглавие на русском языке
ГОСТ Р 56122-2014	Воздушный транспорт. БАС. Общие требования
ГОСТ Р 57258-2016	Системы беспилотные авиационные. Термины и определения
ГОСТ Р 58988-2020	БАС. Технологии топливных элементов на воздушном транспорте. Термины и определения
ГОСТ Р 59517-2021	БАС. Классификация и категоризация
ГОСТ Р 59518-2021	БАС. Порядок разработки
ГОСТ Р 59519-2021	БАС. Компоненты беспилотных авиационных систем. Спецификация и общие технические требования
ГОСТ Р 59520-2021	БАС. Функциональные свойства станции внешнего пилота
ГОСТ Р 59751-2021	БАС с беспилотными воздушными судами самолетного типа. Требования к летной годности
ГОСТ Р 70802-2023	БАС системы для обеспечения пожаротушения, аварийно-спасательных и других работ, выполняемых в целях предупреждения чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий. Общие требования

Анализ данных стандартов показал, что большая их часть содержит теоретические аспекты, поэтому требуется дальнейшее развитие системы стандартизации в этой области, направленная на обеспечение качества разработки и производства. Сферы применения БПЛА разнообразны, и продолжают расширяться: сельское хозяйство; логистика; строительство; мониторинг лесных массивов, водоемов и других природных объектов; медиа и киноиндустрия; осмотр трубопроводов и линий электропередач; поиск и спасение пропавших людей; доставка в труднодоступные районы; охрана объектов; мониторинг массовых мероприятий и контроль за общественным порядком. Разработка стандартов, учитывающих специфические требования областей применения будет способствовать повышению качества БПЛА.

Стандартизация не успевает обеспечивать потребности производителей:

- растет число предприятий и организаций, занимающихся разработкой и изготовлением БПЛА;
- на выставках представлены не только единичные БПЛА, но и серийная продукция;
- увеличивается число публикаций о разработке, испытании, производстве и эксплуатации БПЛА;
- в высших учебных заведениях и различных НИО активно занимаются научно-исследовательскими работами по тематике БПЛА;
- появляются новые конструкции, расширяется модельный ряд БПЛА;
- при их изготовлении применяются новые материалы и технологии;
- создаются новые кооперации для исследований и производства БПЛА;
- возрастает потребление отечественных БПЛА на внутреннем рынке;
- расширяется экспортный рынок отечественных БПЛА [5].

Но разработчики и производители могут применять принципы и требования системы стандартизации по иной или аналогичной продукции. Так, например, в настоящее время действуют около ста стандартов серии «Система показателей качества продукции» [6], на различные виды изделий, которые включают группы показателей качества, представленные на рис. 1.



Рис. 1. Система показателей качества продукции

Данные группы показателей могут быть учтены разработчиками, производителями, пользователями для улучшения качества БПЛА.

Большое значение для качества применения БПЛА имеет и подготовка внешних пилотов. С 1 марта 2023 внешние пилоты беспилотных воздушных судов с максимальной взлетной массой 30 кг и менее не являются авиационным персоналом. За их подготовку и контроль квалификации ответственен эксплуатант. Он должен иметь документальное подтверждение о подготовке внешних пилотов по самостоятельно установленным правилам. При разработке таких правил, также рекомендуется учитывать требования стандартов, технических регламентов и иных правовых документов в этой сфере.

### **Выводы**

БПЛА представляют собой революционную технологию, которая может значительно улучшить систему безопасности в различных сферах. Их использование позволяет увеличить эффективность охраны границы и объектов, повысить шансы на спасение пропавших людей, обеспечить безопасность массовых мероприятий и усилить борьбу с преступностью. Очевидно, что в будущем применение БПЛА будут продолжать расширяться, предлагая новые возможности для различных отраслей.

Для дальнейшего усовершенствования БПЛА важно работать над увеличением их автономности и безопасности [7]. Это включает разработку более совершенных систем навигации и управления, улучшение батарей и энергетических систем для увеличения времени полета, а также интеграцию искусственного интеллекта для повышения автономности и точности выполнения задач. Необходимо продолжать работу над миниатюризацией и улучшением сенсоров, что позволит расширить возможности дронов в сборе и обработке данных. Важно развивать законодательную базу и инфраструктуру для безопасного и эффективного использования БПЛА в воздушном пространстве [8]. Это включает создание зон для полетов, разработку стандартов и правил для их эксплуатации, а также обеспечение защиты данных и конфиденциальности.

Для улучшения качества разработки, производства и эксплуатации БПЛА следует активнее использовать систему стандартизации и сертификации. «В декабре 2019 г. вступил в силу приказ Минтранса РФ, утверждающий федеральные авиационные правила (ФАП) "Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21". Одним из основных изменений этого документа является расширение области его применения на беспилотные авиационные системы, которые должны быть сертифицированы в том случае, если максимальная взлетная масса БПЛА в

их составе превышает 30 кг (в соответствии с Воздушным кодексом РФ)» [9].

С 1 марта 2023 года начали действовать приказы в сфере гражданской авиации:

- Приказ Минтранса России № 419, который устанавливает новый перечень специалистов авиационного персонала гражданской авиации.

- Приказ Минтранса России № 420. Он вносит изменения в ФАП-494 и ФАП-10, которые касаются требований о подготовке пилотов [4].

Кроме того, согласно информации на сайте правительства РФ «идет разработка проекта по оптимизации сертификации авиабеспилотников для производителей, до конца 2024 года он должен быть утвержден правкомиссией по развитию беспилотных авиационных систем. В результате должен быть разработан механизм, который бы позволил сократить сроки и затраты на сертификацию беспилотников» [10].

Повышению качества разработки, производства и эксплуатации БПЛА будет способствовать развитие систем стандартизации и сертификации, а также более широкое информирование разработчиков и производителей о преимуществах применения технических регламентов и национальных стандартов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jesse, Russell* Беспилотный летательный аппарат / Jesse Russell. - М.: VSD, 2012. - 277 с. (дата обращения: 27.05.2024).

2. *Митрофанова Н. С.* Дроны: история возникновения, сферы применения, и перспективы развития / Н. С. Митрофанова // 1Т: вчера, сегодня, завтра: материалы IV научно-исследовательской конференции студентов и аспирантов Института водного транспорта. - Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ГУМирФ им. адмирала С. О. Макарова, 2016. - С. 173 – 184 с. (дата обращения: 27.05.2024).

3. *Раза Раббани.* Испытание электромагнитных помех для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА): проблемы и решения - URL: <https://ru.lisun-group.com/новости/новости-технологии/ЭМИ-тестирование-беспилотных-летательных-аппаратов%2C-БПЛА%2C-проблемы-и-решения.html> (дата обращения: 23.06.2024).

4. ЦПР ПРОФИ. Пилоты беспилотных воздушных судов теперь не относятся к гражданской авиации – URL: <https://profi-cpr.ru/news/novosti-v-sfere-bpla/pilotyi-bes-pilotnyix-vozdushnyix-sudov-teper-ne-otnosyatsya-k-grazhdanskoj-aviacii.html> (дата обращения: 23.06.2024).

5. Соколов А., Афанасьев А. Российская беспилотная авиация - URL: <https://arsenal-otechestva.ru/article/1619-rossijskaya-bespilotnaya-aviatsiya> (дата обращения: 23.06.2024).

6. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии - URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost> (дата обращения: 23.06.2024).

7. Варламов А. С. Перспективы развития систем и средств комплексов с беспилотными летательными аппаратами / А. С. Варламов, А. В. Седых, Д. С. Бачурин. // Молодой ученый. — 2023. — № 47 (494). — С. 25-27. — URL: <https://moluch.ru/archive/494/108015/> (дата обращения: 27.05.2024).

8. Постановление Правительства РФ от 11.03.2010 № 138 (ред. от 12.07.2016) «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» (дата обращения: 27.05.2024).

9. Шубаев В. М. Сертификация беспилотных авиационных систем: барьеры и драйверы – URL: <https://www.secuteck.ru/articles/certifikaciya-bespilotnyh-aviacionnyh-sistem-barery-i-drajvery> (дата обращения: 27.05.2024).

10. Вестник ГЛОНАСС. Сертифицировать беспилотники в России станет легче - URL: <http://vestnik-glonass.ru/~ZOOAU> (дата обращения: 27.05.2024).

**Берлова Мария Максимовна**, студент Казанского федерального университета, ИИРСИ, Россия, город Казань, ул. Салиха Сайдашева, 12, корп. 3, 420129, телефон: 89503209835, email: [fufnf2@mail.ru](mailto:fufnf2@mail.ru).

**Berlova Maria Maksimovna**, student of Kazan Federal University, IIRSI, Russia, Kazan, Salikha Saidasheva str., 12, building 3, 420129, phone: 89503209835, email: [fufnf2@mail.ru](mailto:fufnf2@mail.ru).

УДК 551.46.077:529.584

Джаныбеков Руслан Юсуфович, Аббасов Ифтихар Балакишиевич

## **ЭКРАНОПЛАН КАК НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ В СТРОЕНИИ ВОЕННО-МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Работа посвящена концепции развития беспилотного экраноплана. Для достижения данной цели необходимо проследить историю развития экранопланов, рассмотреть их конструкцию, определить основные проблемные вопросы в разработке морского робототехнического комплекса на основе экраноплана.*

*Морской робототехнический комплекс, морская среда, прибрежная акватория, беспилотный катер, «морской дрон», экраноплан.*

Dzhanybekov Ruslan Yusufovich, Abbasov Iftikhar Balakishievich

## **EKRANOPLAN AS A NEW CONCEPT IN THE STRUCTURE NAVAL ROBOTIC SYSTEMS**

*The work is devoted to the concept of the development of an unmanned ekranoplan. To achieve this goal, it is necessary to trace the history of the development of ekranoplanes, consider their design, and identify the main problematic issues in the development of a marine robotic complex based on an ekranoplan.*

*Marine robotic complex, marine environment, coastal waters, unmanned boat, "marine drone", ekranoplan.*

### **Введение**

В самом деле, с Севера и Востока огромную территорию Российской Федерации окружает множество морей Северного ледовитого и Тихого океанов. В связи с этим морской и речной транспорт играют критическую роль в обороне Российской Федерации, особенно учитывая ее обширное географическое пространство и многочисленные водные пути.

Вот несколько причин, почему скоростное перемещение по воде является критическим аспектом военных операций:

Первая причина – это быстрое разворачивание и маневренность средств ВМФ. Военные суда, особенно корабли и подводные лодки, способны достигать высоких скоростей и оперативно разворачиваться в нужной точке. Это позволяет быстро реагировать на угрозы, выполнять маневры и перестраиваться в соответствии с изменяющейся ситуацией. Скорость водного передвижения обеспечивает ВМФ России возможность эффективного противодействия в случае конфликта или кризиса.

Вторая причина – это удобство доставки и логистика вооружения, военной и специальной техники, а также войск. Как было сказано ранее водный транспорт обладает высокой грузоподъемностью и способен перевозить значительное количество военного оборудования, материалов и снабжения. Большие корабли и транспортные суда предоставляют возможность массовой доставки ресурсов на значительные расстояния, включая удаленные регионы и труднодоступные территории. Это особенно важно для России, учитывая ее огромную территорию и наличие удаленных регионов, таких как Камчатка и Арктика.



Третья причина – это международные операции и присутствие контингента Вооруженных сил России. Скоростное передвижение водным путем позволяет Вооруженным силам России осуществлять операции за пределами своих границ. Благодаря возможности быстрой и эффективной переброски войск и оборудования Россия может поддерживать присутствие и влияние в различных регионах мира, особенно в районах, где имеется доступ к водным путям.

Это также способствует защите интересов России на международной арене.

Четвертая причина – это борьба с терроризмом, обеспечение защиты судоходства и контроль морских границ Российской Федерации. Водный транспорт позволяет России эффективно бороться с терроризмом и контролировать свои морские границы. Военные корабли и патрульные суда могут осуществлять наблюдение, обнаружение и пресечение незаконных действий, таких как контрабанда оружия, наркотиков или незаконная миграция. Быстрая реакция и скоростное передвижение позволяют эффективно реагировать на потенциальные угрозы и поддерживать безопасность морского пространства России.

Таким образом, скоростное передвижение водным способом имеет высокую важность для военного ведомства России, обеспечивая оперативность, гибкость и эффективность военных операций, логистическую поддержку и защиту интересов России на международной арене.

Для достижения высокого скоростного эффекта на флоте перспективными рассматриваются суда с динамическими принципами поддержания, которые представляют собой инновационный подход к технологии судостроения.

Эти инновационные концепции и технологии предлагают ряд преимуществ в военной сфере. Одним из главных преимуществ судов с динамическими принципами поддержания является их способность оперировать как на воде, так и на суше. Это позволяет эффективно обеспечивать логистическую поддержку и мобильность военных операций.

В целом, суда с динамическими принципами поддержания представляют собой перспективную технологию, которая может значительно расширить возможности и гибкость Военно-морского флота России. Всеми необходимыми качествами из вышеперечисленных концептов обладают экранопланы [1].

Еще одной перспективой использования экранопланов на флоте является

их способность оперировать в сложных климатических условиях Арктики. В связи с изменением климата и расширением морского пространства в Арктике, экранопланы могут стать важным средством для обеспечения присутствия

и мониторинга в этом регионе.

### **История создания и развития экраноплана**

История создания и развития экранопланов в России имеет глубокие корни и связана с работой выдающегося конструктора Алексея Черемушкина.

Первые исследования в области экранопланов в России начались в 1920-х годах. Однако значительное развитие этой технологии произошло во времена Советского Союза. В 1960-х годах Алексей Черемушкин, основатель и главный конструктор Центрального гидроаэродинамического института (ЦГАИ), предложил новую концепцию экранопланов, которая получила широкое признание.



*Рис. 1 Экраноплан «Волга-2»*

В 1961 году был создан первый прототип экраноплана под названием «Лунь» (Летающий Ударный Носитель). Этот экраноплан был разработан для военного применения и имел большую грузоподъемность и дальность полета. «Лунь» успешно выполнил серию испытаний и демонстрационных полетов, показав потенциал этой новой технологии.



*Рис. 2 Экраноплан проекта «Лунь» (Летающий Ударный Носитель)*

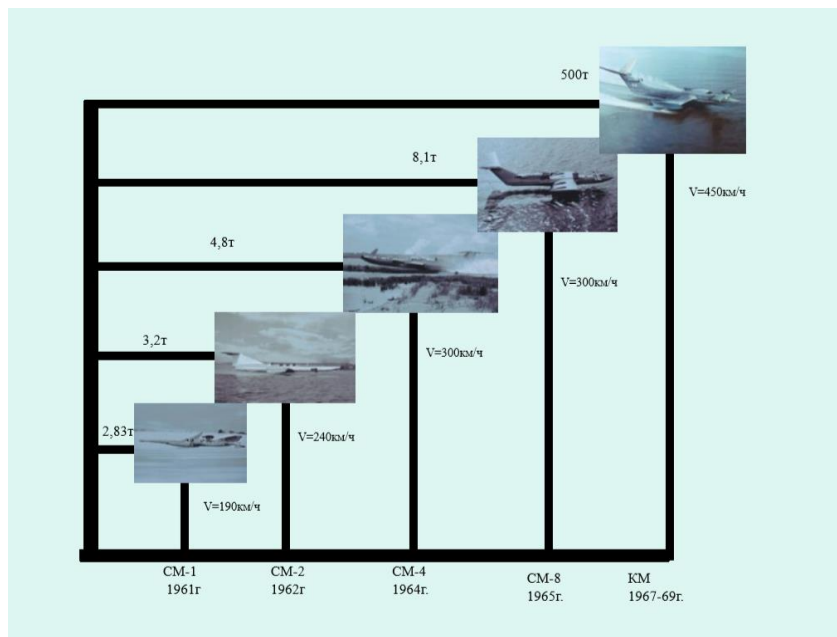
В последующие годы Черемушкин и его коллеги продолжили работу над усовершенствованием экранопланов. Были разработаны новые модели, включая экранопланы серии «Корвет» и «Экран-М». Эти суда обладали улучшенной аэродинамикой, большей грузоподъемностью и способностью осуществлять полеты на большие расстояния.

В 1980-х годах был создан один из самых известных экранопланов – «Каспийский Монстр». Это был самый большой экраноплан в мире, способный перевозить до 500 пассажиров.

Однако после распада Советского Союза и экономических трудностей 1990-х годов развитие экранопланов в России замедлилось. Одной из причин была сложность поддержания и эксплуатации таких технически сложных судов. В последние годы интерес к экранопланам в России возродился, особенно в контексте их использования в Арктике и военной сфере.

Сегодня в России проводятся исследования и разработки в области экранопланов, с целью создания более совершенных и эффективных моделей. Возобновление интереса к этой технологии связано с ее потенциалом

в обеспечении быстрой и гибкой транспортировки грузов, пассажиров, а также с возможностью решения задач по защите интересов России в Арктике.



*Рис. 3 Динамика развития экранопланов от СМ-1 до КМ*

### **Выбор концепции экраноплана как основного направления в дизайн-проекте для создания современного морского ударного робототехнического комплекса**

В 4 часа 20 минут 29 октября 2022 года группы беспилотников (российские эксперты насчитали как минимум 9 БПЛА и 7 безэкипажных надводных аппаратов), атаковали акваторию Севастопольской бухты. Дрон-камикадзе «Микола-3» (информации про первую и вторую версии не удалось найти, вероятно они были не совсем удачными) представляет немалую опасность. Поскольку в отличие от воздушных дронов, его сложнее обнаружить, при этом его заряд взрывчатого вещества несоизмеримо больший (теоретически один дрон может нести до 200 кг взрывчатого вещества), а такого заряда хватит даже для повреждения прочного корпуса ледокола.

Дрон-камикадзе «Микола-3» представляет собой 5,5-метровую лодку массой до 1 тонны, способную автономно находиться в море до 60 часов и развивающую максимальную скорость до 80 км/ч. Вместе с тем по информации Министерства обороны, они были быстро уничтожены силами Черноморского флота и не успели нанести серьезного ущерба инфраструктуре. Использование морских дронов на Украине является одной из актуальных тем, связанных с развитием морской инфраструктуры и обеспечением безопасности в морских пространствах. Украина стала первой, кто довел морские беспилотники не просто до опытных образцов, а до «образцов, которые можно применить в открытом бою» и в разы увеличила их производство. Стало известно, что стоимость каждого дрона-камикадзе составляет около 16,3 миллионов рублей [2] [3].



*Рис. 4 Камикадзе «Микола-3», которые могут использоваться в качестве морских разведчиков.*



*Рис. 5 Выброшенные в октябре на крымский берег украинские дроны. Хорошо видна кормовая антенна системы спутниковой связи «Старлинк»*

В любом случае, для кораблей охраны водного района стал актуальным вопрос по противодействию атакам таких дронов. Пока самым эффективным способом противодействия является полное глушение на определенном участке акватории спутникового интернета «Старлинк». Но держать включенными системы РЭБ круглосуточно нельзя, поэтому очень важно понять моменты, когда возможна потенциальная атака. Уничтожение дронов осуществлялось силами экипажей боевых кораблей ВМФ с использованием артиллерийско-пушечного и пулеметного вооружение. Это стало возможным по причине относительно небольшой скорости их движения, которая составляла до 80 км/ч.



*Рис. 6 Пулеметчики «Ивана Хурса» ведут огонь по БЭК*

Решить же эту проблему можно реализовав морской робототехнический комплекс-камикадзе с использованием дизайн проекта на базе экраноплана.

В диапазоне скоростей 200-500 км/ч эффективность экраноплана как транспортного средства, определяемая произведением скорости транспортирования на массу груза по отношению к затратам энергии, значительно выше, чем у других современных транспортных средств.

Так на вооружении иранского Корпуса стражей Исламской революции (КСИР) появился летательный аппарат нового типа. Впервые информация об иранском беспилотнике, получившем название Unmanned Ground Effect Vehicle (UGEV), появилась в докладе, опубликованном информационным агентством Tasnim. UGEV описывался «как первый в мире беспилотник, способный взлетать и садиться в море». С помощью двух поршневых двигателей дрон способен развивать скорость до 250 км/ч и лететь на высоте от 0,5 до 900 м. Дальность полёта UGEV ограничена 1000 км, а запаса топлива достаточно для 4 часов непрерывного полёта [4].



*Рис. 7 Беспилотник UGEV*

Так же в интернете появилось изображение необычного летательного аппарата, который якобы принадлежит военно-морским силам КНР. В описании к фотографии говорится, что это беспилотник-самоубийца весом около трех тонн. Продолжительность полета составляет примерно полтора часа. Но самое интересное – это принцип полета дрона. Он использует так называемый экранный эффект. То есть двигается на высоте всего несколько метров, но зато очень быстро [5].





*Рис. 8. Экраноплан-камикадзе создан в Китае*

Выбор концепции экраноплана при проектировании морских робототехнических комплексов основывается на факторах, учитывающих требования к мобильности, гибкости и эффективности операций с роботами в морской среде.

#### **Концепции в моделировании экранопланов и возможные дизайн-проекты**

В моделировании дизайна проектов экранопланов существуют различные концепции, которые помогают оптимизировать функциональность, эффективность этих средств.

Вот несколько концепций, используемых при разработке дизайна экранопланов:

концепция гидродинамики - эта концепция уделяет особое внимание гидродинамическим характеристикам экраноплана. Она включает в себя изучение формы корпуса, влияние волн на движение, оптимизацию аэродинамических и гидродинамических сил, а также учет взаимодействия воздуха и воды для обеспечения оптимальной производительности экраноплана;

концепция стабильности и контроля - эта концепция направлена на обеспечение стабильности и управляемости экраноплана в различных условиях. Она включает в себя разработку систем автоматической стабилизации и контроля, учет динамики корпуса и аэродинамических поверхностей, а также оптимизацию систем управления для обеспечения точности и предсказуемости движения экраноплана;



концепция эргономики - эта концепция уделяет внимание работы обслуживающему инженерно-техническому персоналу;

концепция энергоэффективности - эта концепция включает в себя использование энергоэффективных систем движения, снижение выбросов отработанных газов и шума, а также возможность использования возобновляемых источников энергии для питания экраноплана;

концепция модульности и многофункциональности - эта концепция предусматривает разработку экранопланов, которые могут быть легко адаптированы для различных задач и функций. Она включает в себя модульную конструкцию, возможность установки различных оборудования и систем в зависимости от потребностей, а также возможность использования экраноплана в различных сферах.

При конструировании боевых морских робототехнических экранопланов наиболее подходящими дизайн-проектами являются:

- модульные и настраиваемые системы – позволяющие легко варьировать конфигурацию и функциональность экраноплана, чтобы адаптироваться к различным боевым ситуациям и задачам. Это включает в себя возможность установки различных видов оружия, датчиков, коммуникационных и разведывательных систем в зависимости от потребностей операции;



*Рис. 9 Многоцелевой экраноплан «Чайка-2»*

- высокая маневренность и скорость – дроны-экрanoпланы должны обладать высокой маневренностью и скоростью, чтобы быстро перемещаться по морской поверхности и выполнять задачи в различных условиях. Это позволяет им эффективно маневрировать, уклоняться от угроз и оперативно

прибывать к месту назначения. Экранопланы, это один из ярчайших примеров межвидового технического скрещивания, в данном случае это симбиоз самолёта и скоростной лодки [7];



*Рис. 10 Электрический экраноплан «Seaglider»*

- системы дальней связи и коммуникации - они обеспечивают связь с другими элементами военного комплекса, передачу данных, команд и информации в режиме реального времени, а также координацию действий с другими платформами;

- защита и выживаемость имеют большое значение в военной сфере. Они включают в себя использование бронирования, систем активной и пассивной защиты, возможность быстрого восстановления после повреждений и обеспечение безопасности систем управления и связи;

- автономные возможности. Дизайн-проекты, которые предусматривают автономные возможности экранопланов, позволяют им выполнять задачи

без прямого участия человека. Это включает в себя использование систем искусственного интеллекта, автоматизации и автоматического принятия решений. Автономные экранопланы способны выполнять разведывательные миссии, мониторинг, поиск и обнаружение целей, а также участвовать в автономных боевых операциях;

- информационная интеграция и сетевая связь. Дизайн-проекты, которые обеспечивают интеграцию с другими военными системами и платформами,

а также высокую степень сетевой связи, позволяют экранопланам взаимодействовать и координировать действия с другими военными силами. Это повышает эффективность операций, обеспечивает обмен информацией и позволяет создавать единую боевую обстановку.

### **Вывод**

Экранопланы могут оперировать как на открытых морских пространствах, так и в узких реках и затоках. Это обеспечивает им доступность к различным районам и участкам, включая мелководные зоны и прибрежные области,

где традиционные суда могут испытывать трудности. Они так же обладают способностью перевозить значительные грузы, включая различное оборудование и вооружение. Это позволяет им выполнять различные задачи, такие как транспортировка материалов и снабжение, развертывание робототехнических систем и осуществление операций специального назначения.

Дизайн-проекты экранопланов могут быть созданы с учетом модульности и адаптивности, что позволяет легко интегрировать различные системы, модули и подсистемы в зависимости от требований и задач. Это обеспечивает гибкость и возможность быстрого переоснащения комплекса в соответствии с меняющимися потребностями военных операций.

Экранопланы могут быть интегрированы в общую военную сетевую инфраструктуру и взаимодействовать с другими боевыми платформами и системами. Это позволяет создавать единую информационную среду, обеспечивать совместное ведение операций и координацию действий.

Все эти факторы делают дизайн-проекты на базе экраноплана наиболее подходящими для конструирования военных морских робототехнических комплексов. Они обеспечивают высокую мобильность, скорость, гибкость в выполнении задач, интеграцию с другими системами и обеспечение безопасности военного персонала.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Любимов В.И.* д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «ВГУВТ» 603951, г. Нижний Новгород, Анализ тенденций развития экранопланов и перспективы их использования в транспортной системе России.

2. Alex-IT, 4 мая 2023, Новая угроза с моря – флот украинских безэкипажных надводных аппаратов, <https://yandex.ru/turbo/overclockers.ru/s/blog/Pitfalls/show/92366/> novaya-ugroza-s-morya-flot-ukrainskih-bezekipazhnyh-nadvodnyh-apparatov.

3. *Федоров Е.* Флот морских дронов: что собой представляют украинские беспилотники «Микола-3», 18 ноября 2022, <https://topwar.ru/205222-flot-morskih-dronov-chto-iz-sebja-predstavljajut-ukrainskie-bespilotniki-mikola-3.html>.

4. Редакция Warspot, 28 октября 2016, Иран рассекретил свой дрон-экраноплан, <https://warspot.ru/7434-iran-rassekretil-svoy-dron-ekranoplan>.

5. Экраноплан-камикадзе создан в Китае, 4 мая 2017, <https://www.vesti.ru/article/1673309>.

6. *Наместников А. Ю.* Дизайн экраноплана: курсовой проект в версии самого преподавателя, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, <https://dgng.pstu.ru/conf2019/papers/25>.

7. *Макухин С.* Электрический экраноплан «Морской планер» – революция в прибрежном транспорте, 08.06.2021, <https://greenstartpoint.ru/elektricheskij-ekranoplan-morskoy-planer-revoljucziya-v-pribrezhnom-transporte>.

**Джаныбеков Руслан Юсуфович**, начальник учебной части-заместитель начальника кафедры ВКС Военного учебного центра ЮФУ, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, тел.: +7 (918) 584-55-04, email: [dzhanybekov@sfedu.ru](mailto:dzhanybekov@sfedu.ru).

**Аббасов Ифтихар Балакишиевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной графики и компьютерного дизайна, Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета, Россия, 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, тел.: +7 (8634) 37-17-94, [iftikhar\\_abbasov@mail.ru](mailto:iftikhar_abbasov@mail.ru).

**Dzhanybekov Ruslan Yusufovich**, head of the training unit-Deputy Head of the Department of the Military Training Center of the Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky Lane, phone: +7 (918) 584-55-04, email: [dzhanybekov@sfedu.ru](mailto:dzhanybekov@sfedu.ru).

**Abbasov Iftikhar B.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Graphics and Computer Design, Engineering Technological Academy of the Southern Federal University, Taganrog, Russia, tel.: +7 (8634) 37-17-94.

Секция – **Современные микро- и нанoeлектронные системы и технологии**

УДК 538.956

Нагаенко Александр Владимирович, Полянский Тимофей Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
СОСТАВ-СТРОЕНИЕ-СВОЙСТВА ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ**

*Актуальность применения пьезокерамических материалов обусловлена их свойствами и широким спектром применения в различных устройствах электронной техники. Свойствами таких материалов можно легко управлять как внешними воздействиями, так и различными химическими и технологическими приемами, которые приводят к изменению архитектуры керамического каркаса. В работе проведено исследование зависимости электрофизических параметров пьезоматериала от строения его микроструктуры.*

*Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пьезокомпозит, композиционные материалы, удельная чувствительность, микроструктура.*

Nagaenko Alexandr Vladimirovich, Polyansky Timofey Alekseevich

**INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE  
COMPOSITION-STRUCTURE-PROPERTIES OF PIEZO MATERIALS**

*The relevance of the use of piezoceramic materials is due to their properties and a wide range of applications in various electronic devices. The properties of such materials can be easily controlled by both external influences and various chemical and technological techniques that lead to a change in the architecture of the ceramic frame. The paper investigates the dependence of the electrophysical parameters of a piezomaterial on the structure of its microstructure.*

*Ferroelectrics, piezoelectrics, piezo composite, composite materials, specific sensitivity, microstructure.*

Для материалов системы ЦТС состав которых близок к морфотропной области, формирование анизотропии их пьезопараметров не может быть достигнуто в процессе поляризации керамических образцов. Это связано с близкими объёмами элементарных ячеек пара- и сегнетофаз системы и относительно небольшими коэффициентами электрострикции зёрен этого

типа керамики. Решение указанной проблемы может быть достигнуто за счёт формирования у материалов пористого керамического каркаса, что позволяет не только снизить значения поперечной пьезоактивности, но и величины диэлектрической проницаемости материалов. Последний факт, в свою очередь, будет способствовать значительному повышению объёмной пьезоактивности образцов, выражающейся в увеличении значений их объёмной пьезочувствительности и фактора приёма. Изменения этих параметров определяются составом сегнетофазы её объёмной долей в материале, объёмной долей пор и характером их распределения в системе. Т.о. последние два фактора определяют совместное влияние состава и микроструктуры материала на значения его ЭФП.

Для изготовления композиционных материалов на основе пористой пьезокерамики использовалась кристаллическая фаза легированной системы ЦТС ( $\text{Pb}_{1-x}\text{Bi}_x[\text{TiZr}]_{1-y}[\text{NiNb}]_y\text{O}_3$ ) в виде ультрадисперсного порошка. Получение пористой керамики основано на термической деструкции порообразователей, в качестве которых выступали соли аммония  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  и  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ .

Процесс изготовления пористой керамики по данному методу включает:

- определение масс сегнетоэлектрической фазы и порообразователя для получения образца заданной пористости по экспериментально полученному графику;
- взвешивание заданных количеств порошков сегнетофазы и порообразователя;
- помещение порошков сегнетофазы и порообразователя в барабан Z - образного смесителя;
- смешение порошков;
- изготовление из смеси порошков прессзаготовок;
- обжиг прессзаготовок по режимам предотвращающим разрушение заготовок за счёт высокой скорости термической деструкции порообразователей.

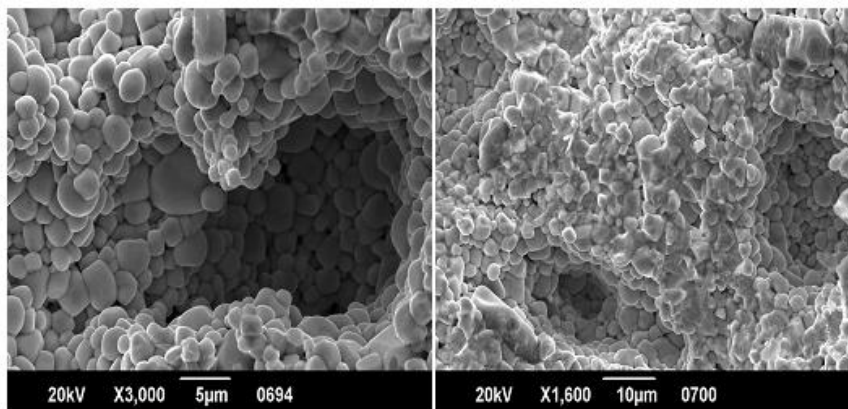
У изготовленных пористых материалов, пьезокомпозиты типа 3 – 3, 3 – 0 и 3–0–3 – далее ПКМ, контролировались общая ( $\Pi_{\text{общ}}$ ), открытая ( $\Pi_{\text{от}}$ ) и закрытая ( $\Pi_3$ ) пористость.

Для изготовления образцов, с преимущественно закрытой пористостью, в качестве порообразователя использовался порошок  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ,

который плавится (с разложением на  $\text{NH}_3$  и  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) при температуре  $114^\circ\text{C}$ .

Исследование процессов взаимодействия  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  с порошком фазы системы ЦТС показало, что между этими веществами (при температурах  $115 - 200^\circ\text{C}$ ) возможно поверхностное взаимодействие, приводящее к поверхностной деструкции сегнетофаз. При этом степень деструкции сегнетофазы зависит от дисперсности порошка сегнетофазы и продолжительности его контакта с жидкой фазой порообразователя.

Образование на первом этапе процесса поверхностной нестехиометрической фазы, а затем восстановление её катионного и анионного состава способствуют увеличению скорости первичной и вторичной рекристаллизации, а также скорости роста зёрен, по сравнению с другими областями прессзаготовки. В результате этого, а также по причине образования на первом этапе жидкой фазы, в системе наблюдается образование закрытых пор овальной формы (ПКМ типа 3-0). Можно отметить, что зёрна керамического каркаса, выходящие в объём пор, также имеют форму, близкую к овальной (рис. 1).



*Рис. 1. Сколы пористой керамики, изготовленной с использованием в качестве порообразователя порошка  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$*

Для изготовления пористых керамических каркасов с, преимущественно, открытой пористостью (ПКМ типа 3-3), в качестве порообразователя использовался порошок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ .

Зависимость пористости керамического каркаса от увеличения доли порообразователя в системе представлена на рис. 2.

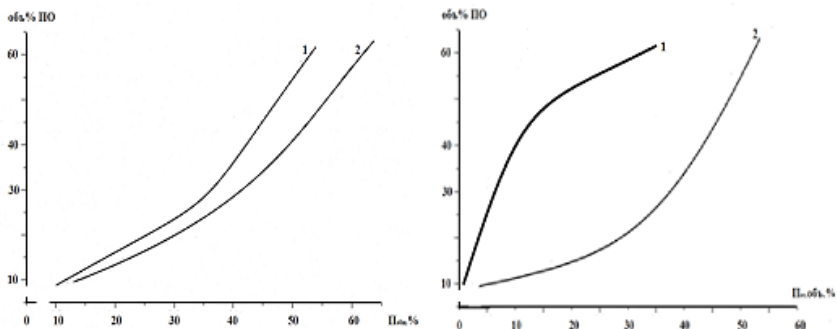


Рис. 2. Изменение (слева: общей и справа – открытой) пористости керамического каркаса по мере роста объёмной доли порообразователя в прессзаготовке: (1) -  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ; (2) -  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

Необходимо отметить, что независимо от природы порообразователя, увеличение общей пористости керамики приводит к росту в ней доли открытой пористости, что связано с ростом вероятности ассоциации мелких пор и образованием сквозных каналов (рис. 1, 3). При этом, как следует из данных рис. 3, форма пор и их объём зависят от линейных характеристик частиц и физико-химических свойств порообразователей (плавление  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  и возгонка  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ).

В связи с этим можно утверждать, что связности типа 3-0 и 3-3 для ПКМ, имеющей общую пористость от 10 до 65 объ.%, являются идеальными, а истинная связность рассматриваемых материалов должна рассматриваться как 3-0-3 (т.е. сочетание определённой доли открытой и закрытой пористости в едином керамическом каркасе). При этом доли указанных типов пористости могут быть целенаправленно изменены путём варьирования состава порообразователя, а также линейных размеров и объёмов его частиц.

Влияние изменений строения микроуровня керамического каркаса пьезокомпозигов типа 3-0-3 с различной долей открытой и закрытой пористости (рис. 2) представлены на рис. 1-3.



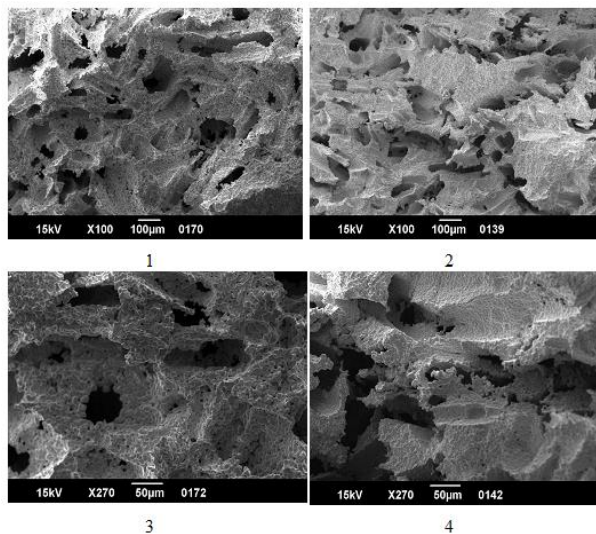


Рис. 3. Сколы пористой керамики (при различном увеличении), изготовленной с использованием в качестве порообразователя порошка: (1 и 3) -  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ; (2, и 4) -  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

Изменение значений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ПКМ при увеличении общей пористости керамического каркаса представлены на рис. 4.

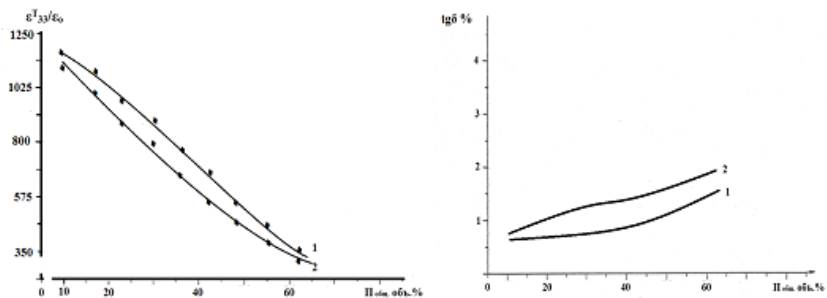


Рис. 4. Изменение значений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ПКМ при увеличении общей пористости керамического каркаса. При изготовлении ПКМ, в качестве порообразователя, использованы порошки: (1) -  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ; (2) -  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

Из данных, представленных на рис. 4 следует, что при равных значениях общей пористости, меньшее значение диэлектрической проницаемости имеют керамические образцы с большей долей открытой пористости; рост объёмной доли открытой пористости образцов способствует увеличению значений  $\tan \delta$  угла диэлектрических потерь. Выявленные зависимости связаны с различиями в микроструктуре исследованных образцов.

Анализ литературных данных [1 – 11], а также данных по влиянию роста пористости на изменение ЭФП пьезоматериалов на основе легированного цирконаттитаната свинца, приводит к выводу, что значения  $d_{33}$  пьезоматериалов с ростом их пористости изменяются мало, тогда как значения  $d_{31}$  – снижаются. Так как объёмный пьезомодуль:  $d_v = d_{33} + 2d_{31}$  (знак  $d_{31}$  – отрицательный), указанное изменение  $d_{33}$  и  $d_{31}$ , способствуют росту значений  $d_v$ . С учётом этого факта, а также в связи со снижением значений относительной диэлектрической проницаемости по мере увеличения общей пористости образцов, происходит рост объёмной пьезочувствительности материалов рассматриваемого типа, так как  $g_v = d_v / \epsilon_{r33}$  (рис. 5).

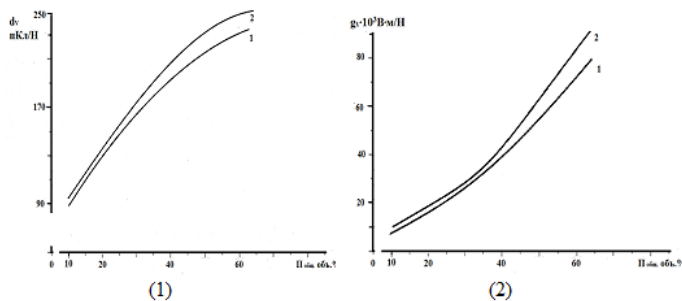


Рис. 5. Изменение значений объёмного пьезомодуля и объёмной пьезочувствительности ПКМ при увеличении общей пористости керамического каркаса. При изготовлении ПКМ, в качестве порообразователя, использованы порошки: (1) -  $CH_3COONH_4$ ; (2) -  $(NH_4)_2CO_3$

Так как фактор приёма представляет собой произведение  $d_v \cdot g_v$ , рост значений этих пьезоконстант приводит к увеличению и его значений (рис. 6).

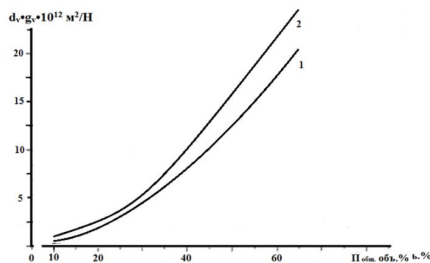


Рис. 6. Изменение значений фактора приёма ПКМ при увеличении общей пористости керамического каркаса. При изготовлении ПКМ, в качестве порообразователя, использованы порошки: (1) -  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ; (2) -  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

## Выводы

Экспериментально установлено, что высокие значения объёмных пьезопараметров у ПКМ на основе фаз системы ЦТС, могут быть достигнуты, за счет целенаправленного формирования микроструктуры их керамического каркаса.

Выявлены приёмы, позволяющие в широких пределах варьировать строения микроуровня образцов фиксированного качественного и количественного состава, что позволило выявить зависимости, связывающие состав сегнетофазы и микроструктуру керамического каркаса созданного на её основе с диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами ПКМ.

Изготовлены ПКМ на основе фаз системы ЦТС, которые характеризуются более высокими значениями объёмных пьезопараметров, по сравнению с материалами на основе фаз легированного титаната свинца.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Wersing W.* Dielectric, elastic and piezoelectric properties of porous PZT ceramics [Text] / W.Wersing, K Lubitz., J. Moliaupt // *Ferroelectrics*. - 1986. - V.68, N 1/4. - P.77-79.) /
2. *Shrout T.R.* Simplified fabrication of PZT/polymer composites [Text] / T.R. Shrout, W.A. Schulze and J.V. Biggers J.// *Mater. Res. Bull.* – 1979.- Vol. 14. – P. 1553–1559
3. *Skinner D.P.* Flexible composite transducers [Text] / D.P.Skinner, R.E. Newnham and L.E. Cross // *Mater. Res. Bull.* – 1978.- Vol. 13, N6– P. 599–607.
4. *Федотов Г.Н.* Получение высокопористых каркасов ЦТС криохимическим методом [Текст] / Г.Н.Федотов, Метелин Ю.Г., Третьяков Ю.Д.// В сборнике

«Получение и применение сегнето- и пьезоматериалов в народном хозяйстве» М. НИИТЭХИМ.- 1984.- с.99 – 102.

5. *Biswas D.R.* Electrical properties of porous PZT ceramics [Text] / D.R. Biswas // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1978.- Vol. 61, N 9-10. – P. 461–462.

6. *Hikita K.H.* Piezoelectric properties of the porous PZT composites with silicone rubber [Text] / K.H.Hikita, K.Jamada, M.Nishioka and M.Ono // *Ferroelectrics.* – 1983. – Vol. 49 N1/4.– P. 265– 272.

7. *Banno H.* Effects of Porosity on Dielectric, Elastic, and Electromechanical Properties of  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  Ceramics with Open Pores: A Theoretical Approach // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1993. Vol. 32. P. 4214-4217.

8. *Bowen C. R.* Processing and properties of porous piezoelectric materials with high hydrostatic figures of merit [Text] / C. R. Bowen, A. Perry, A.C.F. Lewis, H. Kara // *Journal of the European Ceramic Society.* 2004. № 24. P. 541-545.

9. *Guo R.*, Enhanced piezoelectric property of porous lead zirconate titanate ceramics with one dimensional ordered pore structure [Text] / R. Guo, C.A. Wang // *Journal of applied physics.* 2010. № 108. P. 124112 1-4. 54.

10. *Boumchedda K.* Properties of a hydrophone produced with porous PZT ceramic [Text] / K. Boumchedda, M. Hamadi, G. Fantozzi // *Journal of the European Ceramic Society.* 2007. Vol. 27. P. 4169-4171.

11. *Topolov V.Yu.* Electromechanical properties in composites based on ferroelectrics [Text] / V.Yu. Topolov, C.R. Bowen. – London: Springer, 2009. – 202 p.

**Нагаенко Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 10, телефон: +7 (904)5061082, e-mail: [nagaenko@sfnu.ru](mailto:nagaenko@sfnu.ru).

**Полянский Тимофей Алексеевич**, студент, Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 10, телефон: +7 (953)0858223, e-mail: [tpolianskii@sfnu.ru](mailto:tpolianskii@sfnu.ru).

**Nagaenko Alexander Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of the Institute of High Technologies and Piezotechnics of the Southern Federal University, Russia, Rostov-on-Don, 10 Milchakova str., phone: +7 (904)5061082, e-mail: [nagaenko@sfnu.ru](mailto:nagaenko@sfnu.ru).

**Polyansky Timofey Alekseevich**, student, Institute of High Technologies and Piezotechnics of the Southern Federal University, Russia, Rostov-on-Don, 10 Milchakova str., phone: +7 (953)0858223, e-mail: [tpolianskii@sfnu.ru](mailto:tpolianskii@sfnu.ru).

УДК 666.655

Мараховский Михаил Алексеевич, Дыкина Любовь Александровна,  
Филь Вадим Владимирович, Панич Александр Анатольевич

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСНЫХ ФАЗ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ НА СВОЙСТВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ СИСТЕМЫ ЦТС**

*В процессе исследования определены зависимости влияния примесей исходного сырья на диэлектрические и электрофизические свойства сегнетоэлектрического материала системы ЦТС. Установлена актуальность намеренного введения примесей K и Na в систему ЦТС с целью снижения значений относительной диэлектрической проницаемости на 40-45 %. Такое примесное легирование приводит к повышению значений удельной чувствительности по напряжению ( $g_{33}$ ) в 1,4 раза. Сегнетоэлектрические материалы такого формата представляют практический интерес для создания акустических преобразователей.*

*Сегнетоэлектрический материал, исходное сырьё, примесная фаза, микроструктура, удельная чувствительность по напряжению.*

Marakhovskiy Mikhail Alekseevich, Dykina Lyubov Alexandrovna,  
Fil Vadim Vladimirovich, Panich Alexander Anatolyevich

## **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF IMPURITY PHASES OF THE FEEDSTOCK ON THE PROPERTIES OF FERROELECTRIC CERAMICS OF THE CTS SYSTEM**

*In the course of the study, the dependences of the influence of impurities in the feedstock on the dielectric and electrophysical properties of the ferroelectric material of the PZT system were determined. The relevance of the intentional introduction of K and Na impurities into the PZT system in order to reduce the values of relative permittivity by 40-45% has been established. Such impurity alloying leads to an increase in the values of the specific stress sensitivity ( $g_{33}$ ) by 1.4 times. Ferroelectric materials of this format are of practical interest for the creation of acoustic transducers.*

*Ferroelectric material, feedstock, impurity phase, microstructure, specific stress sensitivity.*

## **Введение**

При серийном изготовлении сегнетоэлектрических материалов системы ЦТС периодически наблюдается присутствие различных примесных фаз в исходном сырье [1-6]. Происхождение примесей и их концентрация в исходном сырье чаще всего варьируются для фиксированного компонента от партии к партии. Наличие таких примесей способно существенно повлиять на конечные свойства сегнетоэлектрических материалов и керамик на их основе [7-10].

Целью данной работы было исследование влияния на электрофизические параметры сегнетоэлектрических материалов ионов металлов примесных фаз исходного сырья.

## **Основная часть**

Спектральный анализ базового исходного сырья ( $\text{PbO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ) сегнетоэлектрических материалов системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), выполненного на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре (ARL OPTIM<sup>™</sup>X 200W), выявил группу примесных фаз (Sb, Na, Bi, K, Fe) различной концентрации.

С целью исследования влияния на электрофизические параметры сегнетоэлектрических материалов ионов металлов примесных фаз исходного сырья, было проведено намеренное введение примесных добавок в состав исходного сегнетоэлектрического материала. Концентрация вводимых добавок составляла 0,5–2 %.

В качестве модельного объекта исследования был выбран сегнетоэлектрический материал системы ЦТС со структурой перовскита и номинальной химической формулой  $(\text{Pb}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3 + 1\% \text{Nb}_2\text{O}_5$ . Указанный состав характеризуется высокими значениями относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 \sim 1620$ -1980), относительно высокими значениями пьезоэлектрического модуля ( $d_{33} \sim 310$ -460 пКл/Н), приемлемой температурной стабильностью ( $T_k \sim 290$  °С), а также высокой воспроизводимостью свойств от партии к партии.

Сегнетоэлектрический материал указанного состава был изготовлен твердофазным синтезом с помолотом в планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 6. Синтез сегнетоэлектрического материала и спекание керамических элементов на его основе проводились в камерной печи Nabertherm L5/13/P330.

Качество спекания керамических элементов оценивалось по результатам рентгенофазового анализа, снимкам микроструктуры, полученным на

растровом электронном микроскопе (JEOL JSM-6390LA) и по значениям плотности, определёнными методом гидростатического взвешивания (аналитические весы AND-300G).

В ходе исследования наибольший интерес представляли керамические элементы из сегнетоэлектрического материала с примесями К и Na. Микроструктура и значения плотности полученных керамических элементов представлены на рис. 1.

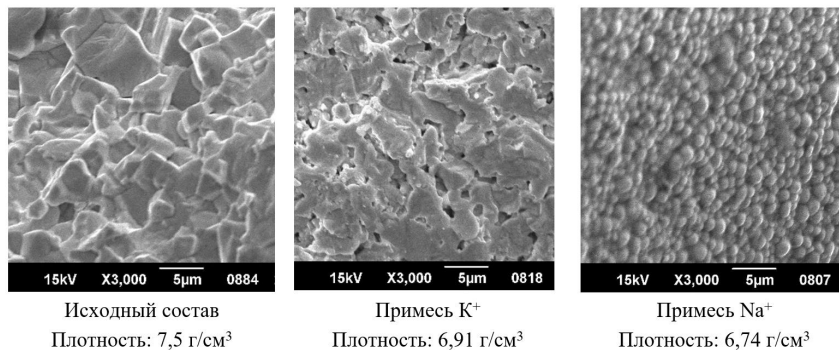


Рис. 1. Микроструктура керамических элементов полученных из исходного сегнетоэлектрического материала, а также с примесями К и Na

Примесная фаза К привела к образованию большого числа пор, формируя композиционную структуру керамики, что повлияло на снижение значений плотности. Также, композиционная структура способствовала повышению анизотропии сегнетоэлектрических элементов, а следовательно, и повышению значений удельной чувствительности по напряжению ( $g_{33}$ ), представленных в табл. 1.

Таблица 1

Свойства исходного сегнетоэлектрического материала, а также с примесями К и Na

Сегнетоэлектрический	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$d_{33}$ , пКл/Н	$d_{31}$ , пКл/Н	$g_{33}$ , мВ·м/Н	$g_{31}$ , мВ·м/Н	$V_1^E$ , м/с
Исходный со-	1620-	310-460	150-200	21,6-	10,5-	2950-
Примесь К <sup>+</sup>	726-970	240-320	81-120	37,3-	12,6-	2820-
Примесь Na <sup>+</sup>	956-998	288-308	108-111	34,5-	12,4-	2860-

Примесная фаза Na способствовала формированию зёрен округлой формы с размерами 1-2 мкм, что в 5-8 раз меньше размеров зёрен керамики исходного состава. Однако, уменьшение размеров зёрен приводит к снижению значений относительной диэлектрической проницаемости, поскольку увеличивается концентрация межзёренных границ, не обладающих сегнетоэлектрическими свойствами (рис. 1). Такая корректировка свойств отражается на повышении значений удельной чувствительности по напряжению ( $g_{33}$ ) (табл. 1).

Данные полученные в процессе исследования соответствуют концентрации вводимых примесей 2 %. Вероятно, что с повышением концентраций примесей возможно формирование иной керамической структуры и новых конечных свойств.

### **Выводы**

В результате исследования установлены зависимости влияния примесей на диэлектрические и электрофизические свойства сегнетоэлектрического материала системы ЦТС. Анализ полученных результатов показал актуальность намеренного введения примесей K и Na с целью снижения значений относительной диэлектрической проницаемости на 40-45 % (до значений  $\epsilon/\epsilon_0 = 720 - 970$ ). Это сопровождается повышением значений удельной чувствительности по напряжению ( $g_{33}$ ) в 1,4 раза. Такой модифицированный состав сегнетоэлектрического материала может быть использован в электронно-акустических преобразователях, работающих в режиме приёма.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ: государственное задание в области научной деятельности, проект № FENW-2022-0033.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Haun, M. J., Furman, E., Jang, S. J. et al.*, Journal of Applied Physics. 62 8 (1987).
2. *Малыхин А. Ю., Дыкина Л. А., Опарина А. Э. и др.*, патент № 2024620147 Российская Федерация. 11.01.2024.
3. *Bhatti, H. S., Hussain, S. T., Khan, et al.*, Applied Surface Science. 367, (2016).
4. *Wight J.* Cellular Ceramics—Structure Manufacturing, Properties and Applications (Wiley-VCH, Weinheim, 2005).
5. *Pabst W. et al.*, Processing, microstructure, properties, applications and curvature-based classification schemes of porous ceramics, Alan Newton, ed. (NY, Nova Science Publishers Inc., 2017).



6. *Lee S. H. et al.*, Fabrication of porous PZT-PZN piezoelectric ceramics with high hydrostatic figure of merits using camphene-based freeze casting, *J. Am. Ceram. Soc.* 90 (9), 2807 (2007). DOI: [10.1111/j.1551-2916.2007.01834.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01834.x)

7. *Zeng T. et al.*, Effects of pore shape and porosity on the properties of porous PZT 95/5 ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.* 27 (4), 2025 (2007). DOI: [10.1016/j.jeurceram-soc.2006.05.102](https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2006.05.102)

8. IEEE standard on piezoelectricity, in ANSI/IEEE Std, (NY: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1988). DOI: [10.1109/IEEESTD.1988.79638](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1988.79638)

9. *Shvetsova N. A. et al.*, Method of electromechanical characterization of ferroelectric materials, *Ferroelectrics* 561 (1), 100 (2020). DOI: [10.1080/00150193.2020.1736921](https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1736921)

10. *Aleshin V. A. et al.*, Piezoelectric properties of layered bismuth-containing ferroelectric ceramics with a high degree of texture, *J. Tech. Phys.* 59, 152 (1989). DOI: [10.1080/00150190211810](https://doi.org/10.1080/00150190211810)

**Мараховский Михаил Алексеевич**, кандидат технических наук, начальник сектора, Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова, 10, 344090, телефон: +7-904-501-54-31, email: [marmisha@mail.ru](mailto:marmisha@mail.ru).

**Дыкина Любовь Александровна**, начальник лаборатории, Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова, 10, 344090, телефон: +7-904-341-54-95, email: [diykinala@mail.ru](mailto:diykinala@mail.ru).

**Филь Вадим Владимирович**, младший научный сотрудник, Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова, 10, 344090, телефон: +7-988-996-81-73, email: [vfil@sfedu.ru](mailto:vfil@sfedu.ru).

**Панич Александр Анатольевич**, доктор технических наук, директор, Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова, 10, 344090, телефон: +7 (903) 488-88-87, email: [rectt.rectt@mail.ru](mailto:rectt.rectt@mail.ru).

**Marakhovskiy Mikhail Alekseevich**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Sector, Institute of high technologies and piezotechnics Southern Federal University, Rostov-on-Don, 10 Milchakova Street, 344090, phone: +7-904-501-54-31, email: [marmisha@mail.ru](mailto:marmisha@mail.ru).

**Dykina Lyubov Alexandrovna**, Head of the laboratory, Institute of high technologies and piezotechnics Southern Federal University, Rostov-on-Don, 10 Milchakova Street, 344090, phone: +7-904-341-54-95, email: [diykinala@mail.ru](mailto:diykinala@mail.ru).

**Fil Vadim Vladimirovich**, Junior researcher, Institute of high technologies and piezotechnics Southern Federal University, Rostov-on-Don, 10 Milchakova Street, 344090, phone: +7-988-996-81-73, email: [vfil@sfedu.ru](mailto:vfil@sfedu.ru).

**Panich Alexander Anatolievich**, doctor of engineering, director, Institute of high technologies and piezotechnics Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, st. Milchakova 10, phone: +7 (903) 488-88-87, email: [rctt.rctt@mail.ru](mailto:rctt.rctt@mail.ru).

УДК 54-07

Панич Евгений Анатольевич

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ  
НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФАЗ  
КИСЛОРОДНО-ОКТАЭДРИЧЕСКОГО ТИПА**

*Современное развитие материаловедения неразрывно связано с созданием «умных» материалов и структур. Особая роль отводится «умным» материалам, которые предназначены для решения ключевых задач при создании изделий и структур с высоким уровнем функциональности. К ним относятся многофункциональные материалы, приоритетное место среди которых занимает сегнето-пьезоэлектрическая ЦТС-керамика (цирконат-титанат свинца), являющаяся основным материалом для датчиков и твердотельных актюаторов в устройствах электроники различного назначения [1]. Разработке перспективных структур, которые могут одновременно выполнять функции как сенсоров, так и актюаторов, отводится ведущая роль. Значительный интерес в этих исследованиях представляют пьезоэлектрические композиты.*

*В этой связи целью работы являлось исследование технологических особенностей шликерного литья и горячего прессования перспективных отечественных сегнетопьезоматериалов для получения активных элементов, служащих основой пьезокомпозитов.*

*Пьезокерамика, тонкопленочные элементы, пьезокомпозиты, датчики, актюаторы, шликерное литье, горячее прессование.*

Panich Evgeny Anatolyevich

## FEATURES OF TECHNOLOGIES FOR OBTAINING COMPOSITE PIEZOMATERIALS BASED ON OXYGEN-OCTAHEDRAL FERROPHASES

*The modern development of materials science is inextricably linked with the creation of "smart" materials and structures. A special role is given to "smart" materials, which are designed to solve key tasks in creating products and structures with a high level of functionality. These include multifunctional materials, the priority among which is piezoelectric CTS ceramics (lead zirconate titanate), which is the main material for sensors and solid-state actuators in electronics devices for various purposes [1]. The development of promising structures that can simultaneously perform the functions of both sensors and actuators is given a leading role. Piezoelectric composites are of considerable interest in these studies.*

*In this regard, the aim of the work was to study the technological features of slip casting and hot pressing of promising domestic piezo materials for the production of active elements that serve as the basis of piezo composites.*

*Piezoceramics, thin-film elements, piezocomposites, sensors, actuators, slip casting, hot pressing.*

**Materials and methods.** The production of active ferroceramic elements was carried out by the method of slip casting and the method of hot pressing. In both cases, the task was to produce thin (50-150 microns) plates using modern high-tech equipment.

**Research results and conclusion.** Based on the conducted research in the field of creation of piezo composites 3-0, the technological parameters for the production of CTS elements with a thickness of 50-150 microns, which are an integral part of ferroceramic multilayer piezoactuators and adaptive optics matrices, have been determined. The technology of high-density active piezoelectric elements for the construction of devices based on piezo composites 1-3 is also shown. The developed technology serves as the basis for the creation of piezo composites for the design of innovative devices.

### **Введение**

Анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что разработка перспективных многофункциональных материалов, таких как сегнетопьезоэлектрическая керамика, которая в ближайшей и среднесрочной

перспективе будет являться основным материалом для пьезоэлектрических датчиков и твердотельных актюаторов, применяемых в различных устройствах современной электроники, по-прежнему активно продолжается. Постоянно ведутся работы по улучшению электрофизических параметров существующих составов пьезокерамики, а также технологий получения ЦТС тонких пленок, пьезоволокон и пьезокомпозитов.

Последние достижения в технологии производства пьезоматериалов позволили разрабатывать такие структуры, которые могут выполнять одновременно функции, как сенсоров, так и актюаторов. Этим критериям отвечают активные пьезоэлектрические композиты, которые могут использоваться, например, в устройствах виброкомпенсации и виброизоляции, ПАВ преобразователях, датчиках деформации и утилизации электроэнергии. Отсюда вытекает необходимость совершенствования технологии получения пьезокомпозитов на базе отечественных функциональных пьезоматериалов.

### Основная часть

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований технологических особенностей шликерного литья и горячего пресования отечественных перспективных пьезокерамических материалов (табл. 1) с целью получения активных элементов для создания пьезокомпозитов, являющихся основой инновационных устройств.

Таблица 1  
Электрофизические характеристики перспективных сегнетопьезокерамических ЦТС-материалов [2]

Материал	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	tg $\delta$ , не более	$K_p$ не менее	$Q_m$	$ d_{31} $ , пКл/Н	$d_{33}$ , пКл/Н	$T_c$ , °С
<i>Материалы сегнетомягкие</i>							
ЦТС-19	1620-1980	0,026	0,50	50-120	150-200	310-460	290
ПКП-12	3500-4500	0,030	0,55	60-100	270-330	700-800	180
ЦТС-83Г*	1300-1600	0,030	0,50	65-100	120-160	260-340	340
* - рабочий температурный диапазон – до 300 °С							
<i>Сегнетожесткие материалы</i>							
ПКП-31	900-1100	0,003	0,58	2000	130-180	200-220	325

Критерием классификации композитов является связность [3]. Из 10 возможных типов связности для двухфазных компонентов в нашем исследовании рассматривались два типа, представляющие наибольший практический интерес:

- а) 3-0 - изолированные газовые поры в пьезоактивной матрице;
- б) 1-3 - пьезоактивные стержни в пьезопассивной матрице.

Для каждого типа связности были разработаны технологические способы получения активных элементов пьезоактюаторов:

1. Шликерное литье для получения пленочных элементов толщиной до 50-100 мкм [4].

2. Метод резки монолитных высокоплотных сегнетокерамических блоков на тонкие твердотельные пластины/стержни [5] заданных размеров.

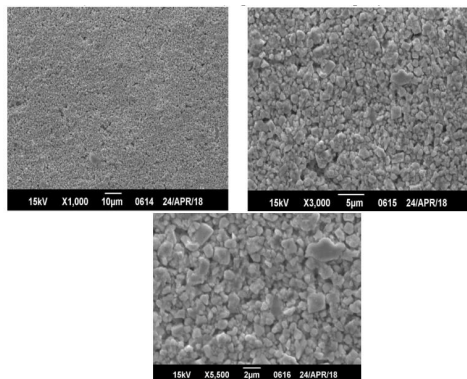
**Шликерное литье для получения тонких сегнетокерамических элементов** из ЦТС-порошков включало следующие этапы:

- дезинтеграция порошка в жидкой среде;
- приготовление шликера, состоящего из пьезокерамического материала, который смешивали с добавлением растворителя, пластификатора и органического связующего.

Смешивание компонентов проходило в агатовой шаровой мельнице типа «Пульверизете» Fritsch (Германия). Подготовленный шликер выливался на непрерывно движущуюся ленту литьевой установки при скорости движения лавсановой подложки 0,4 м/мин и зазором между фильерой и лавсановой подложкой от 300 до 500 мкм.

На толщину конечной пленки, помимо задаваемой высоты фильеры оказывает значительное влияние вязкость шликера. Поэтому было проведено исследование зависимости толщины пленки от вязкости шликера. Зависимость толщины пленки от вязкости шликера определялась с помощью прибора AND SV 10. Качество вылитой шликерной пленки оценивалось по толщине, однородности и эластичности.

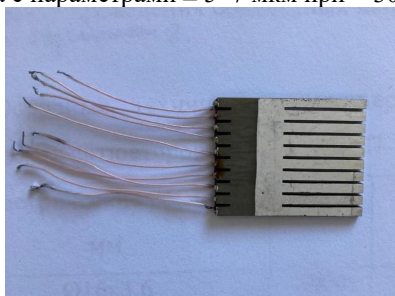
Далее высушенную пленку резали на фрагменты заданных размеров, прессовали в изостатическом прессе и спекали. Образцы спеченной керамики исследовали методами рентгенофазового (РФА) и рентгеноструктурного (РСА) анализа. Для изучения микроструктуры образцов керамики (зерен, пор) применяли метод растровой электронной микроскопии (микроскоп фирмы JEOL, Япония). Микрофотографии спеченных образцов, с различным увеличением (1000х, 3000х, 5500х) представлены на рис. 1.



*Рис. 1. Микроструктура спеченных тонкопленочных сегнетокерамических элементов, полученных методом шликерного литья*

Из микроструктуры видно, что спеченные тонкопленочные образцы обладают практически однородным распределением зерен по размеру и плотными межзеренными границами. Приоритетным направлением использования таких тонкопленочных элементов, является создание на их основе многослойных пакетов, являющихся составной частью пьезоактюаторов для прецизионных устройств перемещения. Отработка методики их получения производилась на технологической линии фирмы «Кеко» (Словения).

Экспериментальные образцы многослойных пьезоактюаторов на основе пьезоматериала ПКП-12 были изготовлены **для устройств адаптивной оптики**. На рис. 2 показан четырехслойный актюатор для матрицы адаптивного зеркала с параметрами  $\pm 5 \div 7$  мкм при + 300В; - 200В.

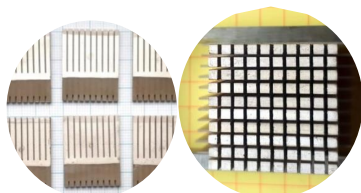


*Рис. 2. Внешний вид пьезоактюатора для матрицы адаптивного зеркала*

**Метод резки монолитных блоков.** Изготовление высокоплотных чувствительных элементов в виде стержней различной формы

пьезокомпозитов 1-3 производилось путем распила крупногабаритных блоков, полученных на установке горячего прессования УГП-110 [5], что позволило получать беспористую сегнетокерамику с плотностью, достигающей 0,99 от теоретической. Порошки для формовки сегнетокерамических блоков изготавливались по низкотемпературной технологии синтеза, что в совокупности с воздействием давления, снизило температуру спекания на 150-200°С и позволило получить высокие значения электрофизических и механических параметров образца.

На рис. 3 приведены разработанные в ходе исследований пьезокомпозиты связности 1-3, полученные методом горячего прессования, где в качестве активных элементов использованы многослойные стержни размером (4,5x4,5x7,5)мм из высокоэффективных пьезокерамических материалов. Данные пьезосборки актуальны при создании управляемых корректоров волнового фронта.



Габариты актюатора в матрице	от 1,5 x 1,5 x 18 мм
Материал	ПКП-12, ПКР-7М
Управляющее напряжение	0-300 В
Перемещение	до 18 мкм

Рис. 3. Примеры разработанных пьезосборок и их характеристики

Самостоятельным направлением развития композиционных пьезоматериалов являются **пористые пьезокомпозиты на основе связности 3-0**. Они являются основой высокочувствительных элементов в системах неразрушающего контроля и диагностики, а также в гидроакустических преобразователях. Основным критерием при выборе пьезоматериала для использования в гидроакустических системах являются величина объемного пьезомодуля  $d_v$  и объемная чувствительность  $q_v$ . На рис. 4 представлена зависимость  $g_v$  и  $d_v$  от пористости.

Разработанные технологии позволяют управлять размером и геометрией пор, точно задавать необходимые параметры и варьировать свойства пьезокомпозитов данного типа.

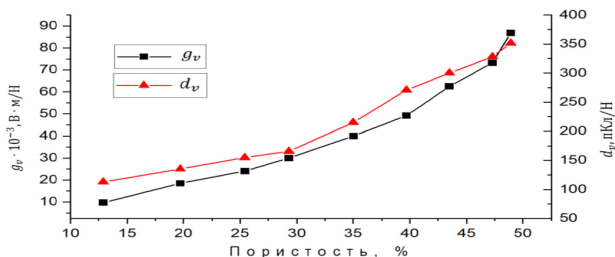


Рис. 4. Зависимость характеристик изделия (объемная чувствительность  $g_v$  и объемный пьезомодуль  $d_v$ ) от пористости композита

В результате проведенных исследований была разработана конструкция чувствительного элемента для гидроакустического приёмника радиоакустического бую, которые успешно прошли натурные испытания.

### Выводы

1. Разработан способ получения сегнето- пьезокерамических ЦТС- пленок толщиной  $50 \div 150$  мкм методом шликерного литья. При этом: установлен оптимальный состав и вязкость шликера; определены технологические параметры регулирования толщины пленки оптимизацией зазора между фильерой и лавсановой подложкой; предложена технологическая схема и оборудование для получения тонкопленочных пьезоэлементов, служащих основой многослойных пакетов-пьезоактюаторов. На базе сегнето- пьезоматериала ПКП-12 разработаны экспериментальные образцы многослойных актюаторов для адаптивной оптики; разработана технология получения высокоплотных активных пьезоэлементов с управляемыми электрофизическими параметрами для конструирования устройств на основе пьезокомпозигов 1-3.

2. Показана возможность получения пористых пьезокомпозигов 3-0. Установлен критерий выбора процента пористости пьезоматериала для конкретных задач гидроакустики.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гориш А.В. Пьезоэлектрическое приборостроение / А.В.Гориш, В.П. Дудкевич, М.Ф. Куприянов, А.Е Панич., А.В. Турик. Под ред. А. В. Гориша. М.: Ред. журн. "Радиотехника", 1999/ Т. 1: Физика сегнетоэлектрической керамики. Т. 1. - 1999. 367 с.
2. Каталог пьезокерамических материалов и элементов НКТЬ «Пьезоприбор» // Ростов-на-Дону, 2020, <https://ivtipt.ru/pm>.



3. *Topolov V.Y* Electromechanical properties in composite based on ferroelectrics / V.Y. Topolov, C.R. Bowen. London : Springer. 2009. 202 с

4. *Панич Е.А., Байдаров Р.А., Дыкина Л.А., Бардин В.А.* Исследование процесса шликерного литья тонкопленочных элементов системы ЦТС. Сборник трудов III молодежной всероссийской с международным участием научной конференции, посвященной 20-летию Факультета высоких технологий «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». - Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2021. С. 214-218.

5. *Панич А.Е., Куприянов М.Ф.* Физика и технология сегнетокерамики. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета. 1989. 180 с.

**Панич Евгений Анатольевич**, начальник лаборатории разработки технологического и контрольно-измерительного оборудования Научного конструкторско-технологического бюро «Пьезоприбор» Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова, 10, 344090, телефон +7 (918) 558-71-86, e-mail: [2987186@gmail.com](mailto:2987186@gmail.com).

**Panich Evgeny Anatolyevich**, Head of the Laboratory for the development of technological and control-measuring equipment of the Scientific Design and Technology Bureau "Piezopribor" of the Institute of High Technologies and Piezotechnics of the Southern Federal University, Russia, Rostov-on-Don, Milchakova Street, 10, 344090, phone +7 (918) 558-71-86, e-mail: 2987186@gmail.com.

УДК 621.375.9

Жук Алексей Андреевич, Сергеенко Марсель Алексеевич

## **АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫЙ ВЫХОДНОЙ КАСКАД БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ С ВХОДНЫМ P-N-P БИПОЛЯРНЫМ ТРАНЗИСТОРОМ**

*Предлагаются схемы выходных каскадов (ВК) с входным GaAs биполярным транзистором для различных модификаций GaAs операционных усилителей, которые могут быть реализованы на совмещенном арсенид-галлиевом (GaAs) технологическом процессе, позволяющем создавать n-канальные полевые транзисторы с управляющим p-n переходом и GaAs биполярные p-n-p транзисторы. Приведены результаты сравнительного компьютерного моделирования статического режима, амплитудных и амплитудно-частотных характеристик ВК в среде LTspice. Предлагаемые схемотехнические решения*

*рекомендуются для применения в GaAs микромошных операционных усилителях нового поколения, а также для использования в составе различных GaAs аналоговых микроэлектронных устройств, в т.ч. работающих в условиях воздействия проникающей радиации, низких и высоких температур.*

*Операционный усилитель, выходной каскад, совмещенный технологический процесс, арсенид-галлиевый полевой транзистор, арсенид-галлиевый биполярный транзистор.*

Zhuk Aleksey Andreevich, Sergeenko Marsel Alekseyevich

## **GALLIUM-ARSENIDE OUTPUT STAGE OF HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER WITH INPUT P-N-P BIPOLAR TRANSISTOR**

*The schemes of output stages (OS) with input GaAs bipolar transistors for various modifications of GaAs operational amplifiers are proposed, which can be realized on the combined gallium-arsenide (GaAs) technological process allowing to create n-channel field-effect transistors with control p-n junction and GaAs bipolar p-n-p transistors. The results of comparative computer modeling of static mode, amplitude and amplitude-frequency characteristics of OS in LTspice environment are presented. The proposed circuit solutions are recommended for application in GaAs micropower operational amplifiers of new generation, as well as for use in various GaAs analog microelectronic devices, including those operating under the influence of penetrating radiation and low temperatures.*

*Operational amplifiers, output stages, combined technological processes, gallium-arsenide field-effect transistors, gallium-arsenide bipolar transistors.*

### **Введение**

В настоящее время в российской и зарубежной микроэлектронике уделяется повышенное внимание арсенид-галлиевым (GaAs) инструментальным и операционным усилителям (ОУ) [1-5]. Данное направление создания электронной компонентной базы относится к числу наиболее перспективных в задачах космического приборостроения. Одна из особенностей, совмещенных GaAs технологических процессов состоит в том, что они накладывают существенные ограничения на типы реализуемых транзисторов и их характеристики. Так, например, GaAs технологический процесс, предлагаемый фирмами США [6-9], а также Минским научно-исследовательским институтом радиоматериалов (ОАО МНИИРМ, г.

Минск, <https://mniirm.by/>) [10], ориентирован на изготовление аналоговых схем, содержащих только полевые GaAs транзисторы с управляющим p-n переходом и биполярные GaAs p-n-p транзисторы. Применение других полупроводниковых приборов не допускается. Это накладывает существенные ограничения на схемотехнику аналоговых устройств, реализуемых по данному технологическому процессу.

### GaAs выходной каскад с входным биполярным транзистором

В схеме GaAs ВК на рис. 1 обеспечивается контроль за режимом отсечки выходного биполярного транзистора VT1, что позволяет за счет управления по цепи базы транзистором VT2 обеспечить положительный ток в нагрузке  $R_n$ .

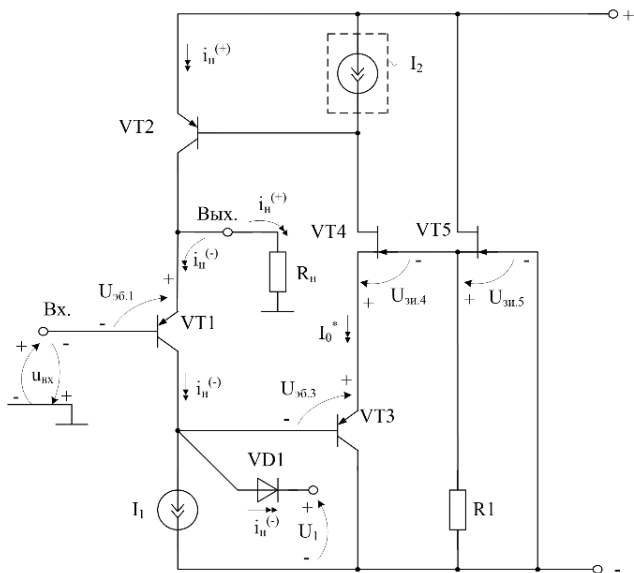


Рис. 1. GaAs ВК с входным биполярным транзистором VT1

За счет отрицательной обратной связи по цепи «биполярный транзистор VT3 – полевой транзистор VT4 – выходной биполярный транзистор VT2» статический ток эмиттера транзистора VT1 определяется током токостабилизирующего двухполюсника  $I_1$  и устанавливается разработчиком на заданном уровне  $I_0=I_1$ .

Если на вход подается положительное напряжение относительно общей шины, то это вызывает увеличение тока эмиттера выходного p-n-p

транзистора VT2 и формирование положительного тока  $i_n^{(+)}$  в нагрузке  $R_n$ . Максимальное значение тока  $I_{n,max}^{(+)}$  зависит от  $\beta$  транзистора VT2.

Когда на базу входного транзистора VT1 подается отрицательное напряжение  $u_{вх}^{(-)}$ , то этот транзистор формирует отрицательное приращение  $i_n^{(-)}$  в нагрузке  $R_n$ . В этом режиме VT2 запирается и не влияет на работу схемы. Увеличение тока коллектора транзистора VT1 на величину  $i_n^{(-)}$  приводит к отпираанию p-n перехода VD1 и, как следствие, большие значения тока  $i_n^{(-)} \geq I_0 = I_1$  будут «закорачиваться» на вспомогательный источник напряжения  $U_1$ . Это предотвращает насыщение входного транзистора VT1.

Для получения повышенных значений  $I_{n,max}^{(-)}$  в качестве входного p-n-p транзистора VT1 может применяться составной транзистор по так называемой схеме Дарлингтона (рис.2).

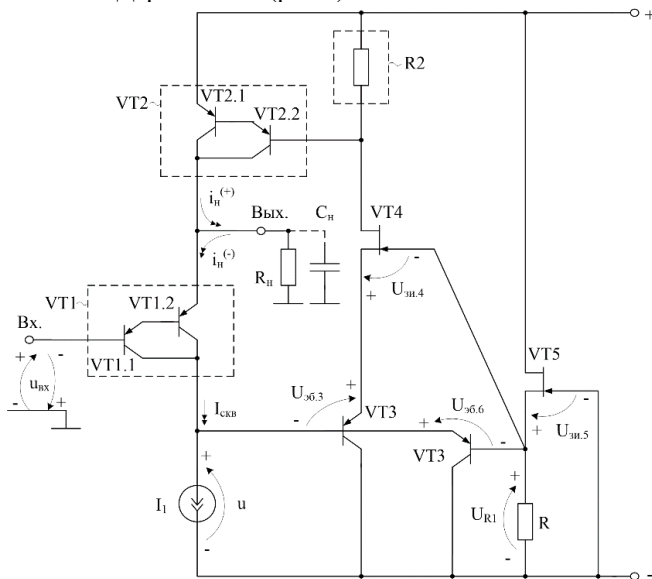


Рис. 2. Модификация предлагаемой схемы GaAs ВК с составными транзисторами VT1, VT2

**Результаты компьютерного моделирования.** Амплитудная характеристика GaAs ВК на рис. 2, представленная на графиках рис. 3 при комнатной температуре  $t=27$  °С,  $I_1=I_2=100$  мкА,  $R_1=10$  кОм,  $R_2=1$  ГОм,  $V_1=4$  В, показывает, что рассматриваемая схема при двуполярном питании

$\pm 10\text{В}$  и разных  $R_{\text{load}}$  обеспечивает выходные напряжения с максимальной амплитудой от  $-8,69\text{ В}$  до  $+9,66\text{ В}$ .

На рис. 4 приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) GaAs ВК на рис. 2 в среде LTspice. Коэффициент передачи по напряжению предлагаемой схемы на рис. 2 незначительно отличается от единицы в диапазоне частот до 1 ГГц.

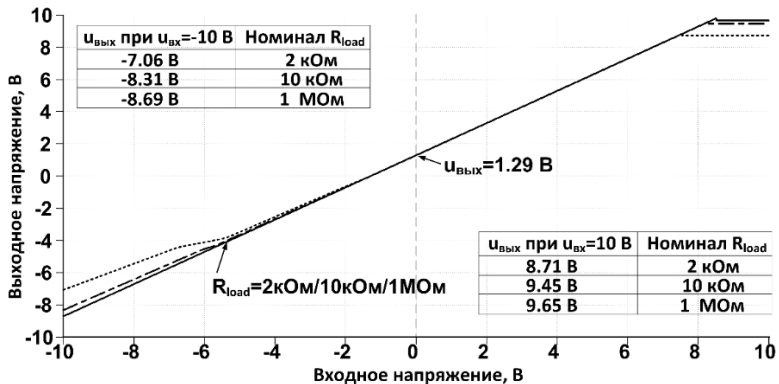


Рис. 3. Амплитудная характеристика GaAs ВК на рис. 2 в среде LTspice

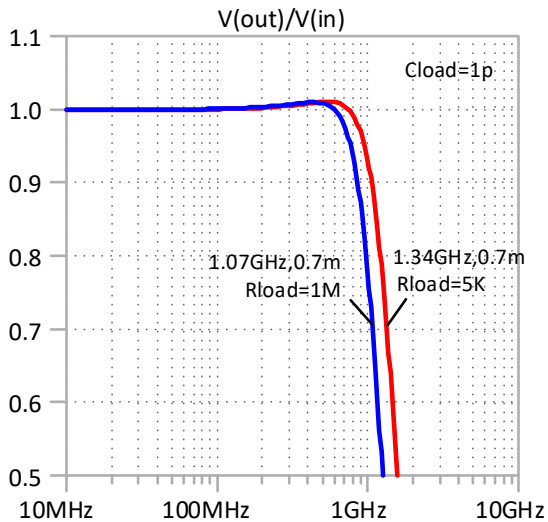


Рис. 4. ЛАЧХ GaAs ВК на рис.2

Амплитудная характеристика ВК на рис. 1, представленная на рис. 5, показывает, что рассматриваемая схема при двуполярном питании  $\pm 10\text{В}$  и разных  $R_{\text{load}}$  обеспечивает выходные напряжения с максимальной амплитудой от  $-8,69\text{ В}$  до  $+9,66\text{ В}$ .

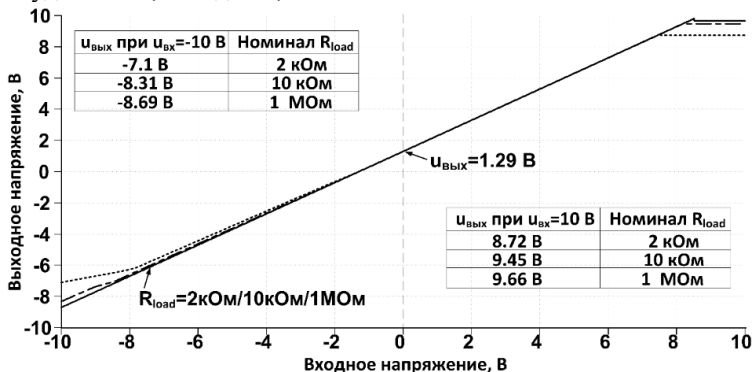


Рис. 5. Амплитудная характеристика GaAs выходного каскада на рис.6 в среде LTspice при  $t=27^\circ\text{C}$ ,  $R_{\text{load}}=2\text{кОм}/10\text{кОм}/1\text{МОм}$ ,  $I_1=100\text{ мкА}$ ,  $R1=14\text{ кОм}$ ,  $R2=10\text{кОм}$

На рис. 6 приведена ЛАЧХ GaAs ВК на рис.1 в среде LTspice при  $t=27^\circ\text{C}$ ,  $R_{\text{load}}=5\text{кОм}/1\text{МОм}$ ,  $I_1=100\text{ мкА}$ ,  $R1=14\text{ кОм}$ ,  $R2=10\text{кОм}$ . Коэффициент передачи по напряжению схемы на рис. 1 также незначительно отличается от единицы в диапазоне частот до 1 ГГц.

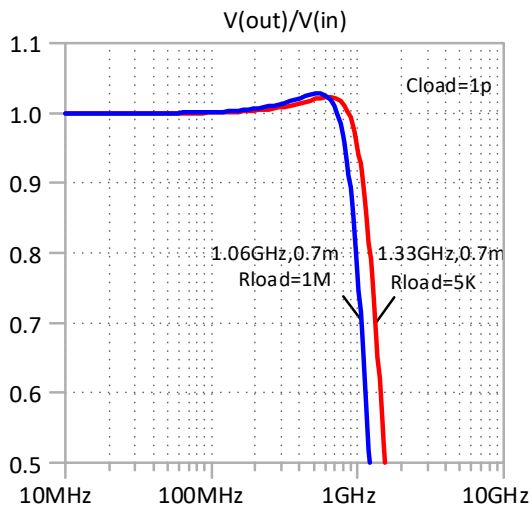


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика GaAs выходного каскада на рис.1 в среде LTspice

### Заключение

Компьютерное моделирование (рис. 3-рис. 6) показывает, что предлагаемый GaAs выходной каскад, схемотехника которого адаптирована на применение в широком диапазоне температур и воздействия проникающей радиации, имеет существенные достоинства в сравнении с известными вариантами построения ВК при его реализации в рамках арсенид-галлиевого технологического процесса, обеспечивающего создание только полевых транзисторов с управляющим р-п переходом и биполярных р-п-р транзисторов.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 23-79-10069, <https://rscf.ru/project/23-79-10069/>)**

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Du X., Hua N., Chen K., Shen Y., Wang J. and Wang Z. A miniaturized S-band GaAs SSPA for Satellite Application // 2021 2nd China International SAR Symposium (CISS), Shanghai, China, 2021, pp. 1-4.
2. Chumakov V., Bugakova A., Prokopenko N., Kunts A. Circuitry Features of the Gallium Arsenide Operational Amplifier and its Basic Functional Units // 2022

- International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russian Federation, 2022, pp. 199-202. DOI: 10.1109/APEDE53724.2022.9913002.
3. *Ma Y.* A bias circuit for the thermal stability of GaAs HBT power amplifier // *Electronics Letters*. 2021. Vol. 57. No. 22. Pp. 839-841.
  4. *Khobragade R. D., Vidhale B. R.* Design and analysis of V-Band Low Noise Amplifier for High Speed Data Application using GaAs pHEMT Process Technology // *IEEE Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*, 2023. Pp. 1-4.
  5. *Yan J., Thangarasu B. K. and Yeo K. S.* RF mixer design techniques using GaAs process // *2017 IEEE 12th International Conference on ASIC (ASICON)*, Guiyang, China, 2017, pp. 1013-1016, DOI: 10.1109/ASICON.2017.8252650.
  6. *Fresina M.* Trends in GaAs HBTs for wireless and RF // *IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting/ Atlanta, GA, USA, 2011*, Pp. 150-153. DOI: 10.1109/BCTM.2011.6082769.
  7. *Zampardi P. J., Sun M., Cismaru C. and Li J.* Prospects for a BiCFET III-V HBT Process // *2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, La Jolla, CA, USA, 2012, Pp. 1-3. DOI: 10.1109/CSICS.2012.6340116.
  8. *Liu W., Hill D., Costa D., Harris J. S.* High-performance microwave AlGaAs-InGaAs Pnp HBT with high-DC current gain // *in IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1992, Vol. 2, No. 8, Pp. 331-333. DOI: 10.1109/75.153604.
  9. *Peatman W.* InGaP-Plus™: advanced GaAs BiFET technology and applications // *CS MANTECH Conference, Austin, Texas, USA, 2007*, Pp. 243-246.
  10. *Дворников О.В., Павлючик А.А., Прокопенко Н.Н., Чеховский В.А., Кунц А.В., Чумаков В.Е.* Унифицированные схмотехнические решения аналоговых арсенид-галлиевых микросхем // *Известия вузов. Электроника*. 2022. Т. 27. № 4. С. 475–488. DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-4-475-488.

**Жук Алексей Андреевич**, ассистент кафедры «Информационные системы и радиотехника» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000, телефон: +79185880301, email: [alexey.zhuk96@mail.ru](mailto:alexey.zhuk96@mail.ru).

**Сергеенко Марсель Алексеевич**, студент кафедры «Информационные системы и радиотехника» Донского государственного технического университета, Россия,



город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000, телефон: +79185704519, email: [mars1327el@gmail.com](mailto:mars1327el@gmail.com).

**Zhuk Alexey Andreevich**, assistant of Department of Information Systems and Radio Engineering of Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, 1 Gagarin square, 344000, phone: +79185880301, email: [alexey.zhuk96@mail.ru](mailto:alexey.zhuk96@mail.ru).

**Sergeenko Marsel Alekseyevich**, student of Department of Information Systems and Radio Engineering of Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, 1 Gagarin square, 344000, phone: +79185704519, email: [mars1327el@gmail.com](mailto:mars1327el@gmail.com).

УДК: 004.932: 519.64

Васильев Константин Александрович

## **ПРИМЕНЕНИЕ РАЗМЫТИЯ ДЛЯ МАСКИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ И УРОВНЯ ФРЕДГОЛЬМА ПЕРВОГО РОДА ДЛЯ ЕЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

*Маскирование информации является важной и актуальной проблемой при передаче информации по незащищенным каналам связи. При этом возникает новая задача – корректное восстановление информации на принимающей стороне. Данная задача относится к классу некорректных задач и потому требуются специальные математические методы для ее решения. В статье приведены примеры маскирования информации и описывается один из возможных способы ее восстановления на принимающей стороне.*

*Размытие изображения, ядро оператора, стабилизирующий функционал, параметр регуляризации, восстановленное изображение.*

Vasilev Konstantin Alexandrovich

## **USING OF BLUR FOR MASKING INFORMATION AND FREDHOLM'S EQUATION OF FIRST KIND FOR RESTORATION**

*Masking of information is an important and actual problem for transmitting information over unsecured communication channels. In this case, a new task arises - the correct restoration of information on the receiving side. This problem belongs to the class of ill-posed problems and therefore requires special mathematical methods to*

*solve it. The article provides examples of masking information and describes one of the possible ways to restore it on the removable side.*

*Image blur, operator kernel, stabilizing functionality, regularization parameter, reconstructed image.*

## ВВЕДЕНИЕ

Системы технического зрения (СТЗ) призваны и во многих случаях уже решают задачи по дополнению или даже замене человека в областях деятельности, связанных со сбором и анализом зрительной информации. Чтобы СТЗ могла корректно распознать изображение, нужно предварительно удалить шум, который мог возникнуть в процессе оцифровки. Для этого, в системе предварительной обработки изображения, используются фильтры, на основе свертки ядра (маски) оператора размером  $(2k + 1) \times (2k + 1)$  с фрагментом изображения [1]

$$AI_{ij} = a * I = \sum_{s=-k}^k \sum_{t=-k}^k \alpha_{st} I_{i+s, j+t} \quad (1)$$

При увеличении размера ядра, сильнее подавляется дискретный белый шум, однако при этом растет и размытие изображения. Почти во всех областях, где применяется СТЗ, размытие осложняет решение задач более высокого уровня, таких как сегментация изображения или детектирование определенного набора интересующих точек и областей изображения.

Имеет место и обратный, положительный эффект, который происходит при размытии изображения – это маскирование информации, которая оказалась на изображении намеренно или же случайно. Так, например, в сферических изображениях улиц городов (Яндекс или Google карты) размываются лица прохожих и номера автомобилей для соблюдения закона о персональных данных.

Для процедуры маскирования изображений применяется достаточно сложные математические методы, и для получения доступа к сокрытой конфиденциальной информации третьим лицам потребуются серьезные временные и финансовые затраты, которые в редких случаях принесут эффект.

При маскировании информации, передаваемой по незащищенному каналу, возникает другая проблема - проблема восстановления размытых изображений на принимающей стороне. При этом восстановление должно быть максимально корректным и минимально затратным, но, в то же время, затруднено для третьих лиц. Некорректность обратной задачи создает дополнительные преграды на пути несанкционированного доступа к передаваемой информации.

## ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Алгоритм генерирования сигнала с несовершенной аппаратной функцией описывается интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода [2-5]

$$\int_a^b K(x, s) \cdot \varphi(s) ds = f(x), \quad a \leq x, s \leq b \quad (2)$$

для одномерного сигнала и

$$\int_{ca}^{db} \int K(x, y, t, s) \cdot \varphi(t, s) dt ds = f(x, y), \quad x, y \in [a, b] \times [c, d] \quad (3)$$

- для двумерного (изображения). В (2) и (3)  $K(x, s)$ ,  $K(x, y, t, s)$  - ядра интегрального уравнения (аппаратная функция прибора);  $f(x)$ ,  $f(x, y)$  - наблюдаемые сигналы (изображения);  $\varphi(s)$ ,  $\varphi(t, s)$  - истинные сигналы, которые должны быть найдены в результате решения уравнений (2) и (3). Похожие задачи появляются в компьютерной томографии, рентгенографии и экспериментах по рассеянию частиц [2-4].

Проблема, возникающая при восстановлении сигнала в реальных системах, заключается в том, что правая часть уравнения (2) или (3) – функция  $f$  - известна неточно. Вместо нее наблюдается функция  $\tilde{f}_\delta = f + \xi$  такая, что :  $\|\tilde{f}_\delta - f\|_2 \leq \delta$ . При этом, как известно [2], даже малые изменения функции  $f$  могут приводить к большим изменениям результата решения уравнения (2) или (3). Поэтому прямое использование обратного оператор  $\mathbf{A}^{-1}$  для нахождения решения задачи невозможно. Распространенный подход к поиску квазиоптимального решения заключается в замене исходной некорректной задачи задачей условной минимизации [2]:

$$(\mathbf{R}^T \mathbf{R} + \alpha \mathbf{W}) \cdot \Phi = \mathbf{R}^T \mathbf{F}, \quad (4)$$

Матрица  $\mathbf{r}$  порождена вектор-строкой  $(r_k, r_{k-1}, \dots, r_1, r_0, r_1, \dots, r_{k-1}, r_k)$ . Каждая следующая строка этой матрицы получается в результате циклического сдвига на одну позицию предыдущей строки. При этом матрица  $\mathbf{W}$  в (4) будет совпадать с единичной матрицей в случае поиска решения уравнения Эйлера в метрике пространства  $\mathbf{K}^* \mathbf{K} \varphi$ . Введем обозначения  $\mathbf{B} = \mathbf{R}^T \mathbf{R} + \alpha \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{V} = \mathbf{R}^T \mathbf{F}$ . В результате система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (4) примет следующий вид

$$\mathbf{B} \cdot \Phi = \mathbf{V}. \quad (5)$$

Матрица  $\mathbf{b}$  данной СЛАУ является симметричной, положительно определенной и. теплицевой [6]. Значит, для решения СЛАУ (5) можно

использовать устойчивые к вычислительным ошибкам, что важно для некорректных задач, и более быстрые алгоритмы. Это либо метод квадратного корня [6, 7], либо метод решения СЛАУ с теплицевой основной матрицей [6].

В данной работе поиск оптимального решения СЛАУ (5) реализован в метрике пространства  $L_2[a, b]$  с теплицевой основной матрицей  $\mathbf{B}$  по следующему алгоритму [5]:

- задается монотонно убывающая последовательность значений параметра регуляризации  $\alpha$ ;  $1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, \dots$

- для каждого значения параметра регуляризации  $\alpha_k$  формируется и решается СЛАУ (8). В результате получается параметрическое семейство решений  $\mathbf{Y}_i = \mathbf{Y}(\alpha_i)$ ;

- начиная со второго шага (со второй СЛАУ) вычисляется уклонение  $\delta_i = \|\mathbf{Y}_i - \mathbf{Y}_{i-1}\|_2$  в евклидовой метрике текущего вектора  $\mathbf{Y}_i$  от предыдущего  $\mathbf{Y}_{i-1}$ ;

- начиная с  $i = 4$  проверяется выполнение неравенств 
$$\begin{cases} \delta_i < \delta_{i-1}, \\ \delta_i < \delta_{i+1}. \end{cases}$$

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для генерации ядра искажающего оператора применялась порождающая функция вида:

$$K(x, s) = \lambda \exp\left(-\frac{(x-s)^2}{\sigma^2}\right), \quad (6)$$

где  $\lambda = 1$ ,  $s$  - центр ядра,  $\sigma$  - параметр, от которого зависит длина ненулевой части ядра. Функция (6) определена на всей числовой оси, но при этом  $K(x, s) \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \infty$ . Поэтому «хвосты» функции  $K(x, s)$  обрезаются. В результате получается вектор-строка  $(r_k, r_{k-1}, \dots, r_1, r_0, r_1, \dots, r_{k-1}, r_k)$  конечной длины  $(2k + 1)$ .

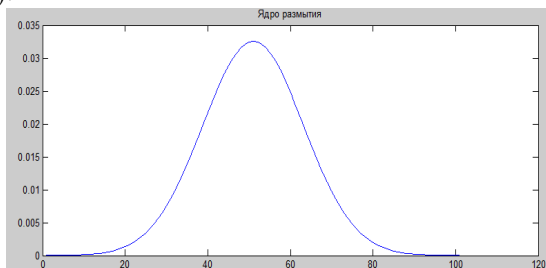


Рис. 1. Ядро размытия длины 101

Подбор параметров в формуле (6), обеспечивающих формирование вектор-строки такой длины достигается выполнением условий:  $r_k = 10^{-6}$  и  $\sum_{i=-k}^k r_i = 1$ . В итоге, разностное ядро длины  $2k+1=101$  имеет следующий вид (рис.1):

Затем формировалась матрица  $\mathbf{R}$ , в результате умножения которой на каждую строку изображения (на транспонированную матрицу  $\mathbf{I}^T$ ) каждой цветовой составляющей матрицы исходного изображения  $\mathbf{I}$ . На рис. 2,а и 2,б приведены исходное текстовое изображение и результат его размытия при указанных выше размерах вектор-строки  $(r_k, r_{k-1}, \dots, r_1, r_0, r_1, \dots, r_{k-1}, r_k)$ , порождающей ядро размытия  $\mathbf{R}$ .

Для начала попробуем размыть и восстановить одну цветовую составляющую изображения, которая по сути своей является строкой пикселей с разными яркостными значениями (рис. 2)

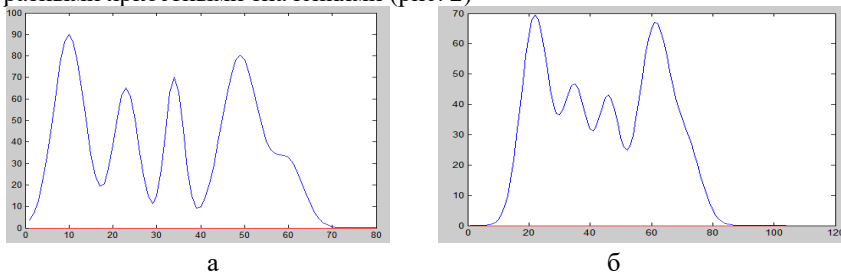


Рис. 2. Исходный одномерный сигнал (а), размытый сигнал (б)

Уже при размере ядре 25, наблюдаются искажения пиков сигнала (рис. 2, б).

Для восстановления сигнала используем описанный выше алгоритм. Составим матрицу  $\mathbf{R}$  и решим СЛАУ  $\mathbf{B} \cdot \Phi = \mathbf{V}$  с помощью теплицевой матрицы. В результате получим параметрическое семейство решений  $\mathbf{Y}_i = \mathbf{Y}(\alpha_i)$  (рис. 3,а). Квазиоптимальное решение получено при  $\alpha = 10^{-10}$  (рис. 3, б).

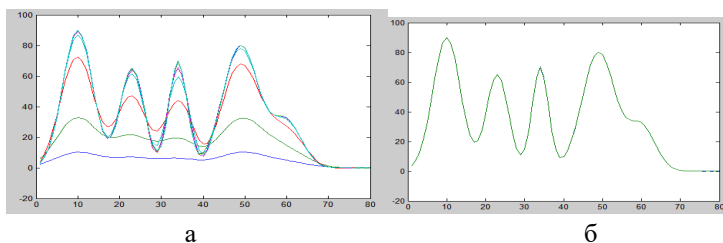


Рис. 3. Восстановленные сигналы, при различных значениях  $\alpha$

Теперь возьмем изображения текста (рис.4,а) и размоем его. Начиная с ядра размытия размером 21, буквы текста становятся малоразличимы (рис.4,б)

Следовательно, разруха не в клозетах, а в головах. Значит, когда эти баритоны кричат «бей разруху!» – я смеюсь. Клянусь вам, мне смешно! Это означает, что каждый из них должен лупить себя по затылку! И вот, когда он выплупит из себя всякие галлюцинации и займётся чисткой сараев – прямым своим делом, – разруха исчезнет сама собой. Двум богам служить нельзя! Невозможно в одно и то же время подметать трамвайные пути и устраивать судьбы каких-то испанских оборванцев!

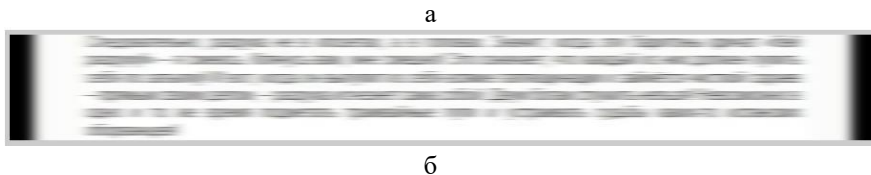


Рис. 4. Исходное изображение текста (а) и результат его размытия (б)

Во время размытия, с левого и правого края изображения появляются черные полосы (рис.4,б). Добавим к исходному изображению дополнительные пиксели слева и справа. Причем для дополнительных пикселей слева отобразим первые  $k$  элементов матрицы исходного изображения слева. Для дополнительных пикселей справа - последние  $k$  элементов каждой строки справа. Тогда  $\dim(I_{ij}) = M * (N + 2n)$ , где  $M$  – высота изображения, а  $N$  – ширина. После размытия дополненного изображения черные полосы остаются, но они приходятся на дополнительные пиксели (рис.5,а). После отбрасывания дополнительных пикселей, получаем корректное размытие.

Аналогично восстановлению исходного одномерного сигнала, проведем восстановление размытого изображения, используя следующие значения параметра регуляризации  $\alpha$ :  $[10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}]$ . Наиболее близким к

исходному изображению оказалось восстановленное изображение при значении параметра регуляризации  $\alpha = 10^{-5}$  (рис.5).

Следовательно, разуха не в клозетах, а в головах. Значит, когда эти баритоны кричат «бей разуху!» – я смеюсь. Клянусь вам, мне смешно! Это означает, что каждый из них должен пунить себя по затылку! И вот, когда он вылупит из себя всякие галлюцинации и займётся чисткой сараев – прямым своим делом, – разуха исчезнет сама собой. Двум богам служить нельзя! Невозможно в одно и то же время подметать трамвайные пути и устраивать судьбы каких-то испанских оборванцев!

Рис. 5. Восстановленное изображение при  $\alpha = 10^{-5}$

Задачи восстановления сигналов, описываемых математическими моделями в виде некорректных задач возникают в различных областях науки и практики. Примеры таких задач содержатся, в частности, в работах [8, 9].

### ВЫВОДЫ

Сформулированы задача маскирования информации с использованием матричных сверточных операторов и задача восстановления размытой информации на принимающей стороне. Рассмотрен подход на основе регуляризации А.Н. Тихонова, в рамках которого задача сводится к решению параметрического семейства систем линейных алгебраических уравнений с теплицевой основной матрицей. Приведены экспериментальные результаты размытия и восстановления как одномерного сигнала, так и изображения с текстом.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков А. И., Пронькин А. В. Методы цифровой обработки изображений подстилающей поверхности. М.: Горячая линия-Телеком. 2023. 224 с.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А. Математические задачи компьютерной томографии. - М.: Наука, 1987. – 160 с.
3. Майорова В.И., Банников А.М., Зайцев К.И. Математическое моделирование процесса радиометрической коррекции снимков дистанционного зондирования Земли // Инженерный журнал: наука и инновации.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 20 с.
4. Гончарский А.В. Обратные задачи оптики // Вестник Московского университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. 1986. №3. – С. 59-76
5. Новиков А.И., Шамин Н. О. Исследование регуляризационного метода восстановления размытых изображений // Вестник РГРТУ, № 72. С. 106-115.
6. Воеводин В.В., Тыртышиников Е.Е. Вычислительные процессы с теплицевыми матрицами. - М.: Наука, 1987. – 320 с.
7. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. - М.:

Наука, 1966. – 664 с.

8. *Борисов В.В., Новиков А.И., Чураков Е.П.* Применение факторного анализа для исследования послонных спектров // Электронное моделирование. 1994. Т. 16. №1. – 80-83.
9. *Майорова В.И., Банников А.М., Зайцев К.И.* Математическое моделирование процесса радиометрической коррекции снимков дистанционного зондирования Земли // Инженерный журнал: наука и инновации.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 20 с.
10. *Огородников И.Н.* Введение в обратные задачи физической диагностики: специальные главы высшей математики для технологов. Издательство Уральского университета 2017.

**Васильев Константин Александрович**, аспирант Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, Россия, город Рязань, улица Гагарина 59/1, телефон:79156069304, email: [cornholio62@yandex.ru](mailto:cornholio62@yandex.ru).

**Vasilev Konstantin Alexandrovich**, post-graduate of Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russia, Ryazan, Gagarina str 59/1, phone:79156069304, email: [cornholio62@yandex.ru](mailto:cornholio62@yandex.ru).

УДК 621.372.54

Денисенко Дарья Юрьевна, Бутырлагин Николай Владимирович,  
Прокопенко Николай Николаевич, Иванов Юрий Иванович

### **ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВЫЙ ФИЛЬТР НИЗКИХ ЧАСТОТ ВТОРОГО ПОРЯДКА НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРАХ С ОДНОЭЛЕМЕНТНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ ПОЛЮСА**

*Создан дискретно-аналоговый фильтр (ДАФ) низких частот (ФНЧ) второго порядка на переключаемых конденсаторах, в котором возможна перестройка частоты полюса путем изменения сопротивления одного частотозадающего резистора при постоянных значениях других параметров ДАФ. Приведены основные математические выражения для расчета коэффициентов передачи ФНЧ на нулевой частоте, коэффициентов передачи ФНЧ на частоте полюса, частоты полюса и затухания полюса. Выполнено компьютерное моделирование предлагаемого ДАФ в среде MicroCap, которое подтверждает возможность их одноэлементной перестройки.*



*Дискретно-аналоговый фильтр, фильтр низких частот, передаточная функция второго порядка, резисторы обратной связи, буферный усилитель, компьютерное моделирование.*

Denisenko Daria Yurievna, Butyrlagin Nikolay Vladimirovich,  
Prokopenko Nikolay Nikolaevich, Ivanov Yuri Ivanovich

## **DISCRETE-ANALOG LOW-FREQUENCY FILTER OF THE SECOND ORDER ON SWITCHABLE CAPACITORS WITH SINGLE-ELEMENT TUNE OF THE POLE FREQUENCY**

*A discrete-analog low-frequency filter (LPF) of the second order on switchable capacitors has been created, in which it is possible to adjust the pole frequency by changing the resistance of one frequency-setting resistor at constant values of other DAF parameters. The basic mathematical expressions for calculating the low-pass filter transmission coefficients at zero frequency, low-pass filter transmission coefficients at the pole frequency, pole frequency and pole attenuation are given. A computer simulation of the proposed DAF has been carried out in the MicroCap environment, which confirms the possibility of their single-element rearrangement.*

*Discrete-analog filter, low-pass filter, second-order transfer function, feedback resistors, buffer amplifier, computer simulation.*

### **Введение**

Дискретно-аналоговые фильтры (ДАФ) на переключаемых конденсаторах широко используются в цепях частотной селекции и обработки аналоговых сигналов в науке и технике [1-9]. Микросхемы фильтров на переключаемых конденсаторах выпускаются многими микроэлектронными предприятиями [10-12].

Основная цель и оригинальность статьи состоит в исследовании ДАФ низких частот на переключаемых конденсаторах [13] с подстройкой частоты полюса путем изменения отношения сопротивлений дополнительных резисторов в цепи общей обратной связи при фиксированной частоте коммутации электронных ключей и без изменения емкостей переключаемых конденсаторов.

**Функциональная схема дискретно-аналогового фильтра с резистивным сумматором**

На рис. 1 приведены схема дискретно-аналогового фильтра [13], в котором входной сигнал  $u_{вх}$  суммируется с выходным сигналом ДАФ с помощью резисторов общей обратной связи  $R_1$ ,  $R_2$  и буферного усилителя БУ.

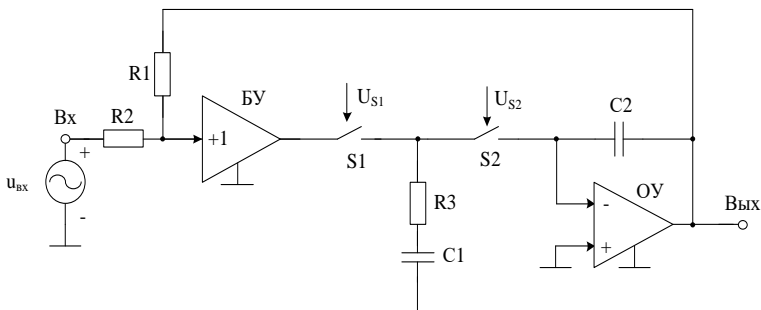


Рис. 1. Дискретно-аналоговый фильтр на переключаемых конденсаторах [13]

При последовательном и периодическом замыкании электронных ключей, а также при частоте переключения электронных ключей  $f_s$ , намного превышающей частоту полюса  $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$  для звена второго порядка, в результате математического анализа схем на рис.1 можно показать, что этими схемами реализуется передаточная функция фильтра нижних частот второго порядка

$$F(p) = \frac{M_0 \omega_p^2}{p^2 + d_p \omega_p + \omega_p^2}, \quad (1)$$

где  $M_0$  - коэффициент передачи ФНЧ на нулевой частоте,

$\omega_p$  - частота полюса,

$d_p$  - затухание полюса.

Основные параметры фильтров на рис. 1 находятся по следующим формулам:

- коэффициент передачи ФНЧ на нулевой частоте ДАФ

$$M_0 = -\frac{R_1}{R_2}, \quad (2)$$

- коэффициент передачи ФНЧ на частоте полюса для первой модификации ДАФ

$$M_{\omega_p} = -\frac{\frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{R_2}{R_2 + R_1}}}{2 \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}}, \quad (3)$$

- частота полюса для первой модификации ДАФ

$$\omega_p = \frac{\tau}{T} \frac{1}{R_3} \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2}} \sqrt{\frac{R_2}{R_2 + R_1}}, \quad (4)$$

– затухание полюса для первой модификации ДАФ

$$d_p = 2 \sqrt{1 + \frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}}. \quad (5)$$

В формулах (2-5)  $f_s$  – частота переключения электронных ключей, а  $T = 1/f_s$  – период их переключения,  $\tau$  – длительность замкнутого состояния ключей в течении периода, которая может находиться в диапазоне от 0 до  $T/2$ ,  $R_1, R_2$  – сопротивления первого  $R_1$ , второго  $R_2$  резисторов обратной связи,  $R_3$  – сопротивление частото задающего резистора  $R_3$ ,  $C_1, C_2$  – емкости первого  $C_1$  и второго  $C_2$  частото задающих конденсаторов соответственно.

На рис. 2 показаны последовательности импульсов  $Us_1$  и  $Us_2$ , управляющих электронными ключами в схемах ДАФ (рис. 1).

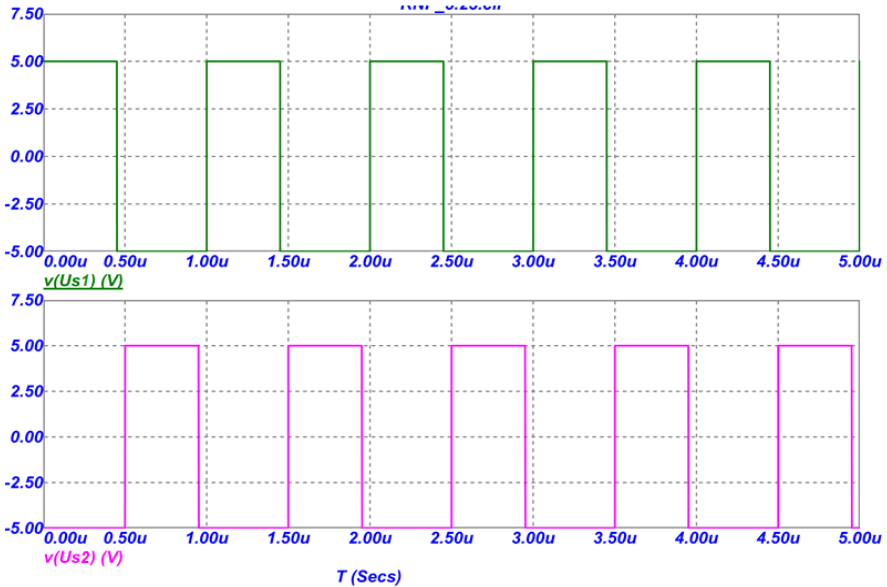


Рис. 2. Последовательности импульсов ( $Us_1, Us_2$ ), управляющих электронными ключами в схемах фильтров на рис. 1

На рис. 3 показана реакция схемы ДАФ (рис. 1) (их выходное напряжение  $v(\text{Out}_1)$ ) на входной синусоидальный сигнал  $v(\text{In})$  с амплитудой 1В

и частотой равной 11250 Гц, равной частоте полюса  $f_p$  фильтра, а также с частотой переключения электронных ключей 1МГц (их периоде 1мксек. В соответствии с формулой (3) на этой частоте при выбранных параметрах элементов коэффициент передачи ДАФ равен  $M_{\omega_p} = -3,535$ . Результаты моделирования схемы ДАФ на рис. 1 при частотах входного сигнала 11,25 Гц и 112500 Гц приведены в [13].

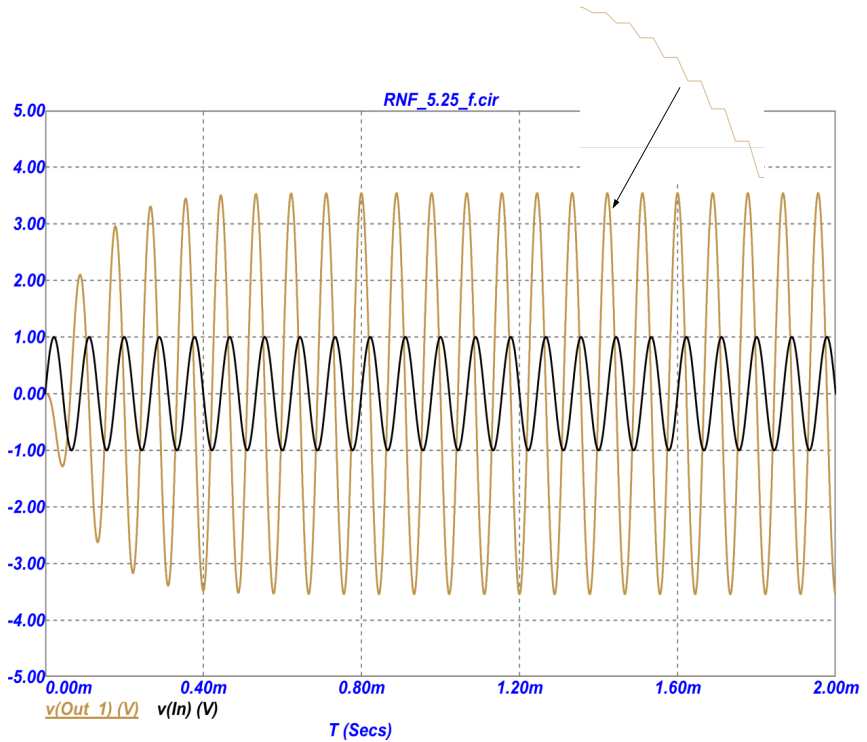


Рис. 3 Оциллограммы входных и выходных сигналов схемы ДАФ в среде Micro-Cap при частоте входного сигнала 11250 Гц

### Выводы

Разработан дискретно-аналоговый фильтр второго порядка на переключаемых конденсаторах, обладающий свойствами фильтра низких частот. ДАФ имеет близкий к единице коэффициент передачи на очень низких частотах ( $M_0 = -1$  согласно формуле (2) при  $R1=R2$ ) и близкий к нулю

коэффициент передачи на повышенных частотах, а также обладает возможностью одноэлементной перестройки частоты полюса с помощью изменения сопротивления резистора R3.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10023, <https://rscf.ru/en/project/23-79-10023/>).**

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hiroo Wakaumi*, “A Switched-Capacitor Low-Pass Filter with Dynamic Switching Bias OP Amplifiers”, *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* Vol. 2, No. 6, pp. 100-106 (2017).
2. *Tony Chan Carusone, David A. Johns, Kenneth W. Martin*. *Analog Integrated Circuit Design*. - 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. 2011, 822 p.
3. *Design of analog CMOS integrated circuits / Behzad Razavi*, professor of electrical engineering, University of California, Los Angeles. – Second edition, McGraw-Hill Education, New York, 2017, 803p.
4. *CMOS Analog Circuit Design / Phillip E. Allen*, Professor Emeritus, Georgia Institute of Technology. - Third Edition, Oxford University Press, Inc., 2012, 783 p.
5. *Microelectronic circuits / Adel S. Sedra*, University of Waterloo, *Kenneth C. Smith*, University of Toronto. — Seventh edition. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2014, 1824 pages. — (The Oxford series in electrical and computer engineering).
6. *Hugo Alexandre de Andrade Serra, Nuno Paulino*, “Design of Switched-Capacitor Filter Circuits using Low Gain Amplifiers”, Springer, 2015, 101 p.
7. *Sanjay Tumati*, “Design of Large Time-Constant Switched-Capacitor Filters for Biomedical Applications”, A Thesis, Texas A&M University, December 2004.
8. *Paolo Vinella*, “Switched Capacitor: working principles and real IC-device application”, Politecnico di Torino, URL: [https://areeweb.polito.it/didattica/corsiddc/01NVD/Studmat/Miniproject14/Vinella\\_SwCap\\_R\\_14.pdf](https://areeweb.polito.it/didattica/corsiddc/01NVD/Studmat/Miniproject14/Vinella_SwCap_R_14.pdf) (дата обращения: 20.05.2024).
9. *Seidel M.*, “Switched-capacitor networks for image processing: analysis, synthesis, response bounding, and implementation”, 1994
10. Texas Instruments, URL: <https://www.ti.com/> (дата обращения: 20.05.2024).
11. Maxim, URL: <https://eshop.analog.com/en/app/home> (дата обращения: 20.05.2024).
12. Linear Technology, URL: <https://www.analog.com/en/index.html> (дата обращения: 20.05.2024).

13. *Денисенко Д.Ю., Кузнецов Д.В., Алферова И.А., Пахомов И.В.* Дискретно-аналоговый фильтр второго порядка на переключаемых конденсаторах с двумя электронными ключами : заявка на патент РФ № 2024108217, заявл. 28.03.24.

**Денисенко Дарья Юрьевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник «Управления научных исследований» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000, телефон: +7 9896350979, email: [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com).

**Бутырлагин Николай Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник «Управления научных исследований» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000, телефон: +7 9034320799, email: [nbutyrlagin@mail.ru](mailto:nbutyrlagin@mail.ru).

**Прокопенко Николай Николаевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и радиотехника» Донской государственной технической университет, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000 телефон: +7 928 120 19 84, email: [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru).

**Иванов Юрий Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Систем автоматического управления» Южного Федерального Университета, Института радиотехнических систем и управления, , 347922, город Таганрог, пер. Некрасовский, 44. телефон: +79061833631, email: [yivanov@sfedu.ru](mailto:yivanov@sfedu.ru).

**Denisenko Daria Yur'evna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), senior researcher, Department of Scientific Research of Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, 1 Gagarin square, 344000, phone: +79896350979, email: [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com).

**Butyrlagin Nikolay Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), senior researcher at the Directorate of Scientific Research, Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, sq. Gagarina 1, 344000, phone: +7 9034320799, email: [nbutyrlagin@mail.ru](mailto:nbutyrlagin@mail.ru).

**Prokopenko Nikolay Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Information Systems and Radio Engineering» of Don State Technical University, Russia, Gagarin's sq., 1, 344010 Rostov-on-Don; phone: +7 928 120 19 84, email: [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru).

**Ivanov Yuri Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, Southern Federal University, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Russia, Taganrog st. Nekrasovsky, 44, 347922, phone: +79061833631, email: [ivanov.taganrog@mail.ru](mailto:ivanov.taganrog@mail.ru).

Пилипенко Александр Михайлович, Портных Дмитрий Александрович  
**ПРИНЦИПЫ ШАБЛОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

*В работе представлены принципы создания точных моделей элементов радиотехнических цепей на основе известных физических моделей (шаблонов). Целью работы является повышение точности моделирования элементов радиотехнических цепей при сохранении физических параметров моделей. Решены задачи идентификации параметров и оценки точности известной и шаблонной моделей p-n-перехода. Доказана эффективность применения шаблонного моделирования для аппроксимации вольт-амперной характеристики p-n-перехода.*

*Моделирование, шаблон, точность, физические параметры, элементы радиотехнических цепей.*

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich, Portnykh Dmitry Aleksandrovich  
**PRINCIPLES OF TEMPLATE MODELING OF RADIO CIRCUITS  
ELEMENTS**

*The paper presents the principles of creating accurate models of radio circuits elements on the base of known physical models (templates). The goal of the work is to increase the accuracy of modeling radio circuit elements when the physical parameters of the models are retained. The problems of parametric identification and accuracy assessment of known and template models of p-n junctions have been solved. The effectiveness of using template modeling to approximate the current-voltage characteristics of a p-n junction has been proved.*

*Modeling, template, accuracy, physical parameters, radio circuits elements.*

### **Введение**

Проектирование радиотехнических устройств обязательно включает в себя этап схмотехнического моделирования – компьютерного моделирования радиотехнической цепи, описывающей проектируемое устройство. В настоящее время пакеты схмотехнического моделирования являются неотъемлемой частью большинства систем автоматизированного проектирования (САПР) радиотехнических устройств. Среди пакетов схмотехнического моделирования можно выделить следующие программы, которые

достаточно популярны России: Multisim, Pspice, LTspice, TINA-TI и Micro-Cap. Все пакеты схемотехнического моделирования базируются на программе с открытым исходным кодом SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) и поэтому также называются SPICE-симуляторами [1].

Система моделирования фактически заменяет физический эксперимент имитационным экспериментом, который выполняется на компьютере, при этом вместо реальных компонентов используются их программные модели [2]. Таким образом, при решении задач проектирования радиотехнических устройств практически невозможно обойтись без математических моделей их элементов.

### **1. Постановка задачи**

В настоящее время отсутствуют универсальные модели элементов радиотехнических цепей, обеспечивающие приемлемую точность моделирования для различных температур и технологий производства.

Целью данной работы является обоснование принципов шаблонного моделирования, позволяющих обеспечить повышение точности моделей элементов радиотехнических цепей при сохранении их физических параметров.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

- описание принципов создания моделей элементов радиотехнических цепей с помощью физических шаблонов;
- идентификация параметров известной и шаблонной моделей р-п-перехода;
- доказательство эффективности применения шаблонного моделирования для аппроксимации вольт-амперной характеристики (ВАХ) р-п-перехода.

### **2. Синтез шаблонных моделей элементов радиотехнических цепей**

Основные принципы создания шаблонных моделей элементов радиотехнических цепей заключаются в следующем:

- шаблонная модель создается на основе известной физической модели элемента;
- один или несколько параметров исходной физической модели заменяются функциями управляющего напряжения или тока;



- для замены параметров физической модели применяется аппроксимация Паде (отношение степенных рядов):

$$P(x) = P_0 \frac{1 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_mx^m}{1 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – измеренный параметр физической модели;  $x$  – управляющее напряжение или ток;  $a_1, a_2, \dots, a_m$  и  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – эмпирические коэффициенты;  $m$  и  $n$  – целые числа.

Применение отношения степенных рядов для моделирования позволяет обеспечить монотонность ВАХ в отличие от разложения в степенной ряд, при использовании которого возможно нарушение монотонности [3].

### 3. Разработка шаблонной модели $p$ - $n$ -перехода

SPICE-модель, описывающая ВАХ  $p$ - $n$ -перехода с учетом его последовательного сопротивления, имеет следующий вид [4]:

$$I = I_S \left[ \exp\left(\frac{V - IR_S}{N\phi_T}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

где  $I$  и  $V$  – ток и напряжение  $p$ - $n$ -перехода соответственно;  $R_S$  – последовательное сопротивление;  $I_S$  – ток насыщения;  $N$  – коэффициент эмиссии;  $\phi_T = kT/q$  – термический потенциал;  $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $q \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $T$  – абсолютная температура.

Параметры модели (2)  $N$ ,  $I_S$  и  $R_S$  являются физическими параметрами  $p$ - $n$ -перехода, поэтому данную модель можно использовать в качестве исходной физической модели (шаблона) для разработки более точных шаблонных моделей  $p$ - $n$ -перехода.

Как известно, сопротивление  $R_S$  в общем случае нелинейно зависит от тока  $p$ - $n$ -перехода [5], поэтому для создания шаблонной модели данный параметр предлагается заменить функцией Паде, которая в простейшем случае имеет следующий вид [6]:

$$R_S(I) = \frac{R_{S0}}{1 + a_1 I}. \quad (3)$$

Важным этапом моделирования элементов радиотехнических цепей является параметрическая идентификация модели – определение параметров модели, обеспечивающих наилучшее совпадение экспериментальной характеристики элемента с моделью. В основе математического аппарата параметрической идентификации моделей лежат методы одномерной и многомерной оптимизации.

Параметры моделей  $p$ - $n$  перехода определяются методом наименьших квадратов из условия минимума целевой функции в качестве которой, как правило, используется сумма квадратов относительных погрешностей аппроксимации экспериментальной ВАХ. Для решения задачи поиска минимума целевой функции рекомендуется использовать алгоритм Левенберга-Марквардта с контролем точности при изменении начальных условий [6]. Точность моделирования оценивается с помощью среднеквадратической и максимальной относительных погрешностей аппроксимации ВАХ  $\sigma$  и  $\delta_{\max}$ .

На рис. 1 показаны измеренная ВАХ диода FR102, представленная в работе [7], и результаты аппроксимации данной ВАХ с помощью физической SPICE-модели (2) и шаблонной модели (2)&(3), полученной из модели (2) путем замены параметра  $R_S$  выражением (3). Результаты параметрической идентификации и погрешности моделей представлены ниже.

SPICE-модель:

$$N=1,528; I_S=19,35 \text{ пА}; R_S=120,5 \text{ Ом}; \sigma=20,6 \%; \delta_{\max}=40,2 \%.$$

Шаблонная модель:

$$N=1,279; I_S=2,485 \text{ пА}; R_S=578,5 \text{ Ом}; a_1=2,89 \text{ мА}^{-1}; \sigma=6,2 \%; \delta_{\max}=9,7 \%.$$

Как показывают полученные выше результаты, применение шаблонной модели позволяет обеспечить уменьшение максимальной и среднеквадратической погрешностей моделирования  $p$ - $n$ -перехода примерно в 3 – 4 раза по сравнению с исходной физической моделью, при этом число параметров исходной модели равно трем, а шаблонной модели – четырем.

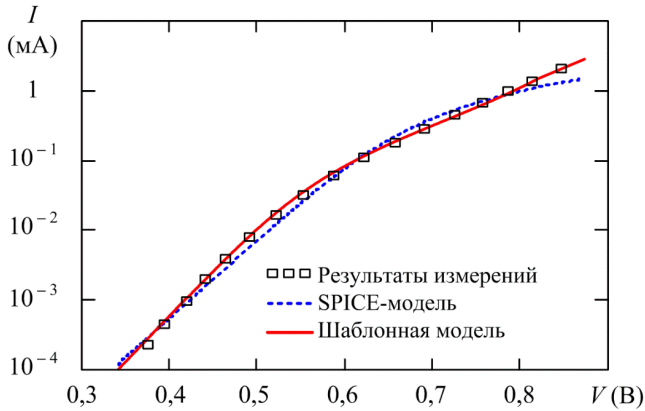


Рис. 1. Измеренная ВАХ диода FR102 и результаты моделирования

### Выводы

В данной работе представлены основные принципы создания шаблонных моделей элементов радиотехнических цепей. Данные принципы планируется использовать для разработки точных моделей различных видов диодов и транзисторов, включая перспективные элементы, созданные по новым технологиям.

Следует отметить, что дополнительное повышение точности шаблонной модели можно обеспечить с помощью повышения порядка полиномов числителя и знаменателя функции (3), а также путем замены всех параметров исходной физической модели выражениями вида (1), однако, при этом число параметров шаблонной модели существенно увеличится и возрастет сложность их параметрической идентификации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пилипенко А. М.* Методы математического и компьютерного моделирования элементов и устройств инфокоммуникационных систем : учебное пособие; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2023. – 138 с.
2. *Щебет В. В.* Алгоритмы идентификации параметров моделей двухполюсных элементов радиотехнических цепей: диссертация ... кандидата технических наук : 05.12.04. – Таганрог, 2003. – 200 с.
3. *McAndrew C. C.* Practical modeling for circuit simulation // IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 33, no. 3, pp. 439–448, 1998, doi: 10.1109/4.661209.

4. Khalis M., Masrour R., Mir Y., Zazoui M. Two methods for extracting the parameters of a nonideal diode // International Journal of Physical Sciences, vol. 10(8), pp. 270-275, 2015, doi: 10.5897/IJPS2015.4260.
5. Li S. S. Semiconductor Physical Electronics, 2nd ed. – Springer, 2006.
6. Pilipenko A. M., Biryukov V. N., Serebryakov A. I. A Technique for Semiconductor Devices Modeling Using Physical Templates // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884443.
7. Biryukov V. N. Pilipenko A.M. Diagnostics of the Nonlinear Static Models of a Diode // Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 54, no. 5, pp. 577–582, 2009, doi: 10.1134/S1064226909050118.

**Пилипенко Александр Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfnu.ru.

**Портных Дмитрий Александрович**, аспирант кафедры теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: portnyh@sfnu.ru.

**Pilipenko Alexandr Mikhaylovich**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfnu.ru.

**Portnykh Dmitry Aleksandrovich**, student gr. RTm01-21, Department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: portnyh@sfnu.ru.

УДК 621.396

Андреева Ирина Марковна, Одинец Евгений Дмитриевич

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В МЕДИЦИНЕ И БИОТЕХНОЛОГИЯХ

*В данной статье рассматриваются нанотехнологии, представляющие собой быстро развивающуюся область исследований, которая привлекает значительное внимание в последние годы. Описан потенциал нанотехнологий в*

*разработке инновационных решений для сложных проблем, включая манипулирование материей на атомном уровне и создание материалов с уникальными свойствами. Обсуждается значимость наноматериалов, их уникальные физические и химические свойства, а также революционное влияние на различные области, такие как электроника, медицина и материаловедение. Рассматривается применение нанотехнологий в медицине, включая создание новых диагностических и терапевтических инструментов, использование наноструктурированных материалов и наночастиц, а также разработку систем доставки лекарств для прецизионной медицины. Подчёркивается важность проведения тщательных исследований и тестирований для обеспечения безопасного и эффективного использования нанотехнологий в медицине и других областях.*

*Нанотехнологии, наноматериалы, медицина, диагностика, безопасность, повышение эффективности.*

Andreeva Irina Markovna, Odinets Evgeniy Dmitrievich

## **APPLICATION OF NANO ELECTRONICS IN MEDICINE AND BIOTECHNOLOGY**

*This article examines nanotechnology, which is a rapidly developing field of research that has attracted significant attention in recent years. The potential of nanotechnology in developing innovative solutions to complex problems, including manipulating matter at the atomic level and creating materials with unique properties, is described. The importance of nanomaterials, their unique physical and chemical properties, as well as their revolutionary impact on various fields such as electronics, medicine and materials science are discussed. The application of nanotechnology in medicine is being considered, including the creation of new diagnostic and therapeutic tools, the use of nanostructured materials and nanoparticles, as well as the development of drug delivery systems for precision medicine. The importance of conducting thorough research and testing to ensure the safe and effective use of nanotechnology in medicine and other fields is emphasized.*

*Nanotechnology, nanomaterials, medicine, diagnostics, safety, efficiency improvement.*

### **Введение**

Нанотехнологии – это быстро развивающаяся область исследований, которая в последние годы привлекает к себе значительное внимание. Данная область исследований во многих странах признана достаточно важной и

требующей пристального изучения благодаря своему потенциалу в разработке инновационных решений сложных проблем. Одним из важных достижений является возможность манипулировать материей и наблюдать за ней на атомном уровне, что позволяет ученым лучше понимать взаимодействия между атомами и создавать новые материалы с уникальными свойствами [1]. Возможность анализировать материалы на наноуровне привела к более глубокому пониманию их поведения и состава, способствуя развитию биотехнологий, которые тесно связаны с нанотехнологиями.

### **Основная часть**

Наноматериалы и биотехнологии – два быстро развивающихся направления, которые оказывают глубокое влияние на различные отрасли. Наноматериалы, имеющие размеры менее 100 нанометров, обладают уникальными физическими и химическими свойствами, открывая новые возможности в электронике, медицине и материаловедении. Биотехнологии, использующие живые организмы и их компоненты для создания новых продуктов и процессов, также имеют широкий спектр применения. Они используются для разработки новых лекарств, вакцин, методов генной терапии и диагностики заболеваний; для создания новых сортов растений с повышенной урожайностью, устойчивостью к вредителям и болезням, улучшенными питательными свойствами и для производства ферментов, витаминов, пищевых добавок и других продуктов.

Сочетание наноматериалов и биотехнологий открывает еще более широкие возможности. Разработка наноматериалов и наноустройств для использования в биомедицинских целях позволит использовать более эффективные системы доставки лекарств, которые могут точно направлять лекарства к пораженным участкам и снижать побочные эффекты. Наноматериалы могут использоваться для создания искусственных тканей и органов, которые могут быть имплантированы в организм человека.

Эти инновации потенциально могут трансформировать процесс разработки продуктов, предлагая широкий спектр функциональных возможностей. Благодаря передовым инструментам и методам, таким как пиконьютонные наносенсоры и наноразмерное пространственное разрешение, исследователи могут изучать материалы и процессы с беспрецедентной детализацией, что позволяет лучше понимать материю в мельчайших масштабах и открывает новые возможности для манипулирования материей на микроскопическом уровне.

Основное внимание в нанотехнологиях уделяется разработке наноразмерных электронных устройств, машин и механизмов, а также методов манипулирования атомами и молекулами на наноуровне. Эти приложения обещают создать новые диагностические и терапевтические инструменты, которые могли бы помочь в более раннем выявлении заболеваний и более точном назначении лекарств. Медицинские исследования направлены на создание более компактных и эффективных медицинских устройств, способных анализировать биологические ткани на молекулярном уровне. Для достижения этой цели ученые разрабатывают сенсоры, которые по размерам не превосходят размеры клетки и могут точно отслеживать биологические процессы [2]. Кроме того, миниатюрные устройства могли бы циркулировать внутри организма для обнаружения патогенов и нейтрализации вредных веществ.

Нанопленки и нанопокртия – это двумерные материалы толщиной в наноразмерном масштабе, созданные с использованием технологий, аналогичных тем, которые используются при производстве тонких пленок. Эти материалы имеют потенциальное применение в медицине, включая глазные нанопленки, которые, как было показано, эффективны при лечении васкуляризации роговицы у мышей. Особое внимание уделяется пленкам Ленгмюра-Блоджетт, которые формируются путем нанесения монослоев на подложку и обладают уникальными свойствами для использования в микроэлектронике и биотехнологиях [3].

Биомолекулы самопроизвольно собираются в наноструктурированные формы, такие как жидкокристаллические липидные образования и нановолоконные структуры на основе пептидов. Нановолоконные каркасы обладают уникальными свойствами, способствующими росту и восстановлению тканей. Уникальные свойства каркасов мимикрируют под естественную внеклеточную среду, активируют рост и дифференциацию клеток, а также улучшают доставку лекарств: лекарства могут быть внедрены в каркас для целевой доставки к месту поражения. Каркасы могут быть изготовлены из биосовместимых материалов, которые минимизируют риск отторжения организмом имплантов, что делает их идеальными для медленного высвобождения лекарства [4].

ДНК играет важную роль в нанотехнологиях и потенциально может стать основой для компьютерных технологий будущего. Вместо обычных кремниевых чипов наноразмерные устройства могли бы использовать двухцепочечные молекулы ДНК в качестве естественного шаблона для

построения сложных структур. ДНК обладает способностью заменять неорганические полупроводниковые материалы, что приводит к созданию процессоров, использующих ее уникальную способность хранить данные.

Нанотехнологии оказывают значительное влияние на различные аспекты медицины, революционизируя подходы к диагностике, лечению и профилактике заболеваний. Биомолекулы встречаются в живом организме, и демонстрируют важные связи для использования в обиходе передачей данных. Они чрезвычайно малы, что делает их пригодными для миниатюризации электронных устройств и способны эффективно поглощать и излучать свет, который можно было бы использовать для передачи данных. Биомолекулы обладают свойствами самовосстановления, которые могли бы повысить устойчивость систем хранения данных [5]. Исследования все еще находятся на ранних стадиях, но потенциал биомолекул для передачи данных интригует.

Нанозлектроника – это быстро развивающаяся область, которая сочетает нанотехнологии с электроникой для создания миниатюрных устройств с новыми свойствами. Применение нанозлектроники в биотехнологии открывает большие перспективы для революционизирования здравоохранения. Нанозлектронные приборы могут обнаруживать биомолекулы с высокой чувствительностью и специфичностью, что позволяет проводить более раннюю и точную диагностику заболеваний. Они могут быть использованы для доставки лекарств непосредственно к пораженным участкам, минимизируя побочные эффекты и повышая эффективность лечения. Нанотехнологии позволят анализировать генетический и молекулярный профиль отдельных пациентов, что позволит разрабатывать индивидуальные стратегии лечения.

В настоящее время разрабатываются различные типы наноразмерных приборов. Эти приборы потенциально могут быть использованы в диагностических и терапевтических целях в организме человека. Лабораторные исследования, предназначенные для исследования желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), стремительно набирают популярность в гастроэнтерологии. Эти устройства обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционной эндоскопией. Капсулы чрезвычайно малы, что позволяет им проходить через пищеварительную систему, не причиняя дискомфорта пациенту. Они неинвазивны, устраняя необходимость введения эндоскопа и оснащены камерами высокого разрешения, которые обеспечивают детальное изображение пищеварительного тракта. Наноразмерные приборы могут быть



использованы для диагностики различных желудочно-кишечных расстройств, включая язвы, болезнь Крона и рак толстой кишки. Также их можно использовать для контроля эффективности лечения желудочно-кишечных расстройств и для изучения нормальной работы пищеварительной системы.

Наноразмерные манипуляторы, также называемые наноманипуляторами, разработаны для точного манипулирования объектами на наноуровне, такими как молекулы и отдельные атомы [6]. В этих устройствах используются методы сканирующей зондовой микроскопии для манипулирования объектами с атомной точностью. Препараты, инкапсулированные в наночастицы с использованием липосом, показывают высокую эффективность в лечении и являются более безопасными для пациентов. Эти препараты, упакованные в наночастицы, могут эффективно воздействовать на органы-мишени, что требует меньших доз и открывает новые возможности для медицины. Попадая в нужный орган-мишень, лекарство высвобождает свою дозу и распадается на безвредные компоненты, после чего естественным образом выводится из организма. Использование липосомальных препаратов повышает растворимость лекарственных средств, что имеет важное значение для их действия на организм. Кроме того, снижается токсичность активных ингредиентов, поскольку они заключены в защитный липидный бислой, который предотвращает их распространение до достижения предполагаемого места воздействия.

Нанотехнологии произвели революцию в медицине, открыв широкий спектр возможностей для диагностики, лечения и профилактики заболеваний [7]:

1. Наноструктурированные материалы имеют структурированную организацию на молекулярном уровне и используются для восстановления поврежденных тканей или направления клеток в определенные места в организме.

2. Наночастицы, такие как фуллерены и дендримеры, находят различные медицинские применения, включая диагностику и терапию.

3. Микро- и наночастицы могут доставлять лекарства в целевые участки тела с помощью нанопор, обеспечивающих контролируемое высвобождение активных веществ.

4. Наносенсоры и анализаторы диагностируют заболевания и контролируют состояние организма на наноуровне.

5. Сканирующие зондовые микроскопы используются для исследования объектов в нанометровом масштабе в медицинских исследованиях.

6. Нанотехнологии: применение наноматериалов и технологий на их основе для создания новых продуктов и процессов, включая разработку наноразмерных устройств и систем.

Микро- и наноразмерные устройства с различным уровнем автономии используются в различных областях медицины, включая диагностику, терапию и мониторинг. Эти устройства направлены на повышение эффективности традиционных методов лечения и разработку новых подходов к лечению заболеваний. Они были внедрены в различных медицинских учреждениях, таких как больницы, клиники и исследовательские лаборатории, для улучшения ухода за пациентами и улучшения клинических результатов [6].

Нанотехнологии революционизируют область обнаружения и анализа, позволяя обнаруживать и анализировать крошечные количества веществ с беспрецедентной чувствительностью и специфичностью. “Лаборатория на чипе” является ярким примером этой революционной технологии. Такая исследовательская капсула может обнаруживать чрезвычайно малые количества веществ и с высокой точностью различать различные молекулы быстро и эффективно предоставляя результаты. Удобство использования в различных условиях делает её более экономичной чем традиционные методы

В настоящее время наблюдается растущая тенденция к использованию микроскопических устройств для внутренних медицинских целей, таких как диагностика и лечение заболеваний. Эти устройства размером всего в несколько миллиметров содержат миниатюрные камеры и системы освещения, которые позволяют передавать изображения изнутри тела на внешнее устройство [8]. В будущем эти устройства могут быть оснащены системами самонаведения и роботизированными приспособлениями, которые смогут самостоятельно перемещаться по телу и выполнять различные процедуры. Например, подобные дроны могли бы собирать данные на местах, назначать лекарства и даже выполнять микрохирургические процедуры, такие как удаление атеросклеротических бляшек или уничтожение раковых клеток. Они также могли бы помочь в восстановлении поврежденных нервных волокон.

Новое поколение фармацевтических препаратов нацелено на разработку систем доставки, которые могут точно и безошибочно доставлять лекарства в определенные участки организма. Эти инновационные системы способны произвести революцию в лечении в различных областях медицины, включая эндокринологию, кардиологию, пульмонологию и

онкологию. Использование нанотехнологий при разработке лекарств открывает новые возможности для создания антимикробных и противовирусных средств [9]. Исследователи изучают наночастицы, полученные из различных источников, для повышения эффективности существующих лекарств. Однако важно тщательно оценивать потенциальные риски и преимущества использования нанотехнологий в медицине. Исследование биологических и токсических эффектов наночастиц с учетом таких факторов, как их форма, размер, состав, площадь поверхности, заряд, режим дозирования, способ введения, концентрация в органе-мишени и продолжительность воздействия, имеет решающее значение.

### **Вывод**

Наночастицы и наноразмерные материалы обладают уникальными физическими, химическими и биологическими свойствами, которые отличаются от свойств более крупных веществ. Эти свойства делают их пригодными для конкретных применений в медицине, но также вызывают опасения по поводу их безопасности и потенциальных рисков. Поэтому необходимо провести тщательные исследования и тестирования, чтобы обеспечить безопасное и эффективное использование наночастиц в медицинских целях [10].

Наноматериалы являются новым классом материалов, которые необходимо оценивать на предмет их потенциального воздействия на здоровье человека и окружающую среду в соответствии с действующими нормативными актами. Производство этих материалов требует проведения токсикологических исследований, разработки методов оценки рисков, идентификации и количественного определения наночастиц, а также создания нормативной базы для обеспечения соответствия требованиям.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Наноструктуры в биомедицине канд. хим. наук С. А. Бусева, канд. хим. наук Т. П. Мосоловой, канд. физ.-мат. наук А. В. Хачояна. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, [2012]. — 519 с.
2. *Гусев А.И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. — Изд. 2-е, испр. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 416 с.: ил. — Библиогр. в конце гл. — Имен. указ.: с. 406-407. — Предм. указ.: с. 408-414. — ISBN 978-5-9221-0582-8.

3. *Рыжонков Д.И.* Наноматериалы: учебное пособие / Д. И. Рыжонков, В. В. Лёвина, Э. Л. Дзидзигури. — 2-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.— 365с.
4. От синтеза нанoeлектроники и молекулярной биологии – к созданию междотраслевого классификатора наноиндустриальной продукции URL: [https://www.electronics.ru/files/article\\_pdf/0/article\\_342\\_770.pdf](https://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_342_770.pdf) (дата обращения: 24.05.2024).
5. *Merkle R.C. and Freitas R.A. Jr.* (2003). Theoretical analysis of a carbon-carbon dimer placement tool for diamond mechanosynthesis. J. Nanosci. Nanotechnol. 3, 319–324.
6. *Эмерих Д.Ф., Танос К.Г.:* Нанотехнологии и медицина. 2003, – 655-663.8."Ростелеком" достроил Северный поток URL: [www.comnews.ru/node/81713#ixzz4O6Wkldcr](http://www.comnews.ru/node/81713#ixzz4O6Wkldcr) (дата обращения 21.05.2024).
7. *Ауси Р.М., Заргарян Е.В.* Цифровая информационная безопасность и способы её защиты в свете действующего законодательства// В книге: Инженерно-техническое образование и наука. Сборник трудов второй международной научно-практической конференции. Под общей редакцией И.В. Чистякова. Новороссийск, 2022. С. 54.
8. *Варукина Л.* 5G: В новый 2017 год с новым стандартом 5G. Обзор технологии и статус стандартизации // <http://www.mforum.ru/news/article/117626.html>.
9. Приборы инфракрасной и терагерцевой нанoeлектроники в биологии и медицине URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pribory-infrakrasnoy-i-teragertsevoy-nanoelektroniki-v-biologii-i-meditsine> (дата обращения 22.05.2024).
10. Нанoeлектроника в биологии и медицине URL: <https://www.susu.ru/ru/subject/nanoelektronika-v-biologii-i-medicine> (дата обращения 23.04.2024).

**Андреева Ирина Марковна**, студентка Политехнического института(филиала) ДГТУ в г. Таганроге Россия, город Таганрог, улица Петровская 109а, 347904, телефон: +7 (904) 501-22-41, email: [andreeva2012irina@yandex.ru](mailto:andreeva2012irina@yandex.ru).

**Одинец Евгений Дмитриевич**, студент Политехнического Института (филиала) ДГТУ в г. Таганроге 347904, Россия, Таганрог, улица Петровская 109а, телефон: +7 (951) 508-57-28, email: [mr.odinets0333@gmail.com](mailto:mr.odinets0333@gmail.com).

**Andreeva Irina Markovna**, student of the Polytechnic Institute (branch) of DSTU in the city of Taganrog 347904, Russia, Taganrog, 109a Petrovskaya street, phone: +7 (904) 501-22-41, email: [andreeva2012irina@yandex.ru](mailto:andreeva2012irina@yandex.ru).

**Odinets Evgeniy Dmitrievich**, student of the Polytechnic Institute (branch) of DSTU in the city of Taganrog 347904, Russia, Taganrog, 109a Petrovskaya street, phone: +7 (951) 508-57-28, email: [mr.odinets0333@gmail.com](mailto:mr.odinets0333@gmail.com).

УДК 620.3

Лахина Екатерина Александровна, Черненко Наталия Евгеньевна,  
Кириченко Данил Владимирович, Шандыба Никита Андреевич,  
Балакирев Сергей Вячеславович, Солодовник Максим Сергеевич

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОТЖИГА ПОДЛОЖКИ GaAs(111) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОУГЛУБЛЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ФОКУСИРОВАННЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ**

*В данной работе проводится исследование влияния технологических режимов отжига подложек GaAs(111) на геометрические характеристики наноуглублений, формируемых фокусированными ионными пучками. В отсутствие отжига и при отжиге в отсутствие потока мышьяка глубина и латеральный размер наноуглублений увеличиваются с увеличением количества проходов ионного пучка. В случае отжига подложек в потоке мышьяка зависимости глубины и латерального размера наноуглублений от количества проходов пучка являются немонотонными, что объясняется конкуренцией процессов травления поверхности каплями галлия при термическом сгоне окисла и кристаллизации капель в потоке мышьяка. Продемонстрированы технологические условия, позволяющие формировать высокосимметричные наноуглубления в форме треугольных пирамид.*

*Фокусированный ионный пучок, отжиг, GaAs(111), нанотехнология.*

Lakhina Ekaterina Alexandrovna, Chernenko Natalia Evgenyevna,  
Kirichenko Danil Vladimirovich, Shandyba Nikita Andreyevich,  
Balakirev Sergey Vyacheslavovich, Solodovnik Maxim Sergeyevich

## **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ANNEALING MODES OF THE GaAs(111) SURFACE ON THE CHARACTERISTICS OF NANOHOLES FORMED BY FOCUSED ION BEAMS**

*In this paper, we study the effect of annealing of GaAs(111) substrates under various conditions on the morphological characteristics of nanoholes formed by focused ion beams. In the absence of annealing and when annealing in the absence of the arsenic flux, the depth and lateral size of nanoholes increase with the number of ion beam passes. In the case of annealing of the substrates in the arsenic flux, the dependences of the hole depth and lateral size on the number of beam passes is non-monotonic, which is attributed to the competition of the processes of surface etching by gallium droplets during thermal oxide removal and droplet crystallization in the arsenic flux. We demonstrate technological conditions enabling formation of highly symmetric nanoholes in the form of triangular pyramids.*

*Focused ion beam, annealing, GaAs(111), nanotechnology.*

### **Введение**

Источники одиночных и запутанных пар фотонов [1,2] в последнее время вызывают повышенный интерес в связи с возможностью их использования в квантовой связи и квантовых вычислениях [3,4]. В роли таких источников могут выступать эпитаксиально выращиваемые квантовые точки (КТ) InAs, формируемые на подложках GaAs [5]. При этом наиболее важное значение имеют КТ с симметрией  $C_{3v}$ , которые могут быть реализованы на поверхностях с ориентацией (111) [6]. Такие КТ позволяют получить наименьшую величину расщепления тонкой структуры (fine structure splitting, FSS), что способствует высокой степени запутанности пар фотонов [7].

Изготовление структур с КТ посредством кристаллического роста в последнее время вызывает большой интерес [8,9]. Среди различных технологий изготовления таких структур выделяют следующие методы роста: молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, которые позволяют сформировать интерфейсы гетероструктур практически идеальными, а размер наноструктур – контролируемым. Для точного контроля процесса роста наноструктур необходимо

понять механизм роста и происходящие во время него процессы. Ожидается, что у квантоворазмерных структур, создаваемых *in situ* исключительно путем роста кристаллов и последующего заравнивания покровными слоями [10], минимизированы дефектность и степень загрязнения примеси, приводящие к ухудшению люминесцентных свойств и характерные для структур, создаваемых *ex situ*. Рост КТ InAs на поверхностях (111) затруднен в связи с невозможностью реализации на них традиционно используемого механизма Странского-Крастанова [11]. В данном случае для формирования КТ на поверхности (111) вытравливаются мезы [12] или формируются наноглубления, которые в дальнейшем являются центрами зарождения КТ [7].

Несмотря на повышенный интерес к данной теме, до сих пор не были представлены результаты исследований формирования на поверхности GaAs(111) углублений – центров зарождения КТ – методом фокусированных ионных пучков (ФИП) с последующим отжигом в камере МЛЭ для восстановления нарушенных кристаллических областей.

### **Постановка задачи**

Целью данной работы является исследование технологических режимов, с помощью которых формируются симметричные наноглубления, полученные посредством сгона окисла с поверхности в области модификации фокусированным ионным пучком и вне. Для достижения поставленной цели необходимо учитывать ряд параметров, влияющих на механизмы травления поверхности и последующего формирования наноглублений: поток мышьяка в камере, температура подложки, температура и время отжига образца и др.

### **Описание эксперимента**

Модификация подложек GaAs(111) фокусированным ионным пучком (ФИП) проводилась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Nova NanoLab 600, оснащенной системой ФИП (с источником ионов Ga<sup>+</sup>) при ускоряющем напряжении 5 кВ. Использовались массивы точек ФИП-модификации размером 5×5 мкм с расстоянием между наноглублениями 2.0 мкм и количеством проходов пучка (N): от 1 до 60. Экспериментальные исследования проводились на трех образцах, которые были получены в результате ФИП-обработки при различных условиях. Образец 1 не отжигали, с образца 2 начали сгонять окисел в камере SemiTEq STE 35 МЛЭ в потоке мышьяка, образец 3 получили путем сгона окисла с поверхности в камере МЛЭ в отсутствие потока мышьяка. Полученные образцы были исследованы с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NTegra.

## Результаты и обсуждение

По результатам проведенного исследования АСМ-изображения показали, что в области модификации до отжига форма углублений практически не изменяется с изменением  $N$  (рис. 1а,г). Глубина постепенно увеличивается от 1,5 нм для  $N=1$  до 10,8 нм для  $N=60$  (рис. 2а). Латеральный размер увеличивается вплоть до  $N=30$ , после чего выходит на насыщение (рис. 2б).

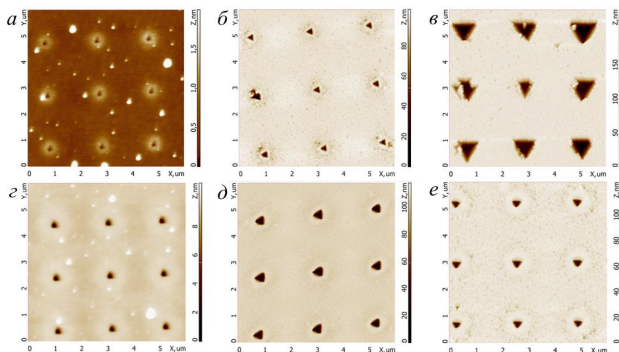


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности в области ФИП модификации до отжига при  $N=5$  (а), при  $N=60$  (г), без потока As при  $N=5$  (б), при  $N=60$  (д), в потоке As при  $N=5$  (е), при  $N=60$  (е)

На образцах, которые отжигались в камере МЛЭ обнаружены углубления, имеющие форму треугольной пирамиды. Однако, можно заметить, что для образца 3 размер нанougлублений гораздо больше, чем для образца 2, что особенно заметно при значениях  $N$  1 и 5 (рис. 1б,в,д,е). Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что углубления на поверхности, отжигаемой без As, увеличиваются как по глубине, так и по латеральному размеру по сравнению с углублениями на неотожженной поверхности (рис. 2). Средний латеральный размер углублений при  $N=60$  равен 0,29 мкм (рис. 2б), в то время как средняя глубина имеет значение 110 нм (рис. 2а).



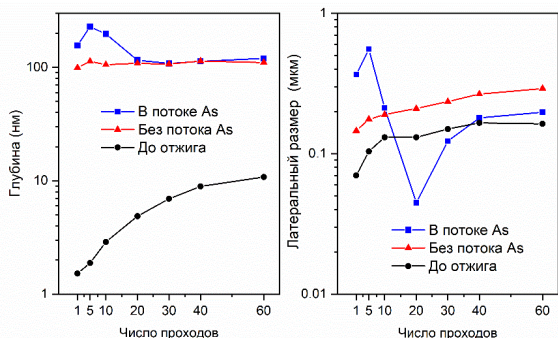


Рис. 2. Графики зависимости глубины и латерального размера от  $N$  полученные по результатам АСМ-изображений поверхности в области ФИП модификации до отжига, без потока As (а), в потоке As (б)

Гладкая область вокруг углубления – диск, который образуется в результате перераспределения материала подложки во время обработки ФИП (рис. 1б,д,е). Так как во время его воздействия из поверхности тяжелыми, ускоренными ионами галлия выбиваются атомы подложки, образуется углубление. Несвязанные частицы разлетаются вокруг области взаимодействия, образуя некий аморфный материал, который легко взаимодействует с окислом. В результате при нагреве после схода окисла наблюдается гладкая кристаллическая структура подложки.

Проведя сравнительный анализ АСМ-изображений участков поверхности за пределами областей модификации (рис. 3), можно сделать вывод, что одни атомы, образующие окисел на поверхности, при нагревании начинают сразу же испаряться с поверхности, другие же взаимодействуют с подложкой GaAs(111), тем самым мышьяк разрывает связи и покидает свое положение переходя в вышележащий слой.

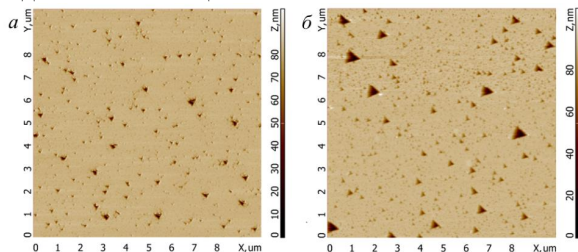


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности вне области модификации ФИП для образцов без потока As (а) и в потоке As (б).

Галлий в свою очередь начинает образовывать связи с оставшимся слоем окисла, в итоге образуются некие углубления, после полного схода оксидной пленки (рис. 3). При отжиге подложек в отсутствие потока As средний размер углублений меньше (рис. 3а), чем в случае его присутствия (рис. 3б), что связано с термодинамикой взаимодействия оксидов галлия и мышьяка с поверхностью GaAs и потоком As.

### **Выводы**

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что оптимальными режимами формирования симметричных треугольных пирамидальных нанougлублений на поверхности предварительно модифицированной ФИП для достижения меньшего латерального размера являются: отжиг в отсутствие потока As при  $N$  больше 5 и в потоке при  $N=60$ , для достижения большего латерального размера следует использовать параметры отжига в потоке As и меньшее значение  $N$ , при температуре отжига  $730\text{ C}^\circ$ , времени отжига 60 минут.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10313, <https://rscf.ru/project/23-79-10313/>, в Южном федеральном университете.**

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Valeri M. et al. Generation and characterization of polarization-entangled states using quantum dot single-photon sources // *Quantum Sci. Technol.* 2024. Vol. 9, № 2. P. 025002.
2. da Silva S.F.C. et al. GaAs quantum dots grown by droplet etching epitaxy as quantum light sources // *Applied Physics Letters*. AIP Publishing LLC, 2021. Vol. 119, № 12. P. 120502.
3. Ahmadi A., Fognini A., E. Reimer M. Toward On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs with a Quantum Dot // *Recent Advances in Nanophotonics - Fundamentals and Applications*. IntechOpen, 2020.
4. Vajner D.A. et al. On-Demand Generation of Indistinguishable Photons in the Telecom C-Band Using Quantum Dot Devices // *ACS Photonics*. 2024. Vol. 11, № 2. P. 339–347.
5. Zeuner K.D. et al. On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs in the Telecom C-Band with InAs Quantum Dots // *ACS Photonics*. 2021. Vol. 8, № 8. P. 2337–2344.
6. von Helversen M. et al. Triggered Single-Photon Emission of Resonantly Excited Quantum Dots Grown on (111)B GaAs Substrate // *Phys. status solidi – Rapid*

Res. Lett. 2022. Vol. 16, № 8.

7. Tuktamyshev A. et al. Telecom-wavelength InAs QDs with low fine structure splitting grown by droplet epitaxy on GaAs(111)A vicinal substrates // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 118, № 13.
8. Pelucchi E. On the multifaceted journey for the invention of epitaxial quantum dots // Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. 2023. Vol. 69, № 2–4. P. 100603.
9. Lozano M.S., Gómez V.J. Epitaxial growth of crystal phase quantum dots in III–V semiconductor nanowires // Nanoscale Adv. 2023. Vol. 5, № 7. P. 1890–1909.
10. Rajkumar K.C. et al. Realization of three-dimensionally confined structures via one-step in situ molecular beam epitaxy on appropriately patterned GaAs(111)B and GaAs(001) // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. Process. Meas. Phenom. 1994. Vol. 12, № 2. P. 1071–1074.
11. Mano T., Ohtake A., Kuroda T. Lattice-Mismatched Epitaxy of InAs on (111)A-Oriented Substrate: Metamorphic Layer Growth and Self-Assembly of Quantum Dots // Phys. status solidi. 2024.
12. Shen X.Q., Ren H.W., Nishinaga T. Initial growth behaviors of disk-shaped mesas in GaAs molecular beam epitaxy on GaAs(111)B substrates // J. Cryst. Growth. 1997. Vol. 177, № 3–4. P. 175–180.

**Ляхина Екатерина Александровна**, техник-проектировщик, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (918) 288-50-27, email: lakhina@sfnedu.ru;

**Черненко Наталия Евгеньевна**, младший научный сотрудник, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: ncher-nenko@sfnedu.ru;

**Кириченко Данил Владимирович**, лаборант-исследователь, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: dankir@sfnedu.ru;

**Шандыба Никита Андреевич**, младший научный сотрудник, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: shandyba@sfnedu.ru;

**Балакирев Сергей Вячеславович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: sbalakirev@sfnedu.ru;

**Солодовник Максим Сергеевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: solodovnikms@sfedu.ru.

**Lakhina Ekaterina Alexandrovna**, technician designer, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (918) 288-50-27, email: lakhina@sfedu.ru;

**Chernenko Natalia Evgenyevna**, junior research assistant, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: nchernenko@sfedu.ru;

**Kirichenko Danil Vladimirovich**, laboratory researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: dankir@sfedu.ru;

**Shandyba Nikita Andreyevich**, junior research assistant, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: shandyba@sfedu.ru;

**Balakirev Sergey Vyacheslavovich**, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: sbalakirev@sfedu.ru;

**Solodovnik Maxim Sergeyevich**, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: solodovnikms@sfedu.ru.

УДК 537.876

Пленингер Максимилиан, Балакирев Сергей Вячеславович,  
Солодовник Максим Сергеевич

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1.3 МКМ В ЛОГИЧЕСКОМ КОМПАРАТОРЕ НА ОСНОВЕ GaAs**

*В данной работе представлены результаты моделирования компактного, полностью оптического логического компаратора на основе фотонного кристалла GaAs, работающего на длине волны 1.3 мкм. Проведено исследование влияния геометрических параметров фотонного кристалла на характеристики оптического компаратора. Целью исследования является установление оптимального значения диаметра столбиков GaAs, а также расстояния между столбиками для соблюдения требований работы оптического компаратора. Зависимости отношения уровней интенсивности сигналов (напряженности*

электрического поля) на входе и выходе компаратора позволили установить, что оптимальный диаметр столбиков фотонного кристалла GaAs равен 155 нм, а период между столбиками – 600 нм.

*Фотонный кристалл, оптический компаратор, длина волны 1.3 мкм, GaAs.*

Maximilian Pleninger, Balakirev Sergey Vyacheslavovich,  
Solodovnik Maxim Sergeevich

## **SIMULATION OF PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION WITH A WAVELENGTH OF 1.3 $\mu\text{m}$ IN A LOGIC COMPARATOR BASED ON GaAs**

*This paper presents the results of modeling a compact, all-optical logic comparator based on a GaAs photonic crystal operating at a wavelength of 1.3  $\mu\text{m}$ . A study was carried out of the influence of the geometric parameters of a photonic crystal on the characteristics of the optical comparator. The purpose of the study is to establish the optimal diameter of the GaAs pillars, as well as the distance between the pillars to meet the operating requirements of an optical comparator. The dependences of the ratio of signal intensity levels (electric field strength) at the input and output of the comparator made it possible to establish that the optimal diameter of the columns of a GaAs photonic crystal is 155 nm, and the period between the columns is 600 nm.*

*Photonic crystal, optical comparator, wavelength 1.3  $\mu\text{m}$ , GaAs.*

### **Введение**

Фотонные кристаллы — это новый класс неоднородных оптических материалов, для которых характерно наличие пространственной периодической модуляции диэлектрической проницаемости с периодом порядка длины волны света и фотонной запрещенной зоны в спектре собственных электромагнитных состояний кристалла [1]. Фотонная запрещенная зона (полная или частичная) представляет собой интервал частот, в пределах которого свет, распространяющийся в определенных направлениях, экспоненциально затухает. При этом свет, падающий на фотонный кристалл, полностью отражается. Возникновение полной фотонной запрещенной зоны состоит в перекрытии брэгговских запрещенных зон (стоп-зон) во всех направлениях [2].

Фотонные кристаллы могут иметь многочисленные практические и теоретические применения [3–6]. Они широко применяются в оптической интегральной схемотехнике и модуляции света. **В частности, важной**

**сферой исследования фотонных кристаллов является разработка на их основе логических элементов фотонных интегральных схем.**

В данной работе **впервые** проводится моделирование распределения напряженности электрического поля ( $E$ ) в **полностью оптическом** логическом компараторе, основанном на фотонном кристалле со столбиками GaAs, **работающем на длине волны 1.3 мкм. Выбор данной длины волны обусловлен тем, что** она находится в диапазоне второго окна прозрачности оптического волокна и отличается нулевой дисперсией [7]. Кроме того, на данной длине волны излучают квантовые точки InGaAs, отличающиеся высокой технологичностью изготовления [8].

### **Описание модели**

В оптическом компараторе есть 2 входных и 2 выходных канала. При вводе излучения в оба входных канала, свет, распространяющийся по волноводам, должен практически полностью затухнуть. При вводе излучения только в первый, или же во второй канал, свет должен пройти по волноводу с минимальными потерями.

Исследование проводилось для фотонного кристалла с гексагональной решеткой. Гексагональная решетка является предпочтительным вариантом структуры, так как фотонный кристалл с геометрией элемента в виде гексагона представляет особый интерес для максимального отражения излучения с частотой, принадлежащей к фотонной запрещенной зоне [9]. Структура состоит из 15 столбиков по горизонтали и 13 столбиков по вертикали. Длина структуры составляет 8,4 мкм, ширина - 7,2 мкм. В самой структуре были созданы 2 пересекающихся волновода, по которым проходит излучение при подаче сигнала (рис. 1). Диаметр столбиков GaAs ( $d$ ) варьировался от 130 до 170 нм. При этом в структуру также добавлены столбики с меньшим диаметром равным 83 нм (1 столбик) и 62 нм (4 столбика) соответственно. Расстояние между столбиками фотонного кристалла ( $a$ ), влияющее на глубину проникновения электромагнитного излучения, **варьировалось в диапазоне 450–750 нм.**

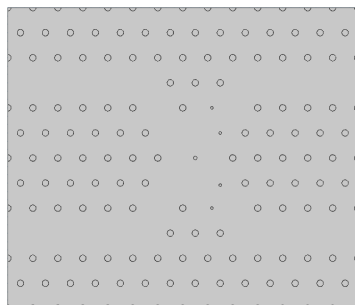


Рис. 1 Структура оптического компаратора на основе GaAs

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 (часть 1) приведены значения зависимости напряженности электрического поля от диаметра столбиков GaAs, при этом период структуры постоянен и равен 600 нм.

Таблица 1

Значения напряженности электрического поля при разных диаметрах столбиков GaAs и периодах структуры

Напряженность (В/м)	Один ввод		Два ввода	
	Диаметр (нм)	На входе	На выходе	На входе
130	1,793	1,034	1,813	0,922
135	1,861	1,038	1,93	0,834
140	1,891	1,032	2,037	0,75
145	1,911	0,997	2,13	0,664
150	1,95	0,912	2,22	0,554
155	1,979	0,862	2,9	0,442
160	2,029	0,833	2,346	0,366
170	2,147	0,717	2,494	0,264
Период (мкм)	На входе	На выходе	На входе	На выходе
0,45	1,937	0,017	2,092	0,004
0,5	2,641	0,226	3,111	0,296
0,55	2,107	1,535	1,841	1,67
0,6	2,023	0,911	2,295	0,501
0,65	2,057	0,056	2,015	0,048
0,7	2,204	0,089	2,204	0,168
0,75	1,931	0,271	1,865	0,494

Аналогичное исследование было проведено для периода оптического компаратора при диаметре столбика 155 нм. В табл. 1 (часть 2) приведены результаты исследования.

Исходя из результатов моделирования следует, что оптимальный диаметр столбиков GaAs и расстояние между столбиками равны 155 нм и 600 нм, соответственно. Рис. 2 визуализирует распределение напряженности электрического поля в оптическом компараторе. Видно, что требования работы компаратора соблюдены. При одном открытом канале излучение проходит по волноводу с минимальными потерями, а при обоих открытых каналах практически полностью затухает в месте пересечения волноводов.

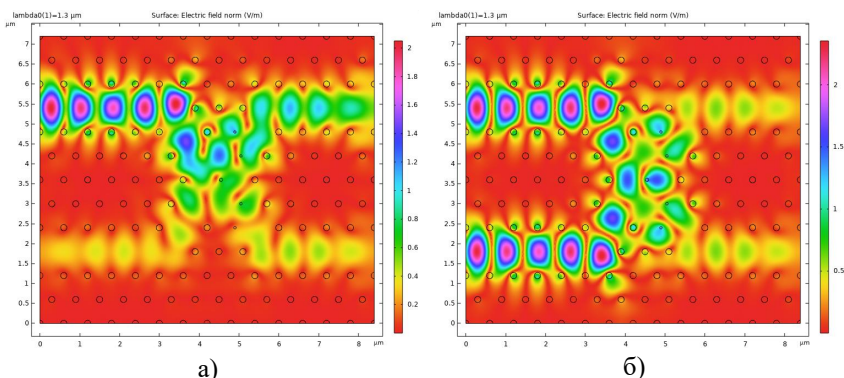


Рис. 2 Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в фотонном кристалле: (а) при обоих открытых каналах, (б) при одном открытом канале;  $d = 155$  нм,  $a = 600$  нм

Ключевыми параметрами устройств такого типа и последующего аналого-цифрового преобразования являются: отношение сигнал/шум, эффективная разрешающая способность, частота дискретизации, тепловые шумы [10]. Однако, благодаря свойствам фотонных запрещенных зон таких структур, шумовые эффекты соседних волноводов несут существенны.

Для визуализации был построен график зависимости интенсивности сигналов на входе и на выходе компаратора для разных диаметров столбиков GaAs (рис. 2а,б). Кривая красного цвета – отношение выходных сигналов к входным при одном открытом канале. Значение этого отношения должно быть как можно выше, что означает, что излучение проходит по



волноводу лишь с небольшим затуханием. Кривая синего цвета – отношение выходных сигналов к входным при 2 открытых каналах, значение которого должно быть как можно меньше. Это означает, что большая часть излучения затухает в месте пересечения двух волноводов. Кривая черного цвета визуализирует разницу значений отношения выходного и входного сигналов при вводе излучения в один и в оба канала. Ее значение должно быть как можно выше для достижения оптимальных характеристик компаратора.

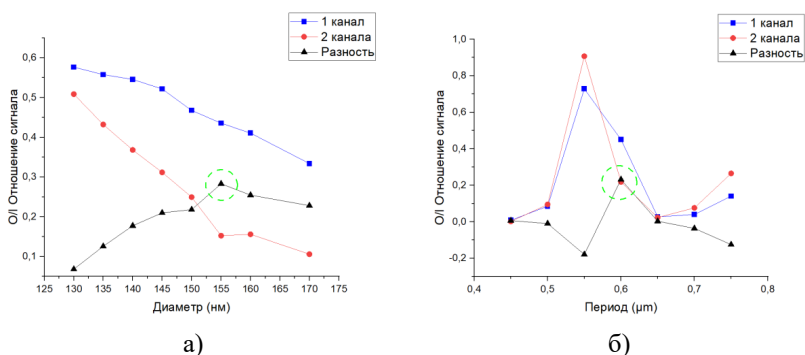


Рис. 3 Зависимость отношения интенсивностей сигналов на выходе и входе (O/I) от диаметров столбиков GaAs (а) и расстояния между ними (б)

### Заключение

В данной работе проводится анализ результатов моделирования распространения электромагнитного излучения в оптическом компараторе. В данном компараторе применяется двумерный фотонный кристалл с гексагональной кристаллической решеткой. Для отражения излучения в фотонном кристалле в его структуру встроены столбики из GaAs. Путем удаления нескольких столбиков GaAs были созданы два пересекающихся волновода. Установлено, что оптимальный диаметр столбиков GaAs для распространения излучения с длиной волны 1.3 мкм равен 155 нм, а период – 600 нм. Основными преимуществами данного компаратора являются его компактность и хорошие входные/выходные характеристики.

**Работа выполнена при поддержке проекта Минобрнауки № FENW-2022-0034.**

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // *Phys. Rev. Lett.* 1987. Vol. 58, № 20. P. 2059–2062.
2. *Dyachenko P.N., Miklyaev Y. V., Dmitrienko V.E.* Three-dimensional photonic quasicrystal with a complete band gap // *JETP Lett.* 2007. Vol. 86, № 4. P. 240–243.
3. *Zheltikov A.M.* Nonlinear optics of microstructure fibers // *Uspekhi Fiz. Nauk.* 2004. Vol. 174, № 1. P. 73.
4. *Sychov M.D. et al.* Substantiation Study of Using Immobilized Cytostatics in Management of Tumors with Peritoneal Canceromatosis // *Vestn. Exp. Clin. Surg.* 2015. Vol. 8, № 1. P. 82–86.
5. *Hassan S., Chack D., Pavesi L.* High extinction ratio thermo-optic based reconfigurable optical logic gates for programmable PICs // *AIP Adv.* 2022. Vol. 12, № 5.
6. *Olyae S., Naraghi A., Ahmadi V.* High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring // *Optik (Stuttg).* 2014. Vol. 125, № 1. P. 596–600.
7. *Brès C.-S. et al.* Supercontinuum in integrated photonics: generation, applications, challenges, and perspe
8. *García de Arquer F.P. et al.* Semiconductives // *Nanophotonics.* 2023. Vol. 12, № 7. P. 1199–1244.uctor quantum dots: Technological progress and future challenges // *Science.* 2021. Vol. 373, № 6555. P. eaaz8541.
9. *Горбачев А.А., Фриман А.В., Горелик В.С.* Двумерный гексагональный фотонный кристалл с новой геометрией элемента // *Краткие сообщения по физике ФИАН.* 2014. №6. № 6. P. 37–38.
10. *Драчев В.П.* Кремниевая фотоника: статус и перспективы развития // *Материалы X Международного семинара по волоконным лазерам 2022.* Институт автоматки и электрометрии СО РАН, 2022. P. 200–201.

**Пленингер Максимилиан**, техник-проектировщик Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, ул. Шевченко д. 2, 347922, телефон: +7 9897471548, email: [pleninger@sfedu.ru](mailto:pleninger@sfedu.ru).

**Балакирев Сергей Вячеславович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: [sbalakirev@sfedu.ru](mailto:sbalakirev@sfedu.ru).

**Солодовник Максим Сергеевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: [solodovnikms@sfedu.ru](mailto:solodovnikms@sfedu.ru).

**Pleninger Maximilian**, design technician, Laboratory of Epitaxial Technologies of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, Shevchenko street 2 , 347922, phone: +79897471548, email: [pleninger@sfedu.ru](mailto:pleninger@sfedu.ru).

**Balakirev Sergey Vyacheslavovich**, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: [sbalakirev@sfedu.ru](mailto:sbalakirev@sfedu.ru) .

**Solodovnik Maxim Sergeyevich**, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: [solodovnikms@sfedu.ru](mailto:solodovnikms@sfedu.ru) .

УДК 515.2+655.1

Авраменко Светлана Игоревна, Гривцов Владимир Владиславович,  
Корецкая Сандра Сергеевна

**ДИЗАЙН ДЕТСКОЙ КНИГИ  
В. П. КАТАЕВА «ЦВЕТИК - СЕМИЦВЕТИК»**

*Данная работа посвящена разработке дизайна детской книги В. П. Катаева «Цветик-семицветик». Выполнен анализ предшествующих концепций и графических работ по этой теме, изданных в разное время, выбран и обоснован стиль иллюстраций. Создано композиционное решение всей книги, проведен поиск дизайнерского решения оригинал-макета книги, иллюстраций и верстки с учетом требований, предъявляемые к проектированию книг для младших школьников. Новизна работы заключается в свежем взгляде на оформление данного произведения.*

*Дизайн книги, макет, иллюстрация, обложка, шрифт, модульная сетка, верстка книги.*

Avramenko Svetlana Igorevna, Grivtsov Vladimir Vladislavovich,  
Koretskaya Sandra Sergeevna

**CHILDREN'S BOOK DESIGN  
V. P. KATAEVA "TSVETIK-SEMITSVETIK"**

*This work is devoted to the development of the design of the children's book by V. P. Kataev "Flower-seven-color." An analysis of previous concepts and graphic works on this topic, published at different times, was made, the style of illustrations was selected and justified. A compositional solution for the entire book was created, a search was made for a design solution for the original layout of the book, illustrations, and layout, considering the requirements for designing books for younger students. The novelty of the work lies in a fresh look at the design of this work.*

*Book design, layout, illustration, cover, font, modular grid, book layout.*

**Введение**

Валентин Петрович Катаев (1897–1986) - классик отечественной литературы. В сказках Катаева просто и понятно говорится об очень непростых вещах: о дружбе и сострадании, о трудолюбии и ответственности за

свои решения и поступки. Одна из самых известных сказок - "Цветик-семицветик" - визитная карточка писателя.

Основная задача проекта – реализовать дизайн-проектирование оригинал-макета дизайна детской книги В. П. Катаева «Цветик-семицветик» со следующими этапами работы: обзор и анализ зарекомендовавших себя аналогов; выбор формата книги; разработка авторского иллюстративного материала; подбор шрифтов с учетом особенностей проектирования детских книг.

### **Анализ задания**

Принципы оформления и иллюстрирования книг в первую очередь обусловлены возрастными особенностями детского восприятия. Для каждого из возрастных этапов, которые проходит в своем развитии ребенок, характерны определенные особенности усвоения информации, существенно влияющие на конструкцию книги, на качество иллюстраций, решение шрифтовых композиций и т. д. С возрастными особенностями детей связаны и особые соединения иллюстраций и текста в книге.

Опираясь на общеметодологические принципы проектирования книжных изданий, художники детской книги разрабатывают особый творческий подход к решению возникающих проблем, требующих использования специфических приемов и средств оформления и иллюстрирования детской литературы [1-2].

*Требования, предъявляемые к проектированию книг для младших школьников.*

Текст книг для дошкольников набирают, как правило, шрифтами крупных кеглей - 16, 14, 12, требующими длинной строки, которая является удобной для медленно читающего ребенка.

Обе особенности детских книг - крупный шрифт и большое количество иллюстраций - приводят к необходимости пользоваться большими форматами. Для которых характерны просторные с широкими пропорциями страницы, удобные для размещения рисунков в тексте и для компоновки разворотных иллюстраций.

Особая роль в формировании художественного образа в книге для дошкольников отводится цвету. Живописность, яркость красок усиливают эмоциональное воздействие иллюстраций на ребенка, пробуждают у него воображение и фантазию.

Творческий поиск и практическая реализация проекта должны базироваться на широком применении компьютерных графических технологий [3-5].

### **Сравнительный анализ**

Для разработки своего оригинального стиля дизайнера книги В. Катаева «Цветик-семицветик».», проведен сравнительный анализ существующих аналогичных изданий. Проанализировав оформление детских книг других дизайнеров, выявив, все достоинства и недостатки, проведен выбор со стилизованным направлением нашей книги и её содержанием. В качестве аналогов из многочисленных изданий разных лет выберем несколько книг с различными иллюстрациями.

Сказка В. Катаева «Цветик-семицветик» впервые напечатана в «Литературной газете» в 1940г.

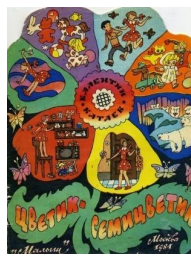
Но во все времена иллюстрации на обложках яркие и красочные, привлекающие внимание детских читателей. Верстка текста, шрифт и формат издания имеют определенные различия.

Впервые "Цветик-семицветик" с рисунками художника В.Н. Лосина был опубликован в 1960 году. Именно этот первый вариант книги стал любимым у многих поколений читателей.

Рассматривая иллюстрации В.Н. Лосина, появляется ощущение, что каждый рисунок создан единым духом: сел, представил, нарисовал. Если на рисунке линия, она небезгрешна: где-то толще, где-то сужается – живая, дышит. И весь рисунок такой – одухотворенный, наделенный жизнью (рис.1).



*Рис. 1. Издательство «Детская литература», год издания: 1967 г.  
Художник: Вениамин Лосин*



*Рис. 2. Издательство Малыш, год издания: 1987 г.  
Художники: Э. Булатов, О. Васильев*

Интерес вызывает оформление художников-иллюстраторов Э. Булатова и О. Васильева. Яркие, насыщенные декоративными элементами и в то же время реалистичные, их иллюстрации неповторимы, а главное – легко узнаваемы. Кроме этого, издание имеет необычный прямоугольный формат, исполненный фигурной вырубкой по форме, напоминающей семицветик. Одновременно оригинальное и простое решение – яркая книга-цветок безусловно привлекает внимание маленького читателя. Так же нельзя не отметить гармоничное переплетение текста с графикой (рис. 2).

Следует отметить еще одно издание 2019 г. Иллюстрации на каждом развороте, все герои изображены правильно, сцены соответствуют описываемым, рисунки очень красивые. Книга большого формата, плотные страницы, обложка из толстого картона (рис. 3).



*Рис. 3. Издательство Малыш,  
год издания: 2019 г.  
Художник: Наталья Демидова*



*Рисунок 4. Издательство Вакуша,  
год издания 2022 г.  
Художник: Ольга Рытман*

Нельзя не отметить оформление одного из современных изданий - сборника произведений В. Катаева художником Ольгой Рытман издания 2022 года. Книга в мягкой обложке, с крупным шрифтом, а иллюстрации нежные и отличаются своей реалистичностью (рисунок 4).

### **Разработка и обоснование композиционного замысла**

Подготовка книги к изданию очень трудоемкий процесс [6]. И для достижения результата в положенные сроки целесообразно разбить его на планы.

Верстка книги выполнялась, традиционно используя следующие этапы подготовки макета - макетирование, подготовка текста и иллюстраций, выбор шрифтов, верстка, печать оригинал-макета.

Этап макетирования включает выбор формата, поля и модульную сетку [7, 8].

Формат книги имеет большое значение и оказывает влияние на ее удобочитаемость, портативность и восприятие того или иного произведения

Для данного издания был выбран квадратный формат. Предмет разработки данного проекта относится к произведениям детской дошкольной литературы, а значит, формат должен быть удобен для восприятия иллюстраций. Преимущество квадратного формата: на нем как горизонтально, так и вертикально ориентированные иллюстрации чувствуют себя равноправными хозяевами страницы.

Модульная сетка необходима для правильного расположения всех элементов верстки на странице, чтобы в будущем при сборке книжного блока поля не оказались слишком малы, для правильного композиционного построения всех необходимых для правильной верстки элементов книжной архитектуры (рис. 5) [9].

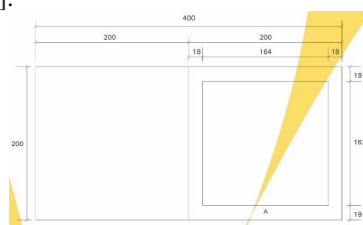


Рис. 5. Модульная сетка страниц

Модульная сетка содержит поля, которые ограничивают основной текст:

- внутреннее и внешнее – 18 мм;
- верхнее и нижнее – 19 мм;

Размер страниц соответствует формату книги – 200x200 мм, учитывая обрезку страниц при сборке книжного блока.

Также на страницах располагаются вспомогательные элементы: колонцифры, расположенные внизу страницы и выровненные по центру.

В оформлении книги используется два вида шрифтов. Шрифт для оформления обложки был выбран крупный фигурный художественный Premudry сур, 90п. и 41 п. (рис. 6). Шрифт Univers Norval используется для основного текстового блока. Кегль – размер шрифта - составляет 19 пунктов. Интерлиньяж – расстояние между базовыми линиями соседних строк – составляет 32 пункта.



# PREMUDRY CYR

АБВГДЕЖЗИКАМНОП  
СТУФХЦЧШЩЬЫЬЭЮЯ

Рис. 6. Шрифт для обложки Premudry cyr

Верстка иллюстрационного материала – сложная композиционная проблема, решение которой требует большого художественного вкуса и изобретательности.

Иллюстрации должны быть размещены по определенной схеме и уравновешены по зрительной тяжести, как между собой, так и с текстом.

## Создание иллюстраций к книге

Чем меньше ребенок, тем большее значение для него имеют цветные рисунки. Маленькие дети понимают образную речь еще не полно, нуждаются в большом количестве иллюстраций. При этом нужно попытаться эти иллюстрации создавать таким образом, чтобы они служили своего рода рассказом для тех детей, которые еще не умеют хорошо читать.

В разработке дизайна книги основополагающий элемент – это дизайн обложки. Правильно созданный дизайн – обложка и внутреннее художественное оформление придадут книге оригинальный, эстетичный внешний вид.

Для разработки макета обложки детской книги используются яркие краски и реалистичные изображения. В дизайне книг для детей лучше использовать более крупный шрифт [10]. Для данной книге для обложки была использована одна из иллюстраций, обработанная в графическом редакторе Adobe Photoshop (рис. 7).

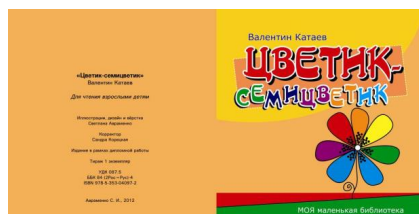


Рис. 7. Обложка книги «Цветик-семицветик»

Персонажи любого литературного произведения обладают своим характером, поэтому была поставлена задача доступно этот характер передать в иллюстрациях. Рисуя героев и стараясь передать их характер или их душевное состояние, также следует иметь в виду и некоторые особенности

детского восприятия. Для того, чтобы движения и эмоции персонажей были понятны читателю, пришлось внести некоторую схематичность и примитивность в их анатомию (рис. 8).

Иллюстрации были выполнены акварелью, а затем доработаны тушью.



Рис. 8. Текст и иллюстрация основного блока книги

Вид иллюстрационной верстки определяется характером размещения в издании не полноформатных (не занимающих полную полосу) изображений. Иллюстрации расположены на странице по типу полосной верстки, когда изображение располагается на всю страницу. Практически все иллюстрации в книге завершают ту часть, в которой описывается та или иная сцена, характеризующая данное изображение. Подготовка и верстка книги производилась в программе InDesign CS2.

При подготовке макетного экземпляра книги все графические файлы были переведены в цветовую модель СМΥК, которая соответствует требованиям офсетной печати.

### Выводы

В приведенной работе были представлены этапы разработки дизайна детской книги Валентина Катаева «Цветик-семицветик» для дошкольного и младшего школьного возраста, а также был создан оригинал-макет экземпляра книги сверстанный, проиллюстрированный и полностью подготовленный к печати.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Требования, предъявляемые к детской книге и учебнику URL: <http://https://www.lubavich.spb.ru/statii/trebovaniya-k-detskoy-knige/> (дата обращения: 25.04.2024).
2. Особенности создания книжного издания для детей разных возрастов [Электронный ресурс] – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=867366> (дата обращения:

- 20.04.2024г.)
3. *Пилевина Я.Б., Гривцов В.В., Литюк Л.В.* Дизайн сборника стихов Омара Хайяма «Рубаи». В сборнике: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении КомТех-2023. Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко в двух томах. 2023. Т.1. С. 299–308.
  4. *Аббасов И.Б., Гривцов В.В., Маренчева Т. М.* Фирменный стиль студии дизайна «Home Planner» В сборнике: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2020). Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2020. С. 240–245.
  5. *Астанкова Ю. С., Гривцов В.В.* Дизайн сборника стихов В. Маяковского «Избранная лирика». Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2022»: в 2 т. / ЮФУ. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2022. Т.1. – 358с.
  6. *Пикок Дж.* Издательское дело. Книга от замысла до упаковки. – М.: ЭКОМ, 2002. – 401 с.
  7. *Буковецкая О.А.* Дизайн текста: шрифт, эффекты, цвет. - 2-е изд. - М.: ДМК Пресс, 2000. - 304 с.
  8. *Сологубова С. В., Гривцов В.В.* Дизайн книги Стивена Кинга «11/22/63» В сборнике: Культурные институции и медиации художественной жизни: творчество художника в социальных координатах. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Отв. редактор Д. В. Сергеев. – Чита, Издательство ЧГУ, 2020. С. 78–86
  9. *Элам К.* Графический дизайн. Принцип сетки. – Санкт-Петербург: Питер, 2014. – 120 с.
  10. *Феллици Д.* Типографика: шрифт, верстка, дизайн. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2014. – 496 с.

**Авраменко Светлана Игоревна**, студентка, кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна, Института радиотехнических систем Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Чехова 22, 347928, телефон: +7(8634)37-17-94, email: [ikg@sfedu.ru](mailto:ikg@sfedu.ru).

**Гривцов Владимир Владиславович**, кандидат технических наук, доцент Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Чехова 22, 347928, телефон: +79185949373, email: [gvv@sfedu.ru](mailto:gvv@sfedu.ru).

**Корецкая Сандра Сергеевна**, старший преподаватель Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Чехова 22, 347928, телефон: +7(8634)37-17-94, email: [ikg@sfedu.ru](mailto:ikg@sfedu.ru).

**Avramenko Svetlana Igorevna**, student, Department of Engineering Graphics and Computer Design, Institute of Radio Engineering Systems, Southern Federal University, 347928, Russia, Taganrog, 22 Chekhov Street, phone: +7(8634)37-17-94, email: [ikg@sfedu.ru](mailto:ikg@sfedu.ru).

**Grivtsov Vladimir Vladislavovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 347928, Russia, Taganrog, 22 Chekhov Street, phone: +79185949373, email: [gvv@sfedu.ru](mailto:gvv@sfedu.ru).

**Koretskaya Sandra Sergeevna**, Senior Lecturer Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 347928, Russia, Taganrog, 22 Chekhov Street, phone: +7(8634)37-17-94, email: [ikg@sfedu.ru](mailto:ikg@sfedu.ru).

УДК 658.512.2

Калашникова Татьяна Григорьевна, Дружинина Александра Дмитриевна,  
Михеев Вячеслав Алексеевич, Богунова Александра Павловна,  
Завернина Елизавета Евгеньевна, Нежнова Антонина Валерьевна

### **ДИЗАЙН-КОНЦЕПЦИЯ ДЕТСКОЙ ИГРОВОЙ ПЛОЩАДКИ**

*Описывается проект по разработке дизайн-концепции детской игровой площадки в историческом центре города Таганрога. Командой были проанализированы особенности целевой аудитории, их потребностей, запрос администрации города и т. д. В процессе работы создана концепция зонирования пространства, предложены варианты арт-объектов, объекты зоны отдыха и игровой площадки для детей дошкольного возраста с учетом предложений заказчика для организации комфортной рекреационной зоны в центре города. Выполнены эскизы и 3D-визуализация предложенных вариантов.*

*Дизайн, промышленный дизайн, детская игровая площадка, планировочное решение, 3D-визуализация.*

Kalashnikova Tatiana, Druzhinina Alexandra, Mikheev Vyacheslav,  
Bogunova Alexandra, Zavernina Elizaveta, Nezhnova Antonina

## **DESIGN CONCEPT OF CHILDREN'S PLAY AREA**

*Describes a project to develop a design concept for a children's play area in the historical center of Taganrog. The team analyzed the characteristics of the target audience, their needs, the city administration's request, etc. During the work, a concept for zoning the space was created, options for art objects, recreation area objects, and a playground for preschool children were proposed. The customer's suggestions for organizing a comfortable recreational area in the city center were also taken into account. Sketches and 3D visualizations of the proposed options were presented.*

*Design, industrial design, children's playground, planning solution, 3D visualization.*

### **Введение**

Тема организации досуга детей всегда является актуальной. При организации доступного эргономичного пространства для детей возрастает потребность в создании многофункциональных детских площадок и уличных игровых комплексов, выполняющих важную роль в физическом и психологическом развитии дошкольников, а также способствующих их социальной адаптации. Компания-заказчик ГК «СтройГород» предложила студентам профиля Промышленный дизайн Южного федерального университета кейс по разработке дизайн-концепции детской игровой площадки в историческом центре города Таганрога для детей дошкольного возраста (реализация проекта проходила в рамках проектно-образовательного интенсива ЮФУ SfeduNet 9, проводимого совместно с УНТИ 20.35). Ранее в данном сквере уже располагалась детская площадка. Еще одним из требований было спланировать привлекательную арт-зону, посвященную городу Таганрогу, поскольку сквер находится в историческом центре города – месте, где проходят туристические маршруты.

### **Разработка дизайн-концепции**

На первом этапе проектной деятельности были проанализированы требования заказчика, проведен опрос и составлен портрет целевой аудитории, проведен осмотр территории, выполнены необходимые замеры, составлена ситуационная схема детской площадки (рис. 1). В процессе проектной деятельности проводились консультации команды с профильными экспертами. Пожелания и ограничения заказчика: сделать акцент на экологический

стиль как по материалам, так и по используемым цветам; на территории площадки будет выделена зона для тематических арт-объектов; площадка преимущественно для детей до 7 лет, при разработке учитывать требования Технического регламента «О безопасности оборудования для детских игровых площадок» (ТР ЕАЭС 042/2017). Обеспечение безопасности детей – основное требование при проектировании, строительстве и эксплуатации игрового пространства, поэтому участники проектной команды изучали стандарты в области оборудования детских игровых площадок [1–5].

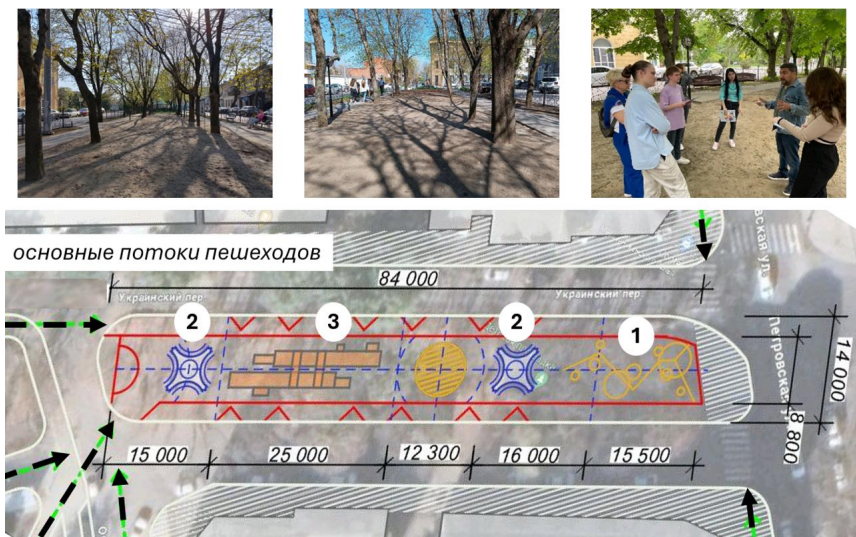


Рис. 1. Ситуационная схема детской площадки

Далее осуществлялся поиск, систематизация и анализ существующих решений в области дизайна детских игровых площадок и зон отдыха горожан (рис. 2), при этом использовалась методология дизайн-мышления [6–8]. Рассматривались в том числе аналоги детских площадок и игровых городков для детей в этническом стиле. Параллельно студенты прорабатывали цветовые схемы и анализировали материалы, применяемые в сфере изготовления оборудования для детей. Для удобства организации командной работы над проектом и взаимодействия с представителями заказчика все материалы по проекту размещались на онлайн-доске Miro, а планирование

задач для рабочей группы проводилось с помощью task-трекера MS Planner [9].

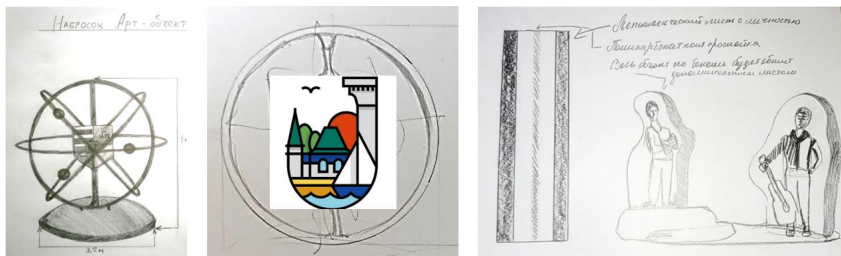


*Рис. 2. Аналоги*

Следующей задачей стало формирование собственной дизайн-концепции. На основе анализа полученной от заказчика информации, рассмотренных аналогов, опросов целевой аудитории проведено зонирование территории площадки. Было принято решение выделить несколько зон: зона с арт-объектами, зона отдыха со скамейками, игровая зона для детей.

Зона 1 с арт-объектами: необходимо разработать привлекательные арт-объекты, которые будут обращать на себя внимание горожан и туристов и служить визитной карточкой площадки (рис. 3), обеспечить доступность для фотосессий и возможность интеракции с объектами с целью ознакомиться с информацией об истории города, выдающихся личностях и событиях (как вариант использование системы QR-кодов со ссылками на информационные ресурсы). Во входной группе, расположенной у центральной улицы города, будет арт-объект с современным логотипом города Таганрога, а также арт-объекты с фигурами известных людей города.





*Рис.3. Зона 1 с арт-объектами*

Зона отдыха со скамейками: требуется разместить комфортные и стильные скамейки в удобных местах для отдыха и наблюдения за игровой зоной. В зоне отдыха предусмотрены элементы ландшафтного дизайна и растительность для создания природного и уютного ощущения на площадке (рис. 4).



*Рис. 4. Зона 2 отдыха со скамейками*

Игровая зона: необходимо создать зону с разнообразными качелями разного дизайна и размера для различных возрастных групп – мам с малышами, дошкольников постарше. Обеспечить безопасность и надежность конструкций качелей, соблюдая все стандарты безопасности [1–5]. Также в данной зоне планируются разнообразные игровые элементы, соответствующие детскому возрасту, которые способствуют развитию физических и интеллектуальных навыков [10]. Основным элементов станет игровой комплекс в экологическом стиле (рис. 5). Обоснованный выбор конструкций и материалов обуславливает не только экономичность и сохранность, но и долговечность и гигиеничность игровых элементов. Для проектируемой детской площадки планируется использовать дерево, металл для каркасов, специальная пластмасса для горок и других элементов. Цветовая палитра выбрана с учетом расположения площадки в историческом центре города в



природной цветовой гамме: цвета дерева тик, орех, палисандр, а также оттенки голубой (#8ABBE7), зеленый (#506A4E), желтый (#F8C04D). Помимо планировочного решения, разработаны эскизы объектов, доработаны 3D-модели игровых компонентов. Техническая часть данного дизайн-проекта выполнялась в программе Компас 3Д.

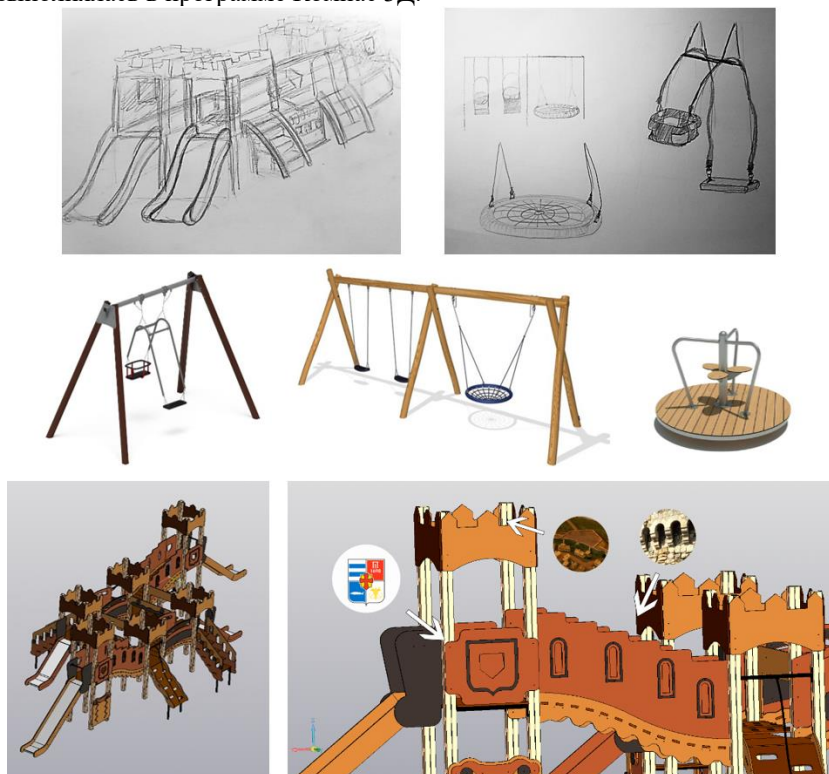


Рис. 5. Игровая зона

### Заключение

В процессе создания проекта был разработана дизайн-концепция, которая позволит создать уникальное и гармоничное пространство для игры, отдыха и взаимодействия с историческим окружением города, удовлетворяя потребности и интересы детей дошкольного возраста, их родителей, горожан и туристов. Предметно-пространственная среда, окружающая ребенка, влияет на различные аспекты его развития, включая культурный, физический и моральный. Поэтому проектирование детской игровой площадки

требует учета многих факторов: функциональность, универсальность, безопасность эксплуатации, эстетический дизайн, социальные аспекты и т. д. Все эти факторы были приняты во внимание при работе над проектом, проводились консультации со специалистами, представителями городской администрации. Грамотное функциональное и планировочное размещение игровых пространств на территории является важным условием для развития детей и сохранения их здоровья.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технический регламент «О безопасности оборудования для детских игровых площадок» (ТР ЕАЭС 042/2017)// <https://docs.cntd.ru/document/456065182> (дата обращения 05.06.2024).
2. ГОСТ Р 59010–2020 «Оборудование и покрытия игровых площадок»// <https://docs.cntd.ru/document/1200175701> (дата обращения 05.06.2024).
3. ГОСТ 34995–2023 «Оборудование и покрытия игровых площадок»// <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=255154> (дата обращения 05.06.2024).
4. ГОСТ Р 52167–2012 «Оборудование и покрытия детских игровых площадок. Безопасность конструкции и методы испытаний качелей»// <https://docs.cntd.ru/document/1200098412> (дата обращения 05.06.2024).
5. ГОСТ Р 52168–2012 «Оборудование и покрытия детских игровых площадок. Безопасность конструкции и методы испытаний горок. Общие требования»// <https://docs.cntd.ru/document/1200096282> (дата обращения 05.06.2024).
6. Дизайн продуктов, дизайн интерьеров, дизайн среды – дизайн мышления/ В.А. Хорохордин, Т.Ю. Фальковская – 2021. – 353 с.
7. *Ибрагимов И. А.* Архитектурное проектирование детской игровой площадки для увлекательных игр. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2019. – 95 с.
8. *Мицаева Ч.В., Поляков Н.В.* Современные тенденции в проектировании детских игровых площадок. – Томск: Изд-во Вестник ТГАСУ. 2023. – №5. – С. 23–37.
9. *Калашикова Т.Г.* Особенности реализации проектно-образовательного интенсива ЮФУ в онлайн-формате// «Цифровизация инженерного образования»: сборник материалов конференции – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2021. – С. 90–96.
10. *Симонова Н.А., Орехов В.В., Аббасов И.Б.* Дизайн и технология изготовления этнической детской площадки «Хололо»// Материалы Всероссийской научно-технической конференции «КомТех-2023»: в 2 т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2023. Т.1. – С. 281–292.

**Калашникова Татьяна Григорьевна**, к.т.н., доцент кафедры инженерной графики и компьютерного дизайна Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, корп. «Б», 347900, телефон: +7 (8634) 37-17-94, e-mail: kalashnikovatg@sfedu.ru.

**Дружинина Александра, Михеев Вячеслав, Богунова Александра, Завернина Елизавета, Нежнова Антонина**, студенты направления 29.03.04 ТХОМ кафедры инженерной графики и компьютерного дизайна ИРТСУ ЮФУ, Россия, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, корп. «Б», 347900, телефон: +7 (8634) 37-17-94.

**Kalashnikova Tatiana**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor, Department of engineering graphics and computer design, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 22 Chekhov street, 22, building «B», 347900, phone: +7 (8634) 37-17-94, e-mail: kalashnikovatg@sfedu.ru.

**Druzhinina Alexandra, Mikheev Vyacheslav, Bogunova Alexandra, Zavernina Elizaveta, Nezhnova Antonina**, students of the direction 03.29.04 THOM Department of Engineering Graphics and Computer Design Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 22 Chekhov street, 22, building «B», 347900, phone: +7 (8634) 37-17-94.

УДК 621.311.6

Панычев Андрей Иванович, Максимов Александр Викторович

**РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
ОСОБЕННОСТЕЙ ОДНОФАЗНЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ  
ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**

*Представлен реконфигурируемый виртуальный стенд для изучения характеристик и параметров полупроводниковых однофазных неуправляемых выпрямителей, разработанный в среде схемотехнического моделирования Multisim. Предложены методики выполнения основной и дополнительной программ исследования особенностей данного функционального узла. Реконфигурирование состава выпрямителя посредством коммутации ветвей электрической схемы позволяет исследовать основные свойства и получить оценки параметров однофазного однополупериодного и мостового неуправляемых выпрямителей с различными пассивными сглаживающими фильтрами. Углубленное изучение характеристик выпрямителей предусматривает самостоятельное внесение обучающимися изменений в схему в части замены одиночных электрических вентилях последовательной и параллельной комбинацией диодов, а также формирования многозвенного и резонансного индуктивно-емкостных сглаживающих фильтров. Электропитание, выпрямители, САПР, инженерное образование.*

Panychev Andrey Ivanovich, Maksimov Aleksandr Viktorovich

**RECONFIGURABLE STAND FOR STUDYING THE SINGLE-PHASE  
UNCONTROLLED RECTIFIERS FEATURES**

*A reconfigurable virtual stand for studying the semiconductor single-phase uncontrolled rectifiers characteristics and parameters, developed in the Multisim circuit modeling environment, is presented. The methods of performing the main and additional programs for studying the features of this functional node are proposed. Reconfiguration of the rectifier composition by switching the electrical circuit branches makes it possible to investigate the basic properties and obtain estimates of the parameters of single-phase single-half-period and bridge uncontrolled rectifiers with various passive ripple filters. An in-depth study of the rectifiers characteristics provides for students to independently make changes to the circuit in terms of replacing single electric valves*

*with a serial and parallel combination of diodes, as well as the formation of multi-link and resonant inductive-capacitive ripple filters.*

*Power supply, rectifiers, CAD, engineering education.*

### **Введение**

Инженерными образовательными программами в области электроники, радиотехники и систем связи предусмотрено приобретение студентами навыков использования систем автоматизированного схемотехнического проектирования электрических цепей. Наиболее популярные САПР для имитационного моделирования электроники и их краткие описания приведены на сайте [1].

Программным пакетом, хорошо адаптированным для образовательных целей и позволяющим моделировать электронные цепи, анализировать их работу без создания реальной схемы и использования физических измерительных приборов является САПР NI Multisim. Основные преимущества NI Multisim – простой наглядный интерфейс, мощные средства графического анализа результатов моделирования, наличие виртуальных измерительных приборов, копирующих реальные аналоги. Библиотека элементов содержит более 2000 SPICE-моделей компонентов National Semiconductor, Analog Devices, Phillips, NXP и других производителей. Для имитационного моделирования электро-преобразовательных устройств важно, что разработаны библиотеки электромеханических моделей, импульсных источников питания, преобразователей мощности [2, 3].

### **Виртуальный реконфигурируемый стенд**

Виртуальный лабораторный реконфигурируемый стенд для изучения однофазных неуправляемых выпрямителей приведен на рис. 1.

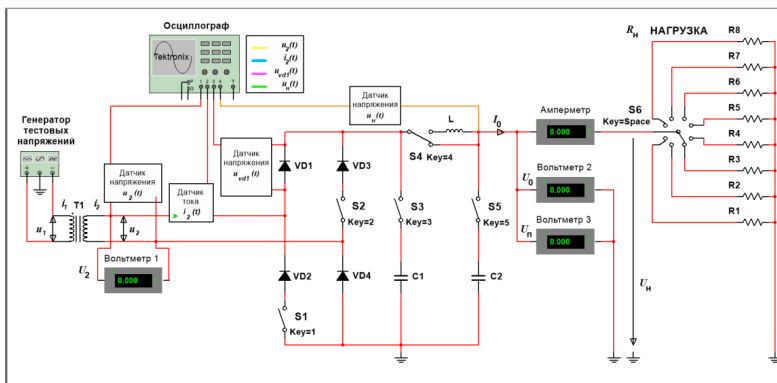


Рис. 1. Схема реконфигурируемого стенда для изучения однофазных неуправляемых выпрямителей

Стенд содержит следующие функциональные элементы:

- четыре диода VD1...VD4, формирующие исследуемые схемы выпрямления;
- дроссель L и конденсаторы C1, C2, формирующие исследуемые сглаживающие фильтры;
- генератор тестовых напряжений;
- силовой трансформатор T1;
- комплект резисторов НАГРУЗКА;
- осциллограф;
- амперметр и вольтметры.

Реконфигурирование схемы однофазного выпрямителя, подключенного к вторичной обмотке силового трансформатора T1, производится с помощью переключателей S1...S5.

Переключателями S1 и S2 задается одна из однофазных схем выпрямления:

- однополупериодная (S1 и S2 разомкнуты); выпрямительную функцию выполняют последовательно включенные диоды VD1 и VD4; обратный диод, функцию которого выполняет VD3, в схему вводится переключателем S2;
- мостовая (S1 и S2 замкнуты); выпрямление выполняется диодами VD1...VD4.

Переключателями S3, S4 и S5 формируется один из вариантов пассивного сглаживающего фильтра:

- без фильтра (переключатели S3 и S5 разомкнуты, S4 в нижнем положении);
- емкостной (S3 замкнут, S4 в нижнем положении);
- индуктивный (S3 и S5 разомкнуты, S4 в верхнем положении);
- индуктивный с обратным диодом (S2 замкнут, S3 и S5 разомкнуты, S4 в верхнем положении);
- индуктивно-емкостной Г-образный (S5 замкнут, S4 в верхнем положении);
- индуктивно-емкостной П-образный (замкнуты S3 и S5, S4 в верхнем положении).

Переключателем S6 выбирается значение сопротивления нагрузки  $R_H$ . Назначение измерительных приборов следующее.

• Осциллограф Tektronix TDS 2024 предназначен для одновременного наблюдения и исследования временной взаимосвязи электрических величин:

- напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $u_2$ ;
- тока во вторичной обмотке трансформатора  $i_2$ ;
- напряжения на выпрямительном диоде  $u_{VD1}$ ;
- выпрямленного напряжения на нагрузке (после фильтра)  $u_H$ .

• Вольтметр 1 измеряет действующее значение входного напряжения  $U_2$ .

• Вольтметр 2 измеряет постоянную составляющую выпрямленного напряжения  $U_0$ .

• Вольтметр 3 измеряет действующее значение напряжения пульсации  $U_{П}$ .

• Амперметр измеряет постоянную составляющую тока нагрузки  $I_0$ .

Использование виртуального осциллографа Tektronix TDS 2024 является отличительной особенностью стенда и существенно упрощает выполнение лабораторной работы, т.к. данный тип реальных осциллографов широко применяется в физических лабораторных стендах многих инженерных дисциплин.

### **Программа исследований однофазных неуправляемых выпрямителей**

Реконфигурируемый стенд для изучения однофазных неуправляемых выпрямителей применен в лабораторном практикуме [4].

Стандартная программа практикума включает измерение:

- формы токов и напряжений в однофазных однополупериодной и мостовой схемах выпрямителей;
- нагрузочных характеристик выпрямителей с различными пассивными сглаживающими фильтрами;
- зависимостей коэффициентов пульсаций и угла отсечки тока вентиля от тока нагрузки;
- коэффициентов сглаживания фильтров.

Дополнительным заданием предусмотрены исследования:

- формы токов и напряжений, коэффициентов сглаживания сглаживающих фильтров, угла отсечки тока выпрямительного диода в режиме работы выпрямителей, близких к режиму короткого замыкания;
- однофазных неуправляемых выпрямителей при прямоугольной форме входного напряжения;
- однофазных неуправляемых выпрямителей при треугольной форме входного напряжения.

Также стенд предусматривает возможность исследования свойств составных электрических вентилях, применяемых в мощных выпрямителях. В библиотеке компонентов стенда размещены сборки диодов, предназначенные для увеличения прямого тока (рис. 2,а) и обратного напряжения (рис. 2,б) электрического вентиля выпрямителя.

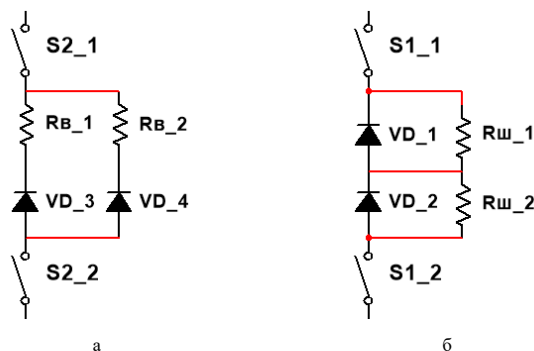


Рис. 2. Схемы параллельного (а) и последовательного (б) включения электрических вентилях

Студенты могут исследовать влияние типа диода и величины сопротивления выравнивающих и шунтирующих резисторов на основные параметры выпрямителя.



## **Выводы**

Реконфигурируемый стенд, разработанный в системе моделирования радиоэлектронных устройств NI Multisim, обеспечивает возможность исследования характеристик и параметров однофазных однополупериодного и мостового неуправляемых выпрямителей с различными пассивными сглаживающими фильтрами. Углубленное изучение особенностей этих функциональных узлов источников электропитания включает анализ работы в режиме, близком к короткому замыканию на выходе, при входных напряжениях различной формы, при использовании составных электрических вентилей, обеспечивающих большой ток и высокое напряжение в нагрузке.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. URL: [https://cxem.net/software/soft\\_CAD.php](https://cxem.net/software/soft_CAD.php) (дата обращения 20.05.2024 г.).
2. *Хернтер М.Е.* Электронное моделирование в Multisim. – М.: Книга по требованию, 2009. – 500 с.
3. *Шестеркин А.Н.* Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 943 с.
4. *Панычев А. И., Гарматюк С. С., Ваганова А. А., Марков К. В.* Устройства электропитания радиоэлектронных средств: учебное пособие / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2021. – 249 с.

**Панычев Андрей Иванович**, кандидат технических наук, доцент института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7 (8634) 37-16-34, email: aipanychev@sfedu.ru.

**Максимов Александр Викторович**, кандидат технических наук, доцент института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7 (8634) 37-16-34, email: avmaksimov@sfedu.ru.

**Panychev Andrey Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), associate Professor of the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 44 Nekrasovsky per., Taganrog, Russia, 347922, phone: +7 (8634) 37-16-34, email: aipanychev@sfedu.ru.

**Maksimov Aleksandr Viktorovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), associate Professor of the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 44 Nekrasovsky per., Taganrog, Russia, 347922, phone: +7 (8634) 37-16-34, email: avmaksimov@sfnedu.ru.

УДК 004.942

Шиндор Ольга Владимировна, Кокунин Петр Анатольевич

**СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В СРЕДЕ  
ГРАФИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ИНЖЕНЕРНЫМ  
ДИСЦИПЛИНАМ**

*Целью проведения практических занятий по инженерным дисциплинам является получение студентами умений и навыков в некоторой предметной области. В работе рассматривается возможность применения среды графического программирования LabVIEW при проведении практических занятий в рамках дисциплин, связанных с цифровой обработкой сигналов. Приведены примеры разработки виртуальных приборов, демонстрирующих применение теоретических знаний на практике.*

*Графическое программирование, виртуальный прибор, цифровая обработка сигналов.*

Shindor Olga Vladimirovna, Kokunin Petr Anatolevich

**APPLICATION OF GRAPHIC PROGRAMMING ENVIRONMENT TO  
CREATE VIRTUAL INSTRUMENTS WHEN CONDUCTING  
PRACTICAL CLASSES IN ENGINEERING DISCIPLINES**

*The purpose of conducting practical classes in engineering disciplines is for students to gain skills in a certain subject area. The paper examines the possibility of using the LabVIEW graphical programming environment in practical classes for disciplines related to digital signal processing. There are examples of virtual instruments which demonstrates the application of theoretical knowledge in practice.*

*Graphic programming, virtual device, digital signal processing.*

## **Введение**

Говоря о современных цифровых технологиях и программных средствах, которые могут использоваться в рамках учебного процесса и проведения практических и лабораторных занятий, в частности, можно упомянуть системы автоматизированного проектирования (Компас, NX, AutoCad), компьютерной математики (Mathcad, GeoGebra, Maple, Mathematica), моделирования электрических схем (Micro-Cap, OrCAD, Electronics Workbench, SimOne), топологии печатных плат (DipTrace, P-Cad), платформы для разработки программного обеспечения (Microsoft Visual Studio, GitHub, PyCharm, Xcode). Отдельно можно выделить интегрированную среду разработки Matlab, позволяющее выполнять инженерные и математические расчеты, моделировать процессы, работать с матричными базами данных.

В данной работе рассматривается применение среды графического программирования LabVIEW для получения практико ориентированных знаний.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) фирмы National Instruments с начала 2000-х годов в России используется в учебном процессе для выполнения лабораторных практикумов по физике, механике, аналоговой и цифровой электроники, схемотехнике.

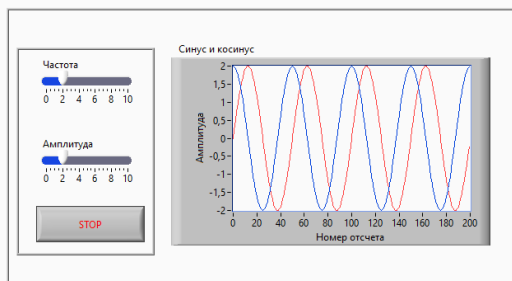
Особенностями данного программного обеспечения является возможность создания виртуальных приборов, полностью имитирующих работу виртуальных приборов, имеющих лицевую панель с расположенными на ней элементами управления и индикации. Блок-диаграмма, являющаяся аналогом текстового кода, формируется из узлов и функций, отвечающих за выполнение некоторых функций. Разработка виртуальных приборов позволяет студентам смоделировать и реализовать некоторый процесс, например, вычисления значения некоторой величины, имитировать формирование сигналов и проанализировать их, рассмотреть поведение некоторой системы при изменении входных параметров или входных воздействий. Кроме того, появляется возможность изучения графического языка программирования. Таким образом, создание виртуальных приборов позволяет получить опыт реализации имитационного моделирования измерительного прибора или системы. Использование дополнительно к программному обеспечению оборудования фирмы National Instruments, например, платформу NI ELVIS, Virtual Bench, myRIO, возможно применение реальных источников данных (датчиков), обработка данных и визуализация результатов. В этом случае студенты получают навык работы с реальными электрическими

схемами и радиоэлектронными компонентами, а также программирования в графической среде. В этом случае осуществляется синергетическое соединение виртуального и натурального моделирования. Все это является дополнительными возможностями для понимания предмета и погружения в его специфику, изучение отдельных тем.

### **Виртуальные приборы для цифровой обработки сигналов**

В курсе цифровой обработки сигнала первоначально необходимо сформировать у студентов понимание видов сигналов, их параметров и способов генерации. Для этого в LabVIEW существует несколько возможностей. Сигналы можно задать математическими выражениями, сформировать с помощью имеющихся в программе генераторов, получить с некоторого датчика, используя платформу NI ELVIS или другие технические решения. У первых двух видов сигналов можно менять частоту, амплитуду, фазу. Пример лицевой панели виртуального прибора, осуществляющего генерацию периодических сигналов по формулам, приведена на рис. 1.

Классическим методом анализа сигналов является спектральный анализ. Для его изучения используются периодический, прямоугольный, треугольный, пилообразный сигналы, для этого используются программные генераторы. На первом этапе студенты создают виртуальный прибор, на втором этапе изучают практическую реализацию спектрального анализа. Лицевая панель и блок-диаграмма анализатора спектра, реализованного в LabVIEW приведены на рис. 2.



*Рис. 1. Лицевая панель виртуального прибора генерации периодических сигналов с помощью формулы Эйлера*

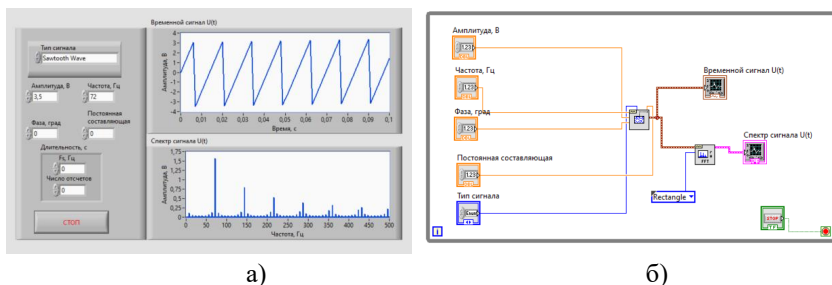


Рис. 2. Анализатор спектра: лицевая панель а), блок-диаграмма б)

При использовании платформы NI ELVIS возможно получение данных с реальных датчиков и затем выполнение спектрального анализа измеренных сигналов.

Другим способом анализа реальных сигналов, в случае отсутствия дополнительного оборудования фирмы National Instruments, является загрузка в виртуальный прибор замеренных сигналов на объектах. Для погружения в вибродиагностику предлагается использовать значения виброскоростей, измеренных на обмотке статора гидрогенератора при различных режимах работы гидроагрегата. На реальном сигнале демонстрируются возможности спектрального анализа. На рис. 3 приведена лицевая панель спектрального анализатора вибродиагностического сигнала.

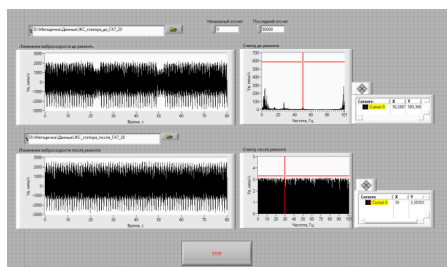


Рис. 3. Лицевая панель спектрального анализатора

Методом, позволяющим выявить локальные особенности сигнала, является вейвлет-анализ. Если преобразование Фурье реализует представление сигнала в частотной области, то вейвлет-анализ позволяет получить представление сигнала в частотно-временной области. Изучение актуальных методов обработки сигналов позволит получить знания, отвечающие

вызовам современного мира. Вейвлет-преобразование представлено в LabVIEW значительным разнообразием материнских вейвлетов, что является достаточным даже для проведения научных исследований. Основной сложностью непрерывного вейвлет-преобразования является интерпретация его результатов. Для этого в виртуальных приборах в качестве визуализации используются спектрограмма и 3D график вейвлет-коэффициентов. Для демонстрации возможностей спектрального анализа и вейвлет-преобразования на лицевой панели предусмотрена осциллограмма спектра сигнала. Модельные исследуемые сигналы являются нестационарными. Лицевая панель анализатора сигнала методом непрерывного вейвлет-преобразования приведена на рис. 4.

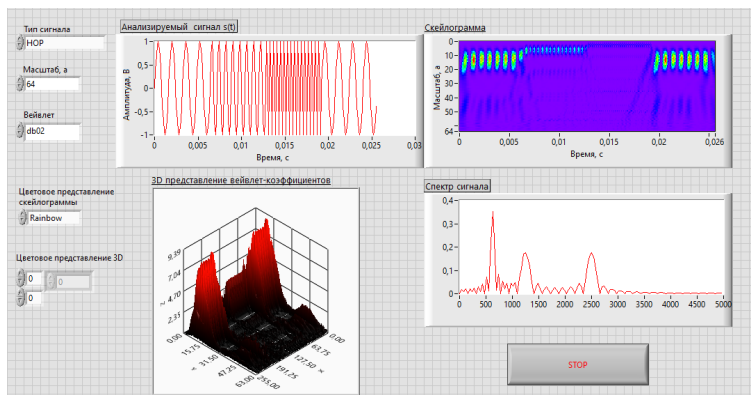


Рис. 4. Анализ сигнала методом непрерывного вейвлет-преобразования

Другим способом анализа реальных сигналов, в случае отсутствия дополнительного оборудования фирмы National Instruments, является загрузка в виртуальный прибор замеренных сигналов на объектах. Для погружения в вибродиагностику предлагается использовать значения виброскоростей, измеренных на обмотке статора гидрогенератора при различных режимах работы гидроагрегата. На реальном сигнале демонстрируются возможности спектрального анализа. На рис. 4 приведена лицевая панель спектрального анализатора вибродиагностического сигнала.

Еще одной возможностью LabVIEW является интеграция в блок-диаграмму кода текстовых языков программирования: Си++, Matlab, Python. Это позволяет использовать одновременно классические текстовые языки программирования и графический язык программирования, тем самым

расширяя возможности виртуальных приборов. К примеру, в LabVIEW представлены не все материнские вейвлеты, их можно добавить, используя Python или Matlab.

### **Выводы**

В работе показана возможность применения среды графического программирования LabVIEW для практических занятий в рамках дисциплины «Цифровая обработка сигналов».

Разработка виртуальных приборов позволяет визуализировать теоретические сведения и расширить понимание применения методов обработки сигналов.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.
2. NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite, (NI ELVIS), National Instruments, 2018.
3. Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий NI ELVIS. Технические средства. Руководство пользователя, Новосибирский государственный технический университет, Российский филиал корпорации National Instruments, 2006.
4. NI ELVIS III 1.2. Комплект виртуальных измерительных приборов для учебной лаборатории. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://nitech.nstu.ru/upload/lib/2020\\_Translated/ELVIS%20III\\_%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%20%D1%8D%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%BB%D1%83%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20\(%D0%9D%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BB%D0%BE%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D1%8B\).pdf](https://nitech.nstu.ru/upload/lib/2020_Translated/ELVIS%20III_%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%20%D1%8D%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%BB%D1%83%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20(%D0%9D%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BB%D0%BE%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D1%8B).pdf) (дата обращения 20.05.2024).
5. Щепетов А.Г. Преобразование измерительных сигналов: учебник и практикум для вузов/ А.Г. Щепетов, Ю.Н. Дьяченко; под редакцией А.Г. Щепетова. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 270 с.
6. Лысенко О.В., Гавриш П.П., Мелешкин Ю.А. Учебная лаборатория электроники на аппаратно-программном комплексе ELVIS-LabVIEW-Multisim: учеб. пособ. /О.В. Лысенко, П.П. Гавриш, Ю.А. Мелешкин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. – 76 с.

7. *Цимбалист Э.И.* Электроника: часть первая. Лабораторный практикум по аналоговой электронике в программно-аппаратной среде NI ELVIS II: учебное пособие /Э.И. Цимбалист, П.Ф. Баранов, С.В. Силушкин, Ю.М. Фомичев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 302 с.
8. *Суранов А. Я.* LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
9. *Лунов С.Ю., Муякишин С.И., Шарков В.В.* LabVIEW в примерах и задачах. Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Обучение технологиям National Instruments». Нижний Новгород, 2007, 101 с.
10. *Евдокимов Ю.К., Денисов Е.С., Шехтурин Д.В., Шиндор О.В.* Автоматизированный сбор и цифровая обработка данных в измерительных системах. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012.
11. *Тревис Дж.* LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н.А. – М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. – 544 с.
12. САД-программы // Сайт паяльник URL: [https://cxem.net/software/soft\\_CAD.php](https://cxem.net/software/soft_CAD.php) (дата обращения: 20.05.2024).
13. Математические программы для Windows / URL: <https://ru.malavida.com/windows/cat/maths> (дата обращения: 20.05.2024).
14. Программы для проектирования печатных плат // Сайт паяльник URL: [https://cxem.net/software/soft\\_CAD.php](https://cxem.net/software/soft_CAD.php) (дата обращения: 20.05.2024).

**Шиндор Ольга Владимировна:** кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и искусственного интеллекта Института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия, город Казань, улица ул. Сайлиха Сайдашева д.12 к.3, 420101, телефон: +7(927)030-15-49, email: [OVShindor@kpfu.ru](mailto:OVShindor@kpfu.ru).

**Кокунин Петр Анатольевич:** кандидат технических наук, и.о. зав. кафедры физики перспективных технологий и материаловедения Института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия, город Казань, улица Бутлерова 4, 420012, телефон: +7 (917) 873-22-17, email: [pkokunin@mail.ru](mailto:pkokunin@mail.ru).

**Shindor Olga Vladimirovna:** Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor Department of Robotics and Artificial Intelligence, Institute of Artificial



Intelligence, Robotics and System Engineering, KFU, Russia, Kazan, st. Saylikha Saidasheva, 12/3, 420101, phone: +7(927)030-15-49, email: OVShindor@kpfu.ru.

**Kokunin Petr Anatolevich:** Candidate of Technical Sciences (Ph.D acting head Department of Physics of Advanced Technologies and Materials Science, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering, KFU, 420012, Russia, Kazan, 4 Butlerova Street, phone: +7 (917) 873-22-17, email: pkokunin@mail.ru.

УДК 621.321

Резников Денис Александрович, Леонова Антонина Валерьевна,  
Шпаковская Оксана Юрьевна

**РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
В ПОМЕЩЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХ-  
НОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

*Целью работы является исследование прохождения радиосигнала от аппаратно-программного комплекса для поддержания заданных климатических параметров в помещении на базе беспроводной сети Wi-Fi, функционирующей в диапазоне 2,4 ГГц, со значительным скоплением людей. Задачи включают выбор аппаратных средств (Intel(R) Dual Band Wireless-N 7260, Точки доступа MikroTik mAP 2<sup>nd</sup>, MikroTik 951ui-2hnd), программных средств (NetSpot v. 3.1) и тестирование системы в различных условиях эксплуатации. Результаты показали, что большое скопление людей негативно сказывается на скорости передачи данных и качестве связи ухудшает производительность и устойчивость сети. Таким образом, предложенная система является показателем к выбору конфигурации беспроводной сети для создания надежной и эффективной сети в области Интернета вещей, обеспечивая оптимальный баланс между производительностью и надежностью.*

*Скорости передачи данных, Wi-Fi сеть, производительность сети, качество связи, MikroTik, уровень сигнала.*

Reznikov Denis Alexandrovich, Leonova Antonina Valeryevna,  
Shpakovskaya Oksana Yuryevna

**DEVELOPMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX  
FOR MAINTAINING SPECIFIED CLIMATE PARAMETERS IN A  
ROOM USING WIRELESS DATA TRANSMISSION TECHNOLOGIES**

*The aim of the study is to transmit a radio signal from a hardware and software complex in order to maintain specified climatic parameters in a room, using a wireless Wi-Fi network that operates in the 2.4 GHz band in the presence of a significant number of people. Tasks include selecting appropriate hardware (Intel(R) Dual Band Wireless-N 7260, MikroTik mAP2<sup>nd</sup> access points, MikroTik 951ui-2hnd) and software (NetSpot*

v. 3.1), as well as testing the system under various operating conditions. The results indicate that a large number of people can negatively affect data transfer speed and communication quality, impairing network performance and stability. As such, the proposed system serves as an indicator for selecting a wireless network configuration in order to create a reliable and efficient Internet of Things network, providing an optimal balance between performance and reliability. Data transfer rates, wireless network performance, network stability, communication quality, and MikroTik are all relevant terms to consider in this context.

**Введение.** С развитием Интернета вещей (IoT) количество подключенных устройств увеличивается, создавая высокие требования к качеству связи. Поскольку произвольный выбор частот невозможен из-за жесткого регулирования и лицензирования [1], наиболее используемым безлицензионным диапазоном остается 2.4 ГГц. Диапазон занят множеством устройств, таких как Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee и другие [2], что приводит к увеличению загруженности и зашумленности спектра, снижая дальность работы, ухудшая качество связи и увеличивая вероятность коллизий.

Для минимизации этих негативных факторов и обеспечения надежной связи разрабатываются новые стандарты и технологии, способные эффективно работать в условиях высокой загруженности спектра. Одним из перспективных направлений является использование технологии организации диспетчера (CAPsMAN) управляемых точек доступа.

Для реализации данного решения используются популярные и доступные компоненты. В качестве диспетчера микроконтроллера выбран MikroTik 951ui-2hnd, в качестве точек доступа выбраны MikroTik mAP 2<sup>nd</sup>, данная аппаратная платформа обеспечивает гибкую настройку параметров связи, удобный способ питания удаленных точек доступа по технологии POE.

Ячеистая сеть обладает рядом преимуществ, это единое Wi-Fi-покрытие под одним SSID, состоящее из ячеек, развёрнутых несколькими равноправными устройствами-узлами. Между собой узлы соединяются по воздуху через отдельный канал, но можно использовать и проводную связь. Стабильная связь модулей аппаратно-программного комплекса – это ключевой фактор в успешном управлении климатическими параметрами в помещении.

### **Описание экспериментальной установки и аппаратных средств.**

Для реализации установки использовались доступные и недорогие компоненты, что снизило затраты и упростило воспроизводимость эксперимента.

Изначально использовалась беспроводная связь на базе MikroTik 951ui-2hnd, однако его мощности на существующий размер помещения оказалось недостаточно. Поэтому зону его покрытия поэтапно расширили тремя дополнительными точками доступа MikroTik mAP 2<sup>nd</sup>.

Использовались стандартные встроенные антенны, с усилением 1.2 dBi.

Для визуализации применялось программное обеспечение NetSpot v.3.1, обеспечивающая удобный вывод информации в виде тепловых карт.

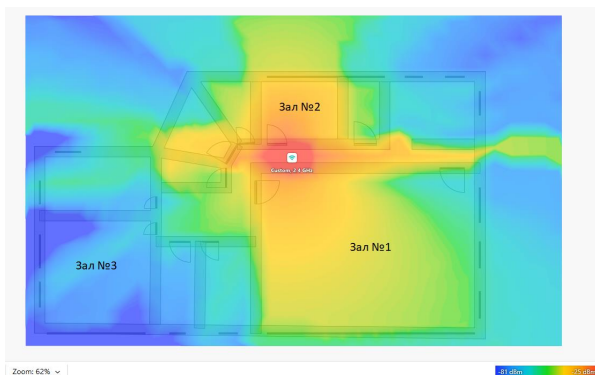
Эксперименты проводились в здании со сложным расположением помещений, большим количеством перегородок и количеством людей до 150 человек.

Этот подход позволил провести комплексное исследование качества сети на базе доступных компонентов.

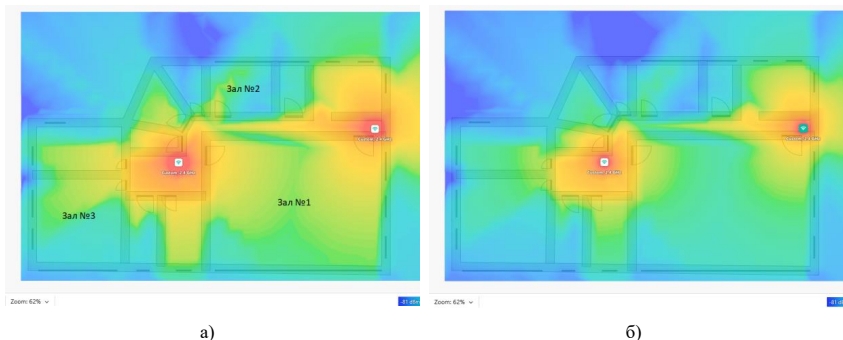
**Тестирование, анализ и результаты.** Для оценки качества связи проводилось тестирование с использованием разного количества точек доступа и разного количества людей в помещении.

На рис. 1 представлена тепловая карта распространения сигнала в пустом помещении с одной точкой доступа. Как можно заметить, уровень сигнала в смежных помещениях на достаточно низком уровне, который не сможет обеспечить достаточного качества связи модулей комплекса с центральным блоком.

На рис. 2 представлена тепловая карта распространения сигнала в пустом помещении с двумя точками доступа. Большинство помещений покрыты сетью с достаточным уровнем сигнала. Использование двух точек доступа является достаточным в случае отсутствия большого количества людей. Но в случае увеличения количества людей в помещении качество покрытия существенно ухудшилось. Карта покрытия на рисунке 4 показывает, что уровень сигнала в отдаленных помещениях упал до -80 dBm. Использование 2 точек доступа является не достаточным в случае присутствия большого количества людей.

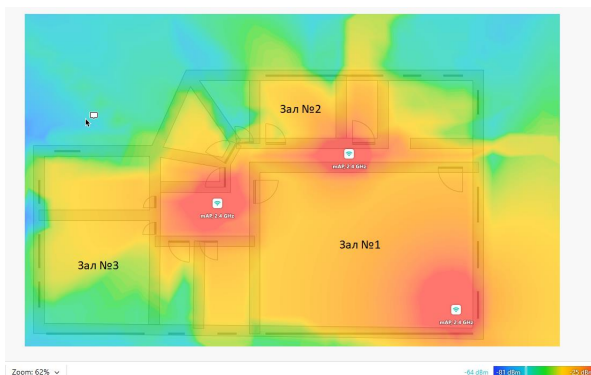


*Рису. 1. Тепловая карта распространения радиосигнала от одной точки доступа*

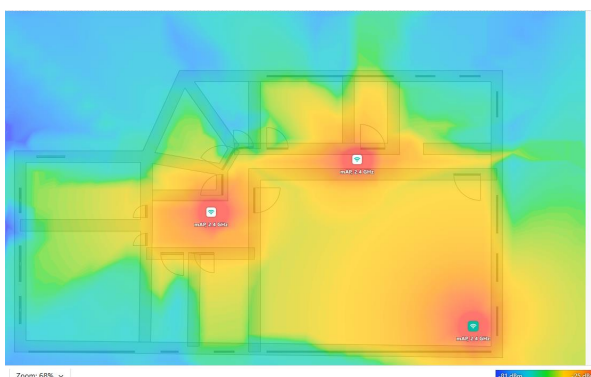


*Рис. 2. а) -Тепловая карта распространения сигнала от двух точек доступа; б) – Тепловая карта распространения сигнала от двух точек доступа при скоплении большого количества людей*

На рис. 3 представлена тепловая карта распространения сигнала от трех точек доступа. Как можно заметить все помещения покрыты сетью с хорошим уровнем сигнала. Использование 3 точек доступа является достаточным в случае отсутствия большого количества людей. В случае скопления большого количества людей (рис. 4), качество покрытия существенно не ухудшилось. Уровень сигнала в даже в отдаленных находится на уровне уверенного приема. Для данной конфигурации помещения использование 3 точек доступа является наиболее удачным выбором.



*Рис.3. Тепловая карта распространения сигнала от трех точек доступа*



*Рис. 4. Тепловая карта распространения сигнала от трех точек доступа при скоплении большого количества людей*

**Заключение.** Экспериментальные исследования подтвердили гипотезу о том, что большое (100-150 чел.) скопление людей негативно влияет на качество сигнала Wi-Fi сети.

Количество точек доступа влияет на уровень сигнала. Увеличение количества точек доступа улучшает уровень сигнала, но в то же время увеличивает взаимное влияние точек доступа друг на друга, что снижает качество связи

Экспериментальное определение качества Wi-Fi сигнала в помещении для установки АПК «Погода в офисе» показало возможность эффективно

использовать разработку в сложных помещениях с наличием перегородок и преград.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kortuem G., Kawsar F., Sundramoorthy V., and Fitton D.* Smart objects as building blocks for the internet of things // *IEEE Internet Computing*, vol. 14, no. 1, pp. 44–51, Feb. 2010

2. *Darroudi S. M., & Gomez C.* (2017). Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey. // *Sensors*, 17(7), 1467

3. Экспериментальные исследования влияния влажности стеновых строительных материалов на прохождение радиоволн нвч диапазона Сатюков А.И., Приступа А.Л., Журко В.П., Бивалькевич М.А. *Технические науки и технологии*. 2018. № 1 (11). С. 252-263.

4. Оценка затухания радиосигнала при прохождении через стену Семенко А.И., Смелянский А.А. Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2014. № 7 (85). С. 78-82.

5. Разработка и исследование математической модели прохождения гармоничных радиосигналов при наличии многих объектов Любчик В.Р. *Вестник Хмельницкого национального университета Технические науки*. 2013. № 6 (207). С. 139-146.

6. Исследование характера зависимости коэффициента прохождения электромагнитной энергии через радиопрозрачную крышку от частоты радиосигнала и типа поляризации Кабалин с.в.антенны. 2013. № 1 (188). С. 041-045.

7. Исследование прохождения радиосигнала с большой девиацией фазы в смеси с флуктуационной помехой в однополосном приемнике с амплитудно-фазовой модуляцией Ерохов Е.В. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Казань, 2002

8. Исследование вариаций параметров радиосигналов очень низкочастотного диапазона под влиянием гелио- и геофизической активностей Корсаков А.А. НИР: грант № 14-05-31056. Российский фонд фундаментальных исследований. 2014.

9. Экспериментальное исследование рассеяния радиосигнала *gpr* на ионосферных неоднородностях, вытянутых по магнитному полю Ишин А.Б., Афраймович Э.Л., Тинин М.В., Ясюкевич Ю.В. В сборнике: *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XI конференции молодых ученых "Гелио- и геофизические исследования"*. Иркутск, 2009. С. 87-90.

10. Исследование влияния характеристик радиоканала на эффективность мас-протокола сетей 5g new radio. Ахпашев Р.В., Дроздова В.Г., Лошкарев А.В. В сборнике: Современные проблемы телекоммуникаций. Материалы Международной научно-технической конференции. Новосибирск, 2020. С. 148-154.

**Резников Денис Александрович** – магистрант, кафедра встраиваемых и радиоприемных систем Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; 347900; e-mail: [dreznikov@sfedu.ru](mailto:dreznikov@sfedu.ru).

**Леонова Антонина Валерьевна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра встраиваемых и радиоприемных систем Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; 347900; e-mail: [leonova@sfedu.ru](mailto:leonova@sfedu.ru).

**Шпаковская Оксана Юрьевна** – аспирант, кафедра встраиваемых и радиоприемных систем Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; 347900; e-mail: [oshpakovskaya@sfedu.ru](mailto:oshpakovskaya@sfedu.ru);

**Reznikov Denis Alexandrovich** – undergraduate student, Department of Embedded and Radio Receiving Systems Federal State Educational Institution of Higher Education "Southern Federal University", Russia, Taganrog, Engels str., 1; 347900; e-mail: [dreznikov@sfedu.ru](mailto:dreznikov@sfedu.ru) .

**Leonova Antonina Valeryevna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Embedded and Radio Receiving Systems Federal State Educational Institution of Denis Alexandrovich Higher Education "Southern Federal University", Russia, Taganrog, Engels str., 1; 347900; e-mail: [leonova@sfedu.ru](mailto:leonova@sfedu.ru) .

**Shpakovskaya Oksana Yuryevna** – postgraduate student, Department of Embedded and Radio Receiving Systems Federal State Educational Institution of Higher Education "Southern Federal University", 1 Engels str., Taganrog, Russia; 347900; e-mail: [oshpakovskaya@sfedu.ru](mailto:oshpakovskaya@sfedu.ru).



Мирошниченко Дарья Вячеславовна

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА: ПЕРЕВОД ТЕСТА В ШАБЛОН С ПОМОЩЬЮ PYTHON**

*Автоматизация процессов является актуальной темой на протяжении многих лет. Компании стараются автоматизировать работу сотрудников, чтобы увеличить объемы и качество работы, что позволяет сократить время и трудовые ресурсы компании. Цель данной статьи рассмотреть разработанный код, который автоматизирует процесс перевода теста для электронного курса в шаблон для дальнейшего импорта в систему Moodle. Разработанный код позволяет автоматизировать работу разработчика электронного курса и сократить время импорта вопросов в банк заданий в несколько раз.*

*Импорт вопросов, автоматизация процессов, электронный курс, программный код.*

Miroshnichenko Daria Vyacheslavovna

## **WORKFLOW AUTOMATION: TRANSLATING TEXT INTO A TEMPLATE USING PYTHON**

*Process automation has been a hot topic for many years. Companies are trying to automate the work of employees in order to increase the volume and quality of work, which reduces the time and labor resources of the company. The purpose of this article is to review the developed code that automates the process of converting an e-course test into a template for further import into the Moodle system. The developed code allows you to automate the work of the developer of the electronic course and reduce the time of importing questions into the task bank several times.*

*Import of questions, automation of processes, electronic course, program code.*

### **Введение**

На данный момент существует проблема при формировании электронного банка тестов по дисциплинам в системе, разработанной с помощью системы управления образовательными электронными ресурсами, которая заключается в том, что перевод теста в шаблон для импорта в банк заданий производится вручную, что занимает большое количество времени [1].

Цель данной статьи рассмотреть разработанный код, который автоматизирует процесс перевод теста для электронного курса в шаблон для дальнейшего импорта в систему Moodle.

### **Основная часть**

Разработанный код работает с текстовыми документами и ориентируется по основным паттернам, которые присущи каждому тесту, так как оформление его стандартное и обязательное для всех. Данный код ускоряет процесс в 5 раз, что упрощает работу с ресурсом и позволяет разработчику сконцентрировать свое внимание на качестве создаваемых вопросов.

На рис. 1 продемонстрирован изначальный вид вопросов закрытого типа, которые необходимо обработать.

1. Инструмент, используемый для создания исходного текста программы, называется:  
А) **Редактор**  
Б) Компилятор/асемблер  
В) Программный симулятор  
Г) Аппаратный эмулятор  
Д) Программатор
  
2. При выборе возможных архитектур и характеристик микроконтроллеров рекомендуется ориентироваться на:  
А) Использование узкоспециализированных, мелкосерийных вариантов;  
Б) **Использование наиболее свежих моделей от разработчиков;**  
В) Использование давно выпускаемых моделей, серийный выпуск которых завершается;  
Г) Использование уже известных моделей.

*Рис. 1. Пример изначального вида закрытых вопросов*

### **Пример кода**

Рассмотрим программный код, написанный на языке программирования Python. Данный код переводит вопросы закрытого типа из файла формата Word в блокнот с расширением txt для дальнейшего импорта в систему. Рассмотрим данный код.

1. Импортируем модуль для роботов с файлами формата .docx, и создаем функцию, которая принимает путь к файлу в качестве аргумента. Далее создается пустая строка для хранения результирующего текста [2, 3].

```
import docx
```

```
# Открытие файла
def process_text(file_path):
    doc = docx.Document(file_path)
    result = ""
    for paragraph in doc.paragraphs:
        text = paragraph.text.strip()
```

2. Далее проверяется текст на наличие начала строки с чисел от 1 до 70 (количество в тексте), если оно встречается, то преобразуется в формате «:1::». Далее добавляется символ «{» в новой строке.

```
# Проверка на номер вопроса
    if any(word.endswith(".") and word[:-1].isdigit() and 1 <= int(word[:-1]) <= 70 for word in paragraph.text.split()):
```

```
# Заменяем число на формат ":1::"
        text += "\n"
        text = " ".join(":" + word[:-1] + "::" if word.endswith(".") and word[:-1].isdigit() and 1 <= int(word[:-1]) <= 70 else word for word in paragraph.text.split())
        text += "\n"
        text += "{"
```

3. Далее идет проверка на шрифт, если текст полужирный, то в начале строки ставится символ «=», в остальных случаях – «~». Если строка пустая, то ставится символ «}».

```
elif any(word.endswith(".") and word[:-1].isdigit() and 1 <= int(word[:-1]) <= 100 for word in paragraph.text.split()):
```

```
# Заменяем число на формат ":1::"
        text += "\n"
        text = " ".join(":" + word[:-1] + "::" if word.endswith(".") and word[:-1].isdigit() and 1 <= int(word[:-1]) <= 100 else word for word in paragraph.text.split() )
        text += "\n"
```

```

text += "{"

elif paragraph.runs and paragraph.runs[0].bold:
    text = "=" + " " + text[0:]
elif paragraph.runs:
    text = "~" + " " + text[0:]
else:
    text += "}" + "\n"
result += text + "\n"

```

4. Когда обработка текста закончена выводится результат в командную строку. Результат работы кода представлен на рис. 2.

```

::1:: Инструмент, используемый для создания исходного текста программы, называется:
{
= Редактор
~ Компилятор/асемблер
~ Программный симулятор
~ Аппаратный эмулятор
~ Программатор
}

::2:: При выборе возможных архитектур и характеристик микроконтроллеров не рекомендуется ориентироваться на:
{
~ Использование узкоспециализированных, мелкосерийных вариантов;
~ Использование наиболее свежих моделей от разработчиков;
~ Использование давно выпускаемых моделей, серийный выпуск которых завершается;
~ Использование уже известных моделей.
= Ничего из перечисленного
}

```

*Рис. 2. Итог обработки закрытых вопросов по шаблону*

На рис. 3 продемонстрирован изначальный вид вопросов открытого типа, которые необходимо обработать.

42. Операторы языка программирования, предназначенные для организации многократного исполнения некоторых фрагментов программы называются операторами \_\_\_\_\_ **(цикла)**
43. Операторы языка программирования, предназначенные для осуществления ветвлений в зависимости от результатов вычислений называются \_\_\_\_\_ операторами **(условными)**

*Рис. 3. Пример изначального вида открытых вопросов*

## Пример кода

Рассмотрим программный код, написанный на языке программирования Python. Данный код переводит вопросы открытого типа из файла формата Word в блокнот с расширением txt для дальнейшего импорта в систему. Данный код отличается от предыдущего тем, что вместо проверки текста на полужирный и обычный, производится обработка полужирного текста в скобках. Если программа его находит, то добавляет в начало строки символ «⟷».

```
for paragraph in doc.paragraphs:
    # Поиск текста в скобках и его замена на "{\n= текст \n}"
    regex_bold = r'\((.*?)\)'
    bold_matches = re.findall(regex_bold, paragraph.text)
    for bold_text in bold_matches:
        paragraph.text = paragraph.text.replace(f"{{{bold_text}}}", f"\n{{\n=
{bold_text} \n}}")
```

Результат работы кода продемонстрирован на рис. 4.

```
:::42:: Операторы языка программирования, предназначенные для организации многократного исполнения некоторых фрагментов программы называются операторами .....
{
= цикла
}

:::43:: Операторы языка программирования, предназначенные для осуществления ветвлений в зависимости от результатов вычислений называются ..... операторами
{
= условными
}

:::44:: Для измерения длительности входного дискретного сигнала целесообразно использовать встроенный ..... микроконтроллера.
{
= таймер
}
```

*Рис. 4. Итог обработки открытых вопросов по шаблону*

## Выводы

Разработанный код позволяет автоматизировать работу разработчика электронного курса и сократить время импорта вопросов в банк заданий в несколько раз. Описанный в статье способ является самым простым и удобным способом, разработанным на языке Python.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Официальная документация Moodle URL: <https://moodle.org/?lang=ru> (дата обращения: 15.04.2024).

2. Файлы в python, ввод-вывод URL: <https://pythonru.com/osnovy/fajly-v-python-vvod-vyvod> (дата обращения: 25.04.2024).
3. Working with Documents – Python .docx URL: <https://www.geeksforgeeks.org/working-with-documents-python-docx-module/> (дата обращения: 25.04.2024).

**Мирошниченко Дарья Вячеславовна**, студентка Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, площадь Гагарина 1, 344018, телефон: +7(988)552-45-61, email: [my\\_sun\\_md@mail.ru](mailto:my_sun_md@mail.ru).

**Miroshnichenko Daria Vyacheslavovna**, student of the Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344018, phone: +7(988)552-45-61, email: [my\\_sun\\_md@mail.ru](mailto:my_sun_md@mail.ru).

УДК 303.722.4

Мирошниченко Дарья Вячеславовна

## **ЦИФРОВАЯ АНАЛИТИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

*В современном мире недостаточно просто создать продукт или услугу, необходимо также продвигать его, чтобы получить максимальную выгоду. Для это необходимо использовать аналитические инструменты и стратегии для выбора пути развития для успешного бизнеса. Цель данной статьи заключается в рассмотрении понятия «цифровая аналитика», шаги ее формирования, а также роль в формировании бизнес-стратегии.*

*Аналитический обзор, цифровая аналитика, анализ данных, наука о данных, аналитика продукта.*

Miroshnichenko Daria Vyacheslavovna

## **DIGITAL ANALYTICS AND ITS APPLICATIONS**

*In today's world, it is not enough to simply create a product or service; you must also promote it to get maximum benefit. To do this, you need to use analytical tools and strategies to choose the development path for a successful business. The purpose of this article is to consider the concept of “digital analytics”, the steps of its formation, as well as its role in the formation of business strategy.*

*Insights, Digital Analytics, Data Analytics, Data Science, Product Analytics.*

## **Введение**

Правильные аналитические инструменты и стратегии — ключ к раскрытию потенциала системы и продвижению бизнеса к беспрецедентному цифровому доминированию.

Цифровая аналитика больше, чем просто цифры и графики — это углубленный анализ поведения клиентов, преобразование больших данных в действенные стратегии, соответствующие вашим бизнес-целям.

Цифровая аналитика — лучшая защита от нехватки и перегрузки данных. Она обеспечивает надежную основу для постоянного сбора, измерения, анализа и интерпретации данных, которые вы действительно можете использовать для предоставления и масштабирования реальной персонализации для ваших потенциальных и клиентов.

## **Основная часть**

Термин «цифровая аналитика» используется для обозначения инструментов и методов, использующихся для сбора, измерения, анализа и интерпретации данных.

Цифровая аналитика — это процесс анализа цифровых данных из различных источников, таких как веб-сайты, мобильные приложения и другие. Он дает организации четкое представление о том, как ведут себя пользователи или клиенты. Благодаря цифровой аналитике компании получают представление о тех областях, где им необходимы улучшения. Цифровая аналитика помогает компаниям обеспечить лучший онлайн-опыт для своих клиентов, а также потенциальных клиентов, что постепенно приводит к достижению желаемых целей [1].

Многие люди склонны путать цифровой маркетинг с аналитикой, но между ними есть явная разница.

Цифровой маркетинг — это инновация традиционного маркетинга, которая продвигает продукты и услуги (или бренды) с использованием методов цифрового маркетинга.

То есть компания фокусирует свои услуги на разработке стратегий продаж с помощью технологий (компьютеров, мобильных устройств) и Интернета.

С другой стороны, цифровая аналитика — это консалтинговый или рекомендательный инструмент, необходимый для разработки стратегий цифрового маркетинга.

То есть первая концепция использует вторую для сбора данных и преобразования их в результаты, которые позволяют прогнозировать различные факторы (поведение пользователей, конкурентоспособность товара или бренда).

Фундаментальной целью цифровой аналитики является принятие решений, таким образом, любой владелец будет понимать и знать, как их клиенты или потенциальные клиенты взаимодействуют со всеми инструментами онлайн-взаимодействия [2].

Правильное применение плана цифровой аналитики следует за серией этапов предварительного анализа, анализа и постанализа, каждый из которых основан на определенной методологии.

Далее рассмотрим, каковы основные шаги и результаты, которые будут получены с помощью каждого из них.

При выполнении цифровой аналитики конкретного процесса или явления необходимо начать с определения основной цели процесса или явления на аналитическом уровне.

Интеллектуальный анализ данных следующий преаналитический этап, связанный с поиском наилучшей информации. Данный этап подразумевает, что в среде цифровых исследований данные поступают из самых разных онлайн-источников (блоги, форумы, веб-сайты, социальные сети, мобильные приложения и т. д.) [3].

Для этого необходимо извлечь, обработать и смоделировать данные по запросу, который соответствует целям изучаемого явления. Эти шаги также должны быть дополнены правильным выбором доступных источников.

Цифровой анализ приведет к получению большого объема данных, и не все из них можно будет принять за достоверные.

Преобразование этих данных происходит за счет применения соответствующих методологий, которые фокусируют изучение явления на наиболее актуальной или связанной информации. Для этого можно применить один из наиболее широко используемых методов до заключительного этапа: визуальное мышление, что позволяет подготовить информацию, синтезируя результаты и упрощая их интерпретацию [4].

После того как информация отобрана, очищена и преобразована, необходимо перейти к интерпретирующей визуализации результатов. Этот шаг также известен как «эксплуатация информации» и, безусловно, занимает почти всю концепцию, потому что его результаты используются для реализации корректирующих или конкретных действий. Отсюда данные



преобразуются в знания и опыт с конкретными действиями, которые облегчают принятие решений.

В этом анализе сопоставляются модели и тенденции, изучается влияние цифр, и все это делается стратегически, охватывая цели каждого прогнозируемого явления.

Постаналитическим шагом является поддержание актуальности данных и основан на динамизме времени; поэтому данные, учтенные для действий в прошлом, могут быть недействительны или не адаптированы к нынешним требованиям [5].

Поэтому необходимо, чтобы данные для изучения явления постоянно обновлялись и проверялись, чтобы прогнозы и принятие решений всегда были точными.

Цифровая аналитика данных из стратегий онлайн-коммуникаций имеет значительные преимущества, когда дело доходит до улучшения стратегий, предлагающих пользователям аутентичный и персонализированный опыт.

Именно поэтому среди наиболее важных можно назвать такие преимущества как повышение производительности, совершенствование организации, расширение многоканальной среды, лучшее понимание потребностей потребителей, повышение безопасности среды, а также выявление тенденций и изучение их применения.

Этот процесс может применяться в самых разных цифровых областях, поскольку новые времена полны технологических инноваций, а также массификации информации с помощью технологий.

Цифровая аналитика дает полное представление обо всей аудитории, поэтому его можно применять в таких областях (связанных с любым бизнесом или проектом) как пользовательская аналитика, веб-разработка, социальные сети и т.п.

### **Выводы**

Подводя итог, можно сделать вывод о том, что цифровая аналитика позволяет собирать и управлять поведенческими данными, как хорошо смазанным механизмом, чтобы была возможность быть в курсе этих изменений и постоянно генерировать полезную и действенную информацию для предоставления персонализированного обслуживания клиентов в больших масштабах.

Цифровая аналитика может уловить множество нюансов в поведении пользователей, но только посредством прямого взаимодействия с брендом

и продуктом. Это дает возможность глубокого понимания ситуации с использованием правильных данных и правильным способом.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цифровая аналитика – инструмент современного лидера URL: <https://big-i.ru/innovatsii/trendy/tsifrovaya-analitika-instrument-sovremennogo-lidera/> (дата обращения: 20.04.2024).
2. Цифровая аналитика: задачи и методы URL: <https://www.adventum.ru/articl-es/skvoznaaya-analitika/cifrovaya-analitika/> (дата обращения: 25.04.2024).
3. Цифровая бизнес-аналитика URL: <https://roistat.com/rublog/tsifrovaya-business-analitika/> (дата обращения: 10.05.2024).
5. Цифровая аналитика URL: <https://abiturient.tpu.ru/program/2106719171> (дата обращения: 16.05.2024).
6. Цифровой аналитик данных URL: <https://krit.pro/products/tsifrovoy-analitik-dannykh/> (дата обращения: 20.05.2024).

**Мирошниченко Дарья Вячеславовна**, студентка Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, площадь Гагарина 1, 344018, телефон: +7(988)552-45-61, email: my\_sun\_md@mail.ru.

**Miroshnichenko Daria Vyacheslavovna**, student of the Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344018, phone: +7(988)552-45-61, email: my\_sun\_md@mail.ru.

УДК 004.42

Мирошниченко Дарья Вячеславовна

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ: МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

*В современном мире возникает проблема, которая заключается в том, что необходимо обработать результаты тестирования, проведенного в онлайн-формате. Для этого необходимо выбрать подходящий метод и инструменты, чтобы корректно провести анализ данных. Целью работы является рассмотрение этих методов и инструментов, их сравнение, недостатки и достоинства. В работе рассмотрены дисперсионный, корреляционный и кластерный анализы.*

*Статистический анализ, аналитический обзор, анализ дисперсии, корреляционный анализ, кластерный анализ.*

Miroshnichenko Daria Vyacheslavovna

## **STATISTICAL ANALYSIS OF COMPUTER TESTING RESULTS: METHODS AND TOOLS**

*In the modern world, a problem arises, which is that it is necessary to process the results of testing conducted in an online format. To do this, you need to choose the appropriate method and tools to correctly analyze the data. The purpose of the work is to consider these methods and tools, compare them, drawbacks and advantages. The paper considers variance, correlation and cluster analyses.*

*Statistical analysis, analytical review, variance analysis, correlation analysis, cluster analysis.*

### **Введение**

В современном мире набирает популярность проверка обучающихся с помощью компьютерного тестирования для оценки имеющихся знаний и навыков, после прохождения курса, предмета или дисциплины.

На следующем этапе возникает проблема с интерпретацией этих результатов для дальнейшей работы и корректировки материалов курса. Для этого необходимо производить их с помощью статистического анализа, для того чтобы получить объективную и качественную картину ситуации, а также составления дальнейших корректирующих мероприятий [1].

Цель данной статьи рассмотреть основные методы и инструменты статистического анализа для внедрения его в анализ результатов прохождением обучающимися электронного курса.

### **Основная часть**

Рассмотрим основные методы и инструменты статистического анализа результатов компьютерного анализа, которые чаще всего используются для того, чтобы выбрать наиболее подходящий вариант, который будет самым релевантным.

Первый метод – это анализ дисперсии (ANOVA, от англ. Analysis of Variance), который необходимо использовать, когда оцениваются различия между средними значениями результатов тестирования в различных группах обучающихся. Данный способ применяется, когда ключевым критерием

являются существенные различия в результатах и факторы, которые могут повлиять на них.

Дисперсионный анализ построен на понятиях о двух ошибках. Первая – случайная ошибка, которая включает в себя разницу между выборочным значением каждого наблюдения, рассматриваемую как случайный фактор, вторая – системная, означающая разницу между разными факторами (зачастую они разные), которая формируется ошибки [2].

Сравнение данных ошибок основано на коэффициенте дисперсии, если разница между ними существенная. Данный метод предназначен для определения соответствия корреляции переменных по обнаруженным групповым различиям.

Преимущества использования анализа дисперсии:

- 1) производится статистический анализ на основе различий в средних значений выборок;
- 2) оценка различий между обучающимися, и определить ее значимость статистической значимости;
- 3) учет вариативности результатов в рамках выбранной группы;
- 4) имеется возможность оценки с учетом влияния внешних факторов.

Недостатки использования анализа дисперсии:

- 1) необходимы высокие знания в области математики для корректной работы с данными;
- 2) при выборе некорректной модели анализа, либо недостатке имеющихся данных, возникает риск, получения неправильных результатов.

Вторым методом является кластерный анализ, который заключается в выделении схожих элементов данных и дальнейшей идентификации на основе полученной информации, благодаря чему программу курса легко адаптировать и тестировать.

Первым этапом является сбор данных с результатами прохождения тестирования, далее происходит поиск схожих паттернов и группирует данные на основе сформированных кластеров. В результате получают кластеры, которые состоят из результатов с похожими значениями [3].

Метрика для оценки сходства / различия обычно основана на таких показателях расстояния, как евклидово или манхэттенское расстояние. Точки данных расположены ближе в одном кластере по сравнению с точками между кластерами.

Помечая связанные группы идентификаторами кластеров, кластеризация облегчает интерпретацию и оценку распределения данных в различных

областях. Она имеет обширные приложения для сегментации рынка, распознавания образов, анализа изображений и поиска информации.

Кластерный анализ в интеллектуальном анализе данных - это метод, используемый для группировки набора объектов таким образом, чтобы объекты в одной группе (или кластере) были более похожи друг на друга, чем объекты в других группах. Он обычно используется для обнаружения структур в немаркированных данных, классификации данных по различным группам и определения взаимосвязей между точками данных.

Преимуществами кластерного анализа является:

3) возможность выявить характерные паттерны при ответе на вопросы студентами;

4) данный способ позволит сформировать индивидуальные планы обучения и план корректирующих мероприятий;

5) позволяет выявить скрытые закономерности при ответе на вопросы тестирования.

Недостатками кластерного анализа является:

1) необходим большой объем данных;

2) имеется вероятность некорректного результата.

Последним рассмотрим корреляционный метод, который заключается в нахождении взаимосвязи с внешними факторами (уровень подготовки, погодные условия, фактор стресса и т.п.). Он необходим, когда в обязательном порядке необходимо найти и учесть данную взаимосвязь.

Корреляционный анализ - это статистический метод, который используется для измерения силы взаимосвязи между двумя или более переменными. Корреляционный анализ является важным инструментом для понимания взаимосвязи между переменными в наборе данных. Он может помочь исследователям выявить связи между переменными и определить, являются ли эти ассоциации статистически значимыми. Корреляционный анализ широко используется во многих областях, включая социальные науки, финансы и здравоохранение [4].

Важно подчеркнуть, что корреляция устанавливает статистическую взаимосвязь, но не доказывает причинно-следственную связь. Эти две переменные статистически связаны в некоторых географических регионах, но на самом деле причиной такой взаимосвязи может быть их взаимная связь с другой “неизвестной” переменной – например, с недавними достижениями в технологии. Это означает, что для определения фактической причинно-следственной связи может потребоваться дальнейший анализ.

Преимуществами кластерного анализа является:

- 1) имеется возможность выявить взаимосвязь результатов тестирования с внешними факторами;
- 2) по сравнению с другими методами легче интерпретировать полученные результаты.

Недостатками кластерного анализа является:

- 1) данный способ не позволяет исключить в дальнейшем проблемы, так как только позволяет их выявить;
- 2) возможность наличия ложных связей.

### **Выводы**

Подводя итоги, рассмотрели самые популярные методы статистического анализа результатов компьютерного тестирования и пришли к выводу, что самым актуальным и подходящим является анализ дисперсии. Данный способ позволит выявить закономерности результатов, оптимизировать процесс образования и упростить работу с анализом полученных данных для дальнейшего построения корректирующих мероприятий.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Статистический анализ результатов компьютерного тестирования URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/statisticheskiy-analiz-rezultatov-kompyuternogo-testirovaniya> (дата обращения: 20.04.2024).
2. Дисперсионный анализ (ANOVA) URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/734258/> (дата обращения: 25.05.2024).
4. Корреляционный анализ URL: [https://e.vyatsu.ru/pluginfile.php/462616/mod\\_resource/content/3/Теоретический%20материал\\_корреляционный%20анализ.pdf](https://e.vyatsu.ru/pluginfile.php/462616/mod_resource/content/3/Теоретический%20материал_корреляционный%20анализ.pdf) (дата обращения: 25.05.2024).
5. Что такое кластерный анализ и как аналитики с его помощью группируют данные URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/chto-takoe-klasterizaciya-i-klasternyi-analiz/> (дата обращения: 27.05.2024).

**Мирошниченко Дарья Вячеславовна**, студентка Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, площадь Гагарина 1, 344018, телефон: +7(988)552-45-61, email: [my\\_sun\\_md@mail.ru](mailto:my_sun_md@mail.ru).

**Miroshnichenko Daria Vyacheslavovna**, student of the Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, 344018, phone: +7(988)552-45-61, email: my\_sun\_md@mail.ru.

УДК 621.396

Хельфауи Абдерауф, Пилипенко Александр Михайлович

## **ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ 6G**

*В работе рассмотрены основные направления развития систем беспроводной связи. Целью работы является поиск эффективных методов, позволяющих обеспечить повышение пропускной способности существующих систем беспроводной связи. В результате исследования были решены следующие задачи: описаны основные показатели эффективности систем беспроводной связи; проведен сравнительный анализ технологий 5G и 6G; предложены методы повышения эффективности систем беспроводной связи.*

*Технологии связи, беспроводная связь, показатели эффективности систем связи, пропускная способность.*

Khelfaoui Abderaouf, Pilipenko Alexandr Mikhaylovich

## **KEY FEATURES AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF 6G WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS**

*The work discusses the main directions of development of wireless communication systems. The goal of this work is to find effective methods for increasing the channel capacity of wireless communication systems. As a result of the research, the following tasks were solved: the main performance indicators of wireless communication systems were described; a comparative analysis of 5G and 6G technologies was carried out; methods for increasing the efficiency of wireless communication systems have been proposed.*

*Communication technologies, wireless communications, performance indicators of communication systems, channel capacity.*

### **Введение**

С начала 80-х годов прошлого века произошло несколько прорывов в развитии систем мобильной связи: от поколения 1G до поколения 4G.

Основными направлениями развития систем мобильной связи являются увеличение пропускной способности, повышение скорости передачи данных и уменьшение времени задержки.

К технологиям связи следующего поколения предъявляются такие требования, которые существующие системы 4G не могут обеспечить. В настоящее время развивается поколение систем связи 5G, которое обеспечивает более высокую скорость передачи данных и позволяет повысить эффективность использования спектра чем 4G. В свою очередь, ожидается, что системы связи следующего поколения 6G будут обслуживать новый набор приложений, таких как тактильные ощущения, телемедицина, интерфейсы «мозг-машина», смешанная реальность, виртуальная реальность, дополненная реальность. Эти услуги требуют одновременного достижения высокой спектральной эффективности и малого времени задержки при высокой надежности и низкой сложности системы связи. Кроме того, ключевой целью технологии 6G является повышение пропускной способности канала связи от 100 Гбит/с до 1 Тбит/с [1]. Именно пропускная способность является ключевым показателем эффективности (Key Performance Indicator, KPI) для систем 6G. Данное требование к пропускной способности создает серьезные проблемы, как с точки зрения занимаемого диапазона радиочастот, так и с точки зрения основной полосы частот.

### 1. Сравнительный анализ технологий 5G и 6G

Для того чтобы проиллюстрировать показатели эффективности систем связи 6G, можно использовать подход, предложенный в работе [2], в соответствии с которым в табл. 1 представлены определения и значения данных показателей для систем связи 5G и 6G.

Таблица 1

Сравнение показателей эффективности систем связи 5G и 6G

Показатель эффективности	Определение	Значение показателя для 5G	Значение показателя для 6G
<b>Пиковая скорость передачи данных (пропускная способность)</b>	Максимальная скорость передачи данных, достижимая для каждого пользователя/устройства в идеальных условиях	20 Гбит/с	> 100 Гбит/с



<b>Пользовательская скорость передачи данных</b>	Достижимая скорости передачи данных для мобильных пользователей/устройств в целевой зоне покрытия	0,1 – 1 Гбит/с	>1 Гбит/с
<b>Задержка связи</b>	Промежуток времени от отправки пакетов источником до их получения в пункте назначения	$1 \times 10^{-3}$ с	$0.1 \times 10^{-3}$ с
<b>Пропускная способность зоны трафика</b>	Общая пропускная способность трафика на единицу площади	10 Мбит/с/м <sup>2</sup>	1 Гбит/с/м <sup>2</sup>
<b>Плотность подключения</b>	Общее количество подключенных и/или доступных устройств на единицу площади.	1/м <sup>2</sup>	(10 – 100)/м <sup>2</sup>
<b>Мобильность</b>	Максимальная относительная скорость между передатчиком и приемником	500 км/ч	1000 км/ч
<b>Надежность</b>	Вероятность успешной передачи пакета фиксированного размера в течение указанного максимального времени	0.99999	0.9999999
<b>Точность синхронизации</b>	Точность синхронизации времени между устройствами	~ мкс	~ нс

Для поддержки расширенного перечня услуг систем 6G (голографическое телеприсутствие, интеллектуальное взаимодействие, иммерсивная расширенная реальность (XR), удаленное управление в реальном времени и интеллектуальное подключение всех «вещей») показатели эффективности систем 6G, включающие в себя скорость передачи данных (пиковая скорость передачи данных и скорость взаимодействия с пользователем), задержка связи, пропускная способность зоны трафика, и ряд других показателей эффективности должны быть в несколько раз, а то и на порядок выше, чем у систем 5G.

Разработка эффективных систем цифровой связи представляет собой сложную задачу, на которую влияет ряд факторов, таких как доступная технология, характеристики канала, тип целевой услуги (например, данные, речь, видео, изображения, факсимильная связь и т. д.), новые идеи в исследованиях и приемлемая стоимость системы. Движущей силой этой

сегодняшней задачи для будущих систем цифровой связи является потребность в более высоких скоростях передачи данных и системах, способных поддерживать множество различных типов услуг с низкой вероятностью битовых ошибок, а также с появлением новых приложений (например, расширенной реальности), которые требуют одновременного обслуживания не только с низкой задержкой и достаточной надежностью, но и с высокой спектральной эффективностью, которая определяется отношением скорости передачи данных к полосе частот канала связи. Сети следующего поколения 6G должны быть способны удовлетворить этот спрос за счет внедрения новых эффективных схем передачи.

## **2. Методы повышения эффективности систем беспроводной связи**

Для обеспечения беспроводной передачи данных с высокой спектральной эффективностью, малой задержкой и невысокой сложности системы связи при решении задач «Интернета вещей» (Internet of Things или IoT) и «Интернета всего» (Internet of Everything или IoE) был предложен новый метод модуляции, называемый мультиплексированием с ортогональным частотным разделением и модуляцией мощности поднесущей (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing with Subcarrier Power Modulation – OFDM-SPM) [3]. Метод OFDM-SPM обеспечивает передачу дополнительных информационных битов с помощью изменения мощности поднесущих в блоках OFDM одновременно снижая сложность и задержку по сравнению с традиционными схемами.

В работе [3] показано, что применение метода OFDM-SPM позволяет повысить спектральную эффективность системы связи в два раза, при этом система усложняется незначительно, не происходит увеличения ошибок, уменьшается задержка при передаче данных и снижается мощность передатчика. Таким образом, повышается эффективность коммуникационного оборудования с точки зрения энергопотребления и снижается стоимость беспроводных услуг (для провайдеров и пользователей).

В настоящее время большое значение для разработки приемопередатчиков современных систем связи имеют адаптивные методы, которые обеспечивают высокую производительность и высокой скорость передачи данных. В данной работе предлагается использовать метод OFDM-SPM в сочетании с различными методами цифровой M-арной модуляции, пространственно-временным блочным кодированием (Space–Time Block Coding – STBC) и кодированием канала для обнаружения и исправления ошибок. Для метода OFDM-SPM рекомендуется использовать пространственно-

временное блочное кодирование по схеме Аламути в системе с несколькими входами и одним выходом (Multiple Input Single Output – MISO) [4].

Для оценки эффективности метода OFDM-SPM-STBC по сравнению классическим OFDM в будущих исследованиях планируется провести анализ следующих характеристик:

- коэффициент битовых ошибок (Bit Error Rate – BER) – количество битовых ошибок, деленное на общее количество переданных бит за исследуемый интервал времени;

- пропускная способность (Channel Capacity) – максимальная скорость передачи данных, достижимая для каждого пользователя/устройства в идеальных условиях в заданной полосе частот.

### **Выводы**

В работе описаны требования к системам беспроводной связи следующего поколения 6G. Предложено применение метода мультиплексирования с ортогональным частотным разделением сигналов и модуляцией мощности поднесущей (OFDM-SPM) совместно с методами цифровой M-арной модуляции и пространственно-временным блочным кодированием (STBC) для повышения эффективности использования спектра.

Для доказательства эффективности предлагаемых алгоритмов OFDM-SPM-STBC в дальнейших исследованиях планируется провести сравнительный анализ известных алгоритмов OFDM и предлагаемых алгоритмов при различных параметрах модуляции и отношениях сигнал/шум.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Pärssinen A., Alouini M., Berg M., Kuerner T., Kyösti P., Leinonen, M. E., Matimikko-Blue M., McCune E., Pfeiffer U., Wambacq P.* White Paper on RF Enabling 6G – Opportunities and Challenges from Technology to Spectrum // 6G Research Visions, No. 13. University of Oulu 2020. URL: <https://oulurepo.oulu.fi/handle/10024/36613> (дата обращения: 27.05.2024).
2. 6G Services, Capabilities and Enabling Technologies // Vivo Communication Research Institute, July 2022. URL: <https://asia-exstatic-vivofs.vivo.com/PSee2l50xoirPK7y/1658819482440/17ac53a732038c48803a045e8498978b.pdf> (дата обращения: 27.05.2024).
3. *Hamamreh J. M., Hajar A.* The Generalization of Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Subcarrier Power Modulation to Quadrature Signal Constellations // RS Open Journal on Innovative Communication Technologies,

Vol. 1. Issue 1. 2020. URL: <https://doi.org/10.21428/03d8ffbd.4948e89e> (дата обращения: 27.05.2024).

4. *Abuqamar A., J. Hamamreh, Mohamedou Abewa.* STBC-assisted OFDM with Subcarrier Power Modulation // RS Open Journal on Innovative Communication Technologies, Vol. 2, Issue 4. 2021. URL: <https://doi.org/10.46470/03d8ffbd.275ae770> (дата обращения: 27.05.2024).

**Хельфауи Абдерауф**, аспирант кафедры теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: khelfaui@sfedu.ru

**Пилепенко Александр Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfedu.ru

**Khelfaoui Abderaouf**, postgraduate student, Department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: khelfaui@sfedu.ru

**Pilipenko Alexandr Mikhaylovich**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfedu.ru

УДК 621.396

Андреева Ирина Марковна, Одинец Евгений Дмитриевич

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В РОССИИ**

*Статья подчеркивает важность надежности и бесперебойности систем связи в современном мире, где информация играет ключевую роль. Обсуждается перспективность волоконно-оптических линий связи для передачи больших объемов данных на большие расстояния, подчеркивая их преимущества перед другими методами передачи информации. Волоконно-оптические системы обеспечивают высокую пропускную способность, скорость передачи данных и надежность, что делает их идеальным выбором для сферы экстренной помощи и государственных служб. Статья отмечает значительный вклад государственных*

*программ в развитие телекоммуникационной инфраструктуры в России через прокладку волоконно-оптических линий связи и внедрение технологий 4G LTE и 5G. Перспективы современных коммуникационных технологий способствуют улучшению социально-экономического положения, стимулируя экономический рост и развитие благодаря эффективным и надежным каналам связи.*

*Волоконно-оптические линии связи; телекоммуникационные услуги; перспективы развития; цифровые технологии; эффективность; безопасность; государственная поддержка; приоритетность развития.*

Andreeva Irina Markovna, Odinets Evgeniy Dmitrievich

## **PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES IN RUSSIA**

*The article emphasizes the importance of reliability and continuity of communication systems in the modern world, where information plays a key role. The prospects of fiber-optic communication lines for the transmission of large amounts of data over long distances are discussed, emphasizing their advantages over other methods of information transmission. Fiber-optic systems provide high bandwidth, data transfer speeds and reliability, making them an ideal choice for the field of emergency care and public services. The article notes the significant contribution of government programs to the development of telecommunications infrastructure in Russia through the laying of fiber-optic communication lines and the introduction of 4G LTE and 5G technologies. The prospects of modern communication technologies contribute to improving the socio-economic situation, stimulating economic growth and development through effective and reliable communication channels.*

*Fiber-optic communication lines; telecommunication services; development prospects; digital technologies; efficiency; security; state support; priority development.*

### **Введение**

Надежная и бесперебойная передача сообщений является фундаментом любой системы связи. В современном мире, где информация играет все более важную роль, системы связи должны решать не только задачу передачи сообщений, но и обеспечивать ряд других критически важных функций: поддержка государственного управления, бизнеса, служб экстренной помощи; предоставление телекоммуникационных услуг населению; поддержка транспортной системы; обеспечение безопасности управления

энергетическими сетями. Надежные и бесперебойные системы связи являются необходимым условием для функционирования современного общества [1].

### **Основная часть**

В настоящее время волоконно-оптические линии связи признаны наиболее перспективным средством передачи больших объемов информации на большие расстояния. Это значительно повысило пропускную способность сетей связи, способствуя быстрому обмену данными. Волоконно-оптические системы связи обладают рядом преимуществ перед альтернативными методами передачи информации, что делает их подходящими для таких важных приложений, как службы экстренной помощи и государственные службы [2]. Эти системы обеспечивают высокую пропускную способность и высокую скорость передачи данных, гарантируя надежную и безопасную передачу данных. Кроме того, волоконная оптика устойчива к электромагнитным помехам и условиям окружающей среды. Однако высокие первоначальные затраты на установку волоконно-оптических систем связи могут стать проблемой. Необходимость в специализированном монтажном оборудовании и высокоточных лазерных источниках также создает трудности. Тем не менее, последние технологические достижения решают эти проблемы, делая волоконную оптику все более доступным и экономичным вариантом [3].

Длительный срок службы волоконно-оптических кабелей способствует повышению эффективности и доступности кабельных информационных сетей. Эти сети составляют основу современных телекоммуникаций, обеспечивая важнейшую основу для государственных учреждений, предприятий и частных лиц. Внедрение крупномасштабной волоконно-оптической инфраструктуры обеспечивает использование передовых коммуникационных технологий в различных секторах общества, включая производство, образование, культуру, администрацию и безопасность [4].

Эти технологии способствуют значительному улучшению социально-экономического положения, способствуя экономическому росту и развитию благодаря эффективным и надежным каналам связи.

Растущий уровень внедрения информационных технологий в обществе и растущие требования государственных учреждений и бизнеса привели к расширению использования интернета, электронных услуг и цифровых технологий, а появление 4G и 5Gкратно повысило скорость передачи данных. Всё это потребовало повысить требования к надёжности и качеству связи

[5]. Государственные учреждения и бизнес-структуры всё больше зависят от надежности и бесперебойности связи для ведения своей деятельности. Перебои влекут за собой значительные финансовые потери и нарушения в работе.

Ростелеком играет ключевую роль в развитии телекоммуникационной инфраструктуры в России. Компания прокладывает ВОЛС по всей стране и продолжает инвестировать в их модернизацию. Строительство новых сетей увеличило пропускную способность и надёжность, а благодаря внедрению 4G LTE и 5G, доступ к широкополосному интернету появился как в крупных городах, так и в сельской местности.

В качестве магистральных провайдеров в России представлены [6]:

1. Ростелеком: Ведущий национальный провайдер, владеющий обширной сетью по всей стране.
2. Вымпелком: Второй по величине оператор мобильной связи, также предлагающий фиксированный перечень услуг.
3. Мобильные Телесистемы: Крупнейший оператор мобильной связи, представляющий широкий спектр телекоммуникационных услуг.
4. Мегафон: Третий по величине оператор мобильной связи.
5. ТрансТелеком: Оператор магистральных сетей, предоставляющий услуги другим операторам.

Эти компании активно участвуют в реализации важных проектов по обеспечению современных услуг высокоскоростной связи в отдаленных регионах России. Крайний Север, Дальний Восток, Сахалин, Камчатка и Курильские острова являются стратегически важными регионами с точки зрения социальных, экономических и геополитических интересов страны. Обеспечение бесперебойного доступа к этим регионам через современные и надежные сети связи является приоритетной задачей. Одним из ярких примеров является проект "Северный оптический поток", реализованный компанией "Ростелеком" в период с 2000 по 2014 год.

Эта магистральная линия связи протяженностью 3500 километров проходит из Екатеринбурга в Салехард через Нягань, Ханты-Мансийск, Сургут, Ноябрьск и Новый Уренгой. Она обеспечивает высокоскоростное соединение с отдаленными районами на севере России, способствуя развитию региона и улучшая качество жизни людей.

Помимо "Северного оптического потока", крупнейшие провайдеры реализуют и другие проекты по развитию сетей связи в отдаленных регионах. Использование современных технологий, таких как волоконно-оптические

линии связи и спутниковая связь, позволяет обеспечивать доступ к высокоскоростному интернету и другим телекоммуникационным услугам даже в самых сложных условиях.

Общая протяженность волоконно-оптических кабелей, действующих в настоящее время в рамках Северной оптической сети, включая региональные и местные филиалы, превышает 15 000 километров. Стоимость проекта "Северный оптический поток" превысила 10 миллиардов рублей. Этот проект стал ярким примером того, как крупнейшие телекоммуникационные компании России инвестируют в развитие сетей связи в отдаленных регионах.

Помимо "Ростелекома", свою базовую инфраструктуру на Крайнем Севере развивают и другие операторы связи, такие как МТС, Вымпелком и МегаФон. Они строят волоконно-оптические линии связи, спутниковые станции и другие объекты, чтобы обеспечить жителей региона доступом к современным телекоммуникационным услугам. Вот некоторые примеры таких проектов:

6. МТС в 2016-2017 годах увеличило общую протяженность волоконно-оптических кабельных линий в ХМАО и ЯНАО более чем на 2000 километров.

7. Проложенная МТС оптическая магистраль соединяет Ноябрьск, Муравленко, Губкинский, Новый Уренгой, Пангоды, Надым, Сургут и Нижневартовск с Новым Уренем.

8. Ростелеком приступил к подготовке к прокладке подводного кабеля между Магаданом и Сахалином на Дальнем Востоке.

Эти проекты позволяют увеличить пропускную способность сетей связи, повысить скорость и надежность интернета, снизить стоимость услуг связи, тем самым развивая экономику региона и улучшить качество жизни людей [7].

В последние годы растет понимание важности сосредоточения внимания на развитии арктических регионов России и возрождении интереса к региону. Результатом этого стал ряд экономических и политических инициатив, в том числе продвижение Северного морского пути в качестве стратегического приоритета.

Крайний север России, где сосредоточены одни из крупнейших в мире запасов полезных ископаемых, углеводородов и биологических ресурсов, играет важную роль в экономическом росте страны. Множество внутренних и международных политических, экономических и геополитических



факторов делают Арктику важнейшим регионом для достижения национальных целей. Эти факторы включают поддержание экономической стабильности страны, защиту хрупких экосистем северных регионов, содействие социально-экономическому благополучию местных сообществ и эффективное использование природных ресурсов в регионе.

Транспортная и коммуникационная инфраструктура имеет огромное значение для удалённых малонаселённых регионов. Это особенно важно для районов, где расположены многочисленные газовые месторождения, а также для развития Северного морского пути как крупного транспортного маршрута. Развитая инфраструктура обеспечивает социально-экономическое развитие путём создания новых рабочих мест и развития бизнеса. Это ведёт к улучшению качества жизни людей и повышению доступности социальных услуг. Эксплуатация газовых месторождений, обеспеченная такой инфраструктурой, потребует продумать способы доставки людей и оборудования на места добычи, а также транспортировку добытого газа на рынки [8].

Вместе с развитием инфраструктуры произойдёт развитие Северного морского пути, для чего необходимо обеспечить навигацию и связь между судами и берегом. Суда смогут получать необходимую гидрометеорологическую информацию для работы и составления планов пути. Спасательные работы в регионе значительно облегчатся из-за наличия надежной и передовой сети высокоскоростных коммуникаций.

Эта сеть должна обеспечивать широкополосный доступ в интернет и голосовую и видеосвязь с возможностью трансляции данных. Развитие такой сети связи позволит значительно повысить эффективность работы транспортных компаний, обеспечить безопасность мореплавания, привлечь международные перевозки, что повлечёт за собой развитие Арктического региона.

В настоящее время в России реализуется ряд проектов по развитию транспортной и коммуникационной инфраструктуры на севере. Эти проекты включают в себя строительство новых портов, аэропортов, железных и автомобильных дорог, а также развитие спутниковой связи. Реализация этих проектов позволит России укрепить свои позиции в Арктике и стать одним из лидеров по развитию Северного морского пути.

Приоритетность Крайнего Севера в развитии оптоволоконных систем обеспечит надёжную и бесперебойную связь. Однако, это подразумевает значительные инвестиции в транспортную инфраструктуру (строительство

и реконструкция портов, аэропортов, железных и автомобильных дорог), производственную инфраструктуру (развитие добывающих и перерабатывающих предприятий), современную телекоммуникационную сеть (внедрение волоконно-оптических линий связи, спутниковой связи и других передовых технологий). Эти меры позволят ускорить рост и развитие региона, создать новые рабочие места и обеспечить эффективное управление экономической деятельностью и ресурсами. Снижение издержек на транспортировку грузов значительно повысит конкурентоспособность региона на мировом рынке.

В настоящее время ведутся переговоры с финскими и китайскими телекоммуникационными компаниями о прокладке подводного волоконно-оптического кабеля вдоль арктического побережья России. По завершении этого проекта он станет эффективным средством для установления высокоскоростного сообщения между Азией и Европой по Северному морскому пути с помощью этого подводного кабеля.

В июне 2020 года в рамках федеральной инициативы начались работы по подключению Южных Курильских островов к высокоскоростному Интернету с помощью подводного волоконно-оптического кабеля протяженностью более 900 километров. Этот кабель обеспечит высокоскоростную связь с пропускной способностью 40 гигабит в секунду для жителей островов Итуруп, Кунашир и Шикотан.

В настоящее время вновь проявился интерес к предложению о прокладке подводного волоконно-оптического кабеля между Санкт-Петербургом и Калининградской областью. Первоначально этот проект планировалось реализовать в 2016 году, но он был перенесен на период с 2018 по 2019 год из-за опыта, накопленного в ходе предыдущих проектов на Дальнем Востоке. Прокладка нового подводного кабеля, который пройдет в обход территориальных вод Литвы, Латвии и Эстонии, станет важным шагом для обеспечения безопасности, экономики и геополитических интересов России. Предполагаемая длина кабеля составит 1050-1200 километров. Это новое соединение обеспечит [9]:

- Безопасную связь для стратегически важного региона Балтийского флота.
- Снижение зависимости от иностранных поставщиков телекоммуникационных услуг.
- Повышение уровня информационной безопасности.
- Укрепление обороноспособности страны.

Реализация этого проекта будет иметь ряд важных преимуществ:

1. Безопасность:

- Новый кабель обеспечит альтернативный канал связи для Балтийского флота, что позволит ему оставаться на связи даже в случае перебоев на существующих маршрутах.

- Это также снизит риск прослушивания или перехвата связи со стороны иностранных разведок.

2. Экономика:

- Новый кабель позволит увеличить пропускную способность интернета в регионе, что стимулирует развитие экономики.

- Также это создаст новые рабочие места в сфере телекоммуникаций и ИТ.

3. Геополитика:

- Прокладка кабеля в обход стран Балтии станет явным сигналом того, что Россия не намерена подчиняться их давлению.

- Это также укрепит позиции России в Балтийском регионе.

**Вывод**

Развитие волоконно-оптических сетей имеет решающее значение для решения задач цифровой экономики и обеспечения национальной безопасности России. Несмотря на то, что темпы внедрения оптоволоконной сети в России ниже, чем в среднем по миру, новые технологии делают волоконную оптику более доступной, что помогает преодолеть эти проблемы. Оптоволоконная сеть обладает рядом преимуществ перед другими технологиями передачи данных, такими как медные кабели и спутниковая связь [10]. В настоящее время Россия занимает 49-е место в мире по уровню проникновения оптоволоконной связи, но в последние годы наблюдается значительный рост темпов строительства оптоволоконных сетей по всей стране. Ожидается, что в ближайшие годы темпы будут только расти. Развитие оптоволоконных сетей в России является важной задачей, решение которой позволит стране сделать значительный шаг вперед в развитии цифровой экономики.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Гурлев И.В.* Экологические проблемы при прокладке волоконно-оптической линии связи в грунте на Крайнем Севере // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, № 6 (2016), <http://naukovedenie.ru/PDF/69EVN616.pdf>. – 10 с.

2. *Олейникова А. В.* Перспективы развития связи 5G/ *А. В. Олейникова, М. Д. Нуртай, Н. М. Шманов* // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – С. 233-235.
3. *Иванов В.С., Никитин Б.К., Пирмагомедов Р.Я.* Строительство ВОЛС. Современные технологии и организация. Часть 1. – СПб: СПбГУТ им. М.А. БончБруевича, 2015. – 71 с.
4. *Кузовкова Т.А.* Оценка роли инфокоммуникаций в национальной экономике и выявление закономерностей их развития // Системы управления, связи и безопасности, № 4, 2015. – С. 26-68.5. *Самойлов А.С.* 5G-стандарт сотовой связи. 2020. С. 196
6. *Заргарян Е.В., Филонова Е.С.* Эффекты применения технологий ПИОТ в системах интеллектуального управления освещением на производстве// В сборнике: Прикладные вопросы точных наук. Материалы VII Международной научно – практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей. 2023. С. 121 – 124. *Шалагинов А.* 5G: Новая парадигма телекоммуникаций // <https://shalaginov.com/2017/03/20/5g>.
7. Развитие волоконно-оптических линий связи как средства управления и обеспечения национальной безопасности URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-voikonno-opticheskikh-linij-svyazi-kak-sredstva-upravleniya-i-obespecheniya-natsionalnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 17.05.2024)
8. "Ростелеком" достроил Северный поток URL: [www.comnews.ru/node/81713#ixzz4O6Wkldcr](http://www.comnews.ru/node/81713#ixzz4O6Wkldcr) (дата обращения 21.05.2024)
9. *Ауси Р.М., Заргарян Е.В.* Цифровая информационная безопасность и способы её защиты в свете действующего законодательства// В книге: Инженерно-техническое образование и наука. Сборник трудов второй международной научно-практической конференции. Под общей редакцией И.В. Чистякова. Новороссийск, 2022. С. 54.
10. *Варукина Л.* 5G: В новый 2017 год с новым стандартом 5G. Обзор технологии и статус стандартизации // <http://www.mforum.ru/news/article/117626.html>.

**Андреева Ирина Марковна** студентка Политехнического института(филиала) ДГТУ в г. Таганроге Россия, город Таганрог, улица Петровская 109а, 347904, телефон: +7 (904) 501-22-41, email: [andreeva2012irina@yandex.ru](mailto:andreeva2012irina@yandex.ru).

**Одинец Евгений Дмитриевич**, студент Политехнического Института (филиала) ДГТУ в г. Таганроге 347904, Россия, Таганрог, улица Петровская 109а, телефон: +7 (951) 508-57-28, email: [mr.odinets0333@gmail.com](mailto:mr.odinets0333@gmail.com)

**Andreeva Irina Markovna**, student of the Polytechnic Institute (branch) of DSTU in the city of Taganrog 347904, Russia, Taganrog, 109a Petrovskaya street, phone: +7 (904) 501-22-41, email: [andreeva2012irina@yandex.ru](mailto:andreeva2012irina@yandex.ru)

**Odinets Evgeniy Dmitrievich**, student of the Polytechnic Institute (branch) of DSTU in the city of Taganrog 347904, Russia, Taganrog, 109a Petrovskaya street, phone: +7 (951) 508-57-28, email: [mr.odinets0333@gmail.com](mailto:mr.odinets0333@gmail.com)

УДК 528.88

Данилова Ирина Игоревна

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

*В докладе рассматриваются методологии анализа текстур изображений, полученных с помощью данных дистанционного зондирования. Рассматриваются преимущества и проблемы каждого подхода. Целью доклада является оценка эффективности их применения для практических задач. В ходе исследования были выявлены перспективы рассмотренных методов для получения экологической и экономической информации.*

*Изображение, текстурный анализ, метод, дистанционное зондирование, подход.*

Danilova Irina Igorevna

## **USING TEXTURE ANALYSIS METHODS FOR PROCESSING REMOTE SENSING DATA**

*This article discusses methodologies for analyzing textures of images obtained using remote sensing data. The advantages and problems of each approach are considered. The purpose of the article is to evaluate the effectiveness of their use for practical problems. The study revealed the prospects of the considered methods for obtaining environmental and economic information.*

*Image, texture analysis, method, remote sensing, approach.*

## **Введение**

Наземный покров до сих пор является основным биологическим ресурсом. Он выполняет важную роль в функционировании биосистемы Земли. Есть те факторы изменения биосферы, на которые мы можем повлиять. Например, несанкционированная вырубка лесов, которую можно отследить или пожары, возникающие в густых лесах, которые возможно предупредить и остановить, а также множество других факторов, затрагивающих не только земной покров, но и всё живое. Эти факторы создают необходимость более подробного анализа поверхности Земли. Результаты, полученные с помощью такого анализа, могут послужить для определения стратегии экономического развития страны.

## **Основная часть**

Все подходы к работе с текстурой изображения можно разделить на 5 групп. Снимки, используемые для дальнейшего анализа, получают с съёмочного оборудования, зафиксированного на космических спутниках и летательных аппаратах, что накладывает определённые сложности в их дальнейшей обработке.

Извлечение информации об изображениях на основе их текстуры особенно полезно для выявления различных объектов на них, получения информации о этих объектах и выявление закономерностей, наблюдение за состоянием различных местностей.

## **Статистические подходы**

Одним из самых распространённых методов текстурного анализа изображений является матрица смежности уровней серого. С помощью неё можно получить больше 10 признаков изображения. Для анализа значений серого одним из методов, используемых в исследованиях, является анализ матрицы ковариации. Они позволяют давать полную пространственную информацию об уровнях яркости на изображении и взаимосвязи отдельных объектов на нём [3]. Существует так же несколько признаков, по которым можно определить изображения, они не только высчитываются математически, но и видны человеческому глазу при изучении изображения:

- а) анализ переходов цвета в различных областях изображения;
- б) расположение и оценка чёткости контуров объектов на снимке;
- в) оценка расстояний на изображении между различными оттенками серого цвета;
- г) определение направления цвета на изображениях;

д) оценка величины между самыми светлыми и тёмными областями на снимке;

е) выделение отдельных участков, отличающихся от общей картины;

Все характеристики, так или иначе, могут определить обрабатываемое изображение. Но самыми интересными признаками являются первый, пятый и шестой. При их оценке выявляются самые главные характеристики снимка.

Так же примером статистического подхода, до сих пор используемого на практике, можно выделить метод, в котором происходит вычисление вектора разности между уровнями яркостей на снимке. Так, например, в работе [4] этот метод применяется для оценки состояния леса и классификации древесных пород в нём. Смежным с ним является метод, описанный в работах [5] и [6]. В них он так же используется для картографирования тропических лесов и поверхностей.

### **Геометрические подходы**

Одним из методов в разделе геометрических подходов является базированный на вычислении функции автокорреляции. С её помощью можно легко обнаруживать на снимках повторяющиеся текстуры. Это помогает находить границы объектов на изображениях и выделять эти самые объекты. Однако, функция автокорреляции сильно подвержена влиянию шумов на изображении. Поэтому, при работе с ней, необходимо следить за обработкой данных.

Отдельно можно рассматривать лишь части изображения. Так методы, в которых производится анализ векторов признаков не всего изображения, а лишь его определённых частей называются основанными на локальных дескрипторах. Конечно, и эти методы имеют свои недостатки. Они зависят от значения угла, при котором проводилась съёмка и так же подвержены влиянию погодных условий, в которых осуществлялись съёмочные работы. Так же нужно заметить, что они не рассматривают всё изображение целиком, что уменьшает временные затраты, но способствует потере информации. В современных работах используются локальные дескрипторы. Благодаря тому, что они могут анализировать совсем небольшие участки, с их помощью решается широкий ряд проблем. Так, используя локальные дескрипторы возможно анализировать не только за статические, но и движущие объекты.

Важные результаты показала теория инвариантных моментов, основывающаяся на определении интегральных инвариантов. Метод моментов

подходит для выявления закономерностей и извлечения из них принципов и логики. В настоящее время метод моментов остаётся актуальным и используется, например, в работе [7] для создания алгоритма распознавания целей или в работе [8] для оптимизации геологоразведочных работ и разведки полезных ископаемых.

### **Структурные подходы**

Основная идея структурного подхода заключается в том, что все текстуры на снимке состоят из примитивов, на которые можно разбить любое изображение. Хотя примитивы и повторяются, нельзя сказать, что это хаотично, они имеют свою логику размещения. К распознаванию текстур с помощью структурных методов можно определить различные подходы. Данные подходы не могут выдать реальный результат по причине того, что для работы с реальными снимками со спутников они не подходят. Ведь такие изображения являются для них слишком нечёткими и ложными, они имеют много шума.

Однако, структурные методы всё равно являются достаточно эффективными и используются в современных работах для выполнения задач в самых разных сферах. Используя данные дистанционного зондирования с помощью методов структурного анализа, могут быть обнаружены природные изменения в климате и земном покрове, таким образом методы хорошо подходят для систем мониторинга и анализа природных изменений.

### **Спектральные подходы**

Фурье- и вейвлет-анализ применяется для работы с текстурой изображения. Фурье-анализ даёт возможность находить на снимках повторяющиеся объекты, а также точно определять их границы. Таким образом, методы спектрального анализа удобны в случае работы над задачами обнаружения и детектирования объектов на изображениях, полученных с помощью дистанционного зондирования Земли. Однако, изображения могут быть нечёткими, что повышает сложность работы с ними.

Вейвлет-анализ представляет собой разложение сигнала по базисным функциям, которые и называю вейвлетами. Он используется во многих современных работах, таких как [9], где производится анализ пространственно-временных вариаций засухи и ее корреляций с индексами с помощью методов вейвлет-анализа и кластеризации, а работа [10] посвящена исследованию деформационных реакций оползней на сезонные осадки. Исходя из всех вышеперечисленных примеров, можно заявить, что данный метод хорош для предупреждения и определения причин появления



различных природных явлений. Так же и Фурье- и вейвлет- анализ могут осуществляться вне зависимости от масштабов, обрабатываемого изображения, что, безусловно, является плюсом для их использования.

В ряде современных работ с помощью фильтров Габора решаются важные проблемы, например, в работе [11] создан новый алгоритм выбора минимального пути на основе регионов для обнаружения трещин и маркировки достоверности грунта. А в работе [12] была проведена сегментация городских изображений дистанционного зондирования Земли с помощью фильтрации Габора. Таким образом, фильтрация Габора хорошо подходит для работы с данными, в которых содержится информация о населённой людьми и жилой местности.

### **Модельные подходы**

Модельным подходом, используемым для текстурного анализа, является метод фракталов. Наилучшие результаты при применении фракталов замечены в задачах, целью которых является определения островов и облаков на снимках. Модельные подходы используются в задачах трактовки данных дистанционного зондирования. С их использованием создаются структуры, целью которых является предсказание дальнейших изменений в климатических условиях и растительном покрове. Такие системы с течением времени могут результативно улучшаться, обучаясь на новых данных и сравнивая их с ожидаемыми значениями. Существуют работы, которые описывают создание моделей для организации и планирования использования земельных и минеральных ресурсов.

### **Выводы**

Каждый из подходов, рассмотренных ранее имеет как преимущества, так и свои недостатки и применяется в современном для решения определённых задач. Хочется заметить, что именно благодаря текстурному анализу создаются полезные современные системы мониторинга, которые работают на благо человечества.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Методы анализа данных дистанционного зондирования Земли / Н.П. Лавров, В.В. Попович, Л.А. Ведешин, Ф.Р. Гальяно // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 12, № 6. – С. 145 – 153.

2. Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли / В.П. Фраленко // Программные системы: теория и приложения. – 2014. – № 4. P. 19 – 39.
3. Decision Tree Classification of Land Cover from Remotely Sensed Data / M. A. Friedl, C. E. Brodley // Remote Sensing of Environment. – 1997. – Vol. 31, Issue 3.– P. 399 – 409.
4. Tree Species Classification and Health Status Assessment for a Mixed Broad-leaf-Conifer Forest with UAS Multispectral Imaging / A. Abdollahnejad, D. Panagiotidis // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, Issue 22.– № 3722.
5. Multi-Temporal Sentinel-1 Backscatter and Coherence for Rainforest Mapping / A. Pulella, A. S. Rodrigo, S. Francescopaolo, [et al.] // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, Issue 5. – № 847.
6. Impervious Surface Mapping Based on Remote Sensing and an Optimized Coupled Model: The Dianchi Basin as an Example / Y. Li, X. Yang, B. Wu, [et al.] // Land. – 2023. – Vol. 12, Issue 6. – № 1210.
7. A Target Recognition Algorithm of Multi-Source Remote Sensing Image Based on Visual Internet of Things / X. Sun, J. Lin // Mobile Networks and Applications. – 2022. – Vol. 27, Issue 2.– P. 784 – 793.
8. Optimization of Geological and Mineral Exploration by Integrating Remote Sensing Technology and Borehole Database / Y. Niu, J. Zhao, Z. Li, W. Xu // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022. – № 9717749.
9. Analysis of spatiotemporal variations of drought and its correlations with remote sensing-based indices via wavelet analysis and clustering methods / R. Ghasempour; K. Roushangar; V. S. Ozgur Kirca; M. C. Demirel // Mobile Networks and Applications. – 2022. – Vol. 53, Issue 1.– P. 175 – 192.
10. Deformation responses of landslides to seasonal rainfall based on InSAR and wavelet analysis / Y. Liu, H. Qiu, D. Yang, [et al.] // Landslides.
11. A New Region-Based Minimal Path Selection Algorithm for Crack Detection and Ground Truth Labeling Exploiting Gabor Filters / G. Leon, N. Fiorentini, P. Leandri, M. Losa // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, Issue 11– № 2722.
12. A Semantic Segmentation Method for Remote Sensing Images Based on the Swin Transformer Fusion Gabor Filter / D. Feng, Z. Zhang, K. Yan // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10– P. 77432 – 77451.

**Данилова Ирина Игоревна**, студентка Самарского университета им. Королева, Россия, город Самара, Московское шоссе, 34, 443086, телефон: + 7 (967) 715-80-29, email: irinkadanigor@gmail.com.

**Danilova Irina Igorevna**, student of the Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, 34 Moskovskoye shosse, phone: + 7 (967) 715-80-29, email: irinkadanigor@gmail.com.

УДК 621.373

Марьев Александр Александрович

## **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР НА БАЗЕ ПЛАТЫ RASPBERRY PI PICO**

*Рассмотрены основные задачи, возникающие при реализации функционального генератора на базе микроконтроллера. Предложена структура генератора, выбран метод синтеза колебаний, рассмотрены различные варианты реализации цифроаналогового преобразования. Приведены результаты экспериментов, проведенных с макетом функционального генератора, предложены пути дополнительного улучшения формы колебаний.*

*Функциональный генератор, прямой цифровой синтез, табличный синтез, цифроаналоговое преобразование, широтно-импульсная модуляция, дельта-сигма модуляция.*

Maryev Alexander Alexandrovich

## **FUNCTION GENERATOR BASED ON RASPBERRY PI PICO**

*The common problems related to the implementation of a function generator based on a microcontroller are considered. The structure of the generator is proposed, the method of synthesis is chosen, and several implementations of digital-to-analog conversion are considered. The results of experiments made with a function generator prototype are presented, and some ways to further waveform improvement are proposed.*

*Function -width-modulation, delta generator, direct digital synthesis, wavetable synthesis, digital-to-analog conversion, pulse -sigma modulation.*

### **Введение**

Функциональный генератор предназначен для формирования измерительных радиотехнических сигналов и является одним из устройств, незаменимых при проведении измерений характеристик инфокоммуникационных устройств.

На рынке представлено достаточное количество лабораторных функциональных генераторов, удовлетворяющих запросы большинства пользователей, однако в ряде случаев применение лабораторных приборов невозможно или затруднительно. К таким ситуациям относятся, например:

- измерение характеристик устройств, размещенных на подвижных малогабаритных платформах;
- измерения, требующие использования большого количества функциональных генераторов;
- самостоятельная работа студентов, выполняемая вне лабораторий.

В подобных случаях возникает необходимость в применении недорогих малогабаритных функциональных генераторов, требования к которым могут быть снижены, по сравнению с настольными лабораторными приборами.

### **Выбор вычислительной платформы**

Для разработки функционального генератора была выбрана плата Raspberry Pi Pico [1] на основе 32-разрядного микроконтроллера RP2040, основанного на архитектуре ARM Cortex-M0+ [2]. Это устройство, сочетающее вычислительную производительность и энергоэффективность с низкой стоимостью.

Микроконтроллер RP2040 поддерживает набор команд ARMv6-M Thumb-2 [3], содержит два вычислительных ядра с тактовой частотой 125 МГц, повышаемой до 200...240 МГц, и выполняет основные действия над целыми 32-разрядными числами за 1 такт. Объем оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) составляет 264 кбайт с возможностью произвольного чтения и записи за 2 такта (центральный процессор) и последовательного чтения или записи до 4 байт за 1 такт (контроллер прямого доступа к памяти).

Невысокая стоимость (менее 1 тыс. руб. по состоянию на начало 2024 г.) и возможность программирования на языках высокого уровня (C, C++, Python) в сочетании с перечисленными характеристиками определили выбор вычислительной платформы.

### **Структура генератора**

Функциональный генератор использует метод прямого цифрового синтеза (direct digital synthesis, DDS) [4]. На рис. 1 приведена структурная схема генератора.

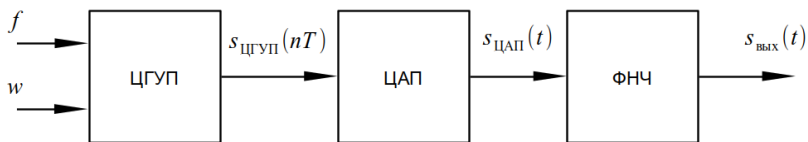


Рис. 1. Структурная схема функционального генератора

Параметры  $f$  и  $w$  задают соответственно частоту и форму колебания, формируемого цифровым генератором, управляемым программно (ЦГУП). Полученные на его выходе отсчеты цифрового колебания  $s_{\text{ЦГУП}}(nT)$  направляются на вход цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и далее на фильтр нижних частот (ФНЧ).

### **Выбор метода синтеза колебаний**

Большой объем ОЗУ и быстрый доступ к нему позволяют реализовать высокопроизводительный табличный синтезатор колебаний [5].

Высокая разрядность микроконтроллера (32 бит) позволяет использовать 32-разрядный аккумулятор фазы, что обеспечит малую величину шага сетки частот генератора.

Благодаря поддержке эмуляции вычислений с плавающей запятой нет необходимости хранить таблицы для всех форм сигналов в памяти программ – таблица для формирования колебания нужной формы может формироваться непосредственно перед запуском генератора.

### **Выбор метода цифроаналогового преобразования**

Плата Raspberry Pi Pico не содержит встроенного ЦАП, однако он может быть реализован на основе встроенного широтно-импульсного модулятора (ШИМ). При этом не требуется дополнительных аппаратных компонентов, число используемых выводов платы (один) не зависит от разрядности ЦАП, которая равна разрядности счетчика ШИМ.

Благодаря своей схемотехнической простоте ЦАП на основе ШИМ является распространенным техническим решением, несмотря на известные ограничения по быстродействию и уровню искажений сигнала [6].

Практический интерес представляют реализации ЦАП с эффективной разрядностью не ниже 8 бит, поэтому при реализации ЦАП на основе ШИМ требуется использование 8-разрядного счетчика. При этом период ШИМ составляет 256 периодов тактовой частоты процессора, следовательно, частота дискретизации ЦАП на основе ШИМ не может быть выше 500...750 кГц (при тактовой частоте процессора 128...192 МГц).

Учитывая особенности спектра ШИМ-сигнала [7], это предъявляет повышенные требования к прямоугольности АЧХ аналогового ФНЧ. Другим важным ограничением является невозможность формирования гармонических колебаний с частотами выше 250...375 кГц (половина частоты дискретизации). Для колебаний сложной формы это ограничение усиливается: возможно формирование колебаний с частотой до  $(250...375)/M$  кГц (где  $M$  – число гармоник формируемого колебания, которые должны уместиться в полосу до половины частоты дискретизации).

Повышение частоты ШИМ требует пропорционального понижения разрядности счетчика, что неизбежно приведет к повышению уровня шума квантования. Для получения приемлемого уровня искажений сигнала может быть использован программный  $\Delta$ - $\Sigma$  модулятор [8], который обеспечит вытеснение спектра шума квантования из полосы формируемого колебания в область верхних частот, подавляемых аналоговым ФНЧ, к которому подключен ЦАП.

При реализации ЦАП с  $\Delta$ - $\Sigma$  модулятором и ШИМ возникает ряд взаимно противоречивых ограничений:

- для повышения максимальной частоты формируемого сигнала необходимо увеличение частоты дискретизации;

- для увеличения частоты дискретизации требуется снижение разрядности счетчика ШИМ (то есть снижение разрядности ЦАП), что приведет к росту уровня шума квантования;

- для снижения уровня шума квантования в полосе сигнала требуется применение  $\Delta$ - $\Sigma$  модуляции, которая эффективна лишь при достаточно высоком отношении частоты дискретизации к частоте формируемого колебания, что при заданной частоте дискретизации приводит к требованию понижения максимальной частоты формируемых колебаний;

- другой путь сохранения низкого уровня шума квантования при понижении разрядности ЦАП – это повышение порядка  $\Delta$ - $\Sigma$  модулятора, что приводит к увеличению вычислительных затрат и, следовательно, к понижению максимальной реализуемой частоты дискретизации.

### **Выбор типа ФНЧ**

Функциональный генератор должен иметь достаточно низкое выходное сопротивление (десятки или сотни Ом). При реализации ЦАП на основе ШИМ выходное сопротивление ЦАП оказывается невысоким (десятки Ом), поэтому допустимо использование как активного, так и пассивного ФНЧ. На настоящем этапе используется пассивный ФНЧ

Баттерворта 5-го порядка, поскольку его проектирование, сборка и наладка более просты [9], по сравнению с активными фильтрами того же порядка на операционных усилителях [10].

### Результаты экспериментов

Прототип функционального генератора был собран на беспаячной макетной плате, граничная частота ФНЧ была выбрана равной 500 кГц, частота ШИМ 6 МГц, разрядность ЦАП 5 бит. Частота формируемого колебания задана равной 1 кГц.

Для наблюдения формы выходного колебания использовался цифровой осциллограф Agilent MSO6104A с полосой 1 ГГц. Для исследования спектра формируемого колебания использовался анализатор спектра Instek GSP-7730 с полосой 3 ГГц.

На рис. 2 показаны форма сигнала и оценка его спектральной плотности мощности в полосе до 3 МГц (половина частоты дискретизации) при использовании ЦАП на основе ШИМ.

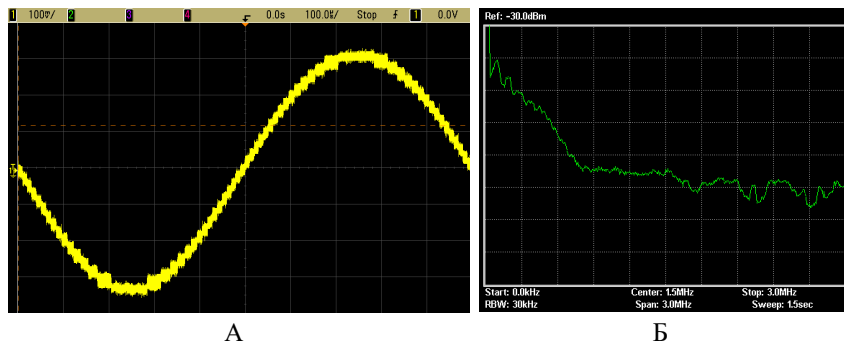


Рис. 2. Сигнал на выходе генератора с ЦАП на основе ШИМ (А) и его спектральная плотность мощности (Б)

На осциллограмме различимы ступенчатые изменения сигнала, обусловленные низкой разрядностью. В спектре различимы шумовые составляющие в полосе до 500 кГц с уровнем до  $-10$  дБм. Для улучшения формы сигнала была реализована  $\Delta$ - $\Sigma$  модуляция 2-го порядка. Осциллограмма и оценка спектра полученного сигнала в полосе до 3 МГц приведены на рис. 3.

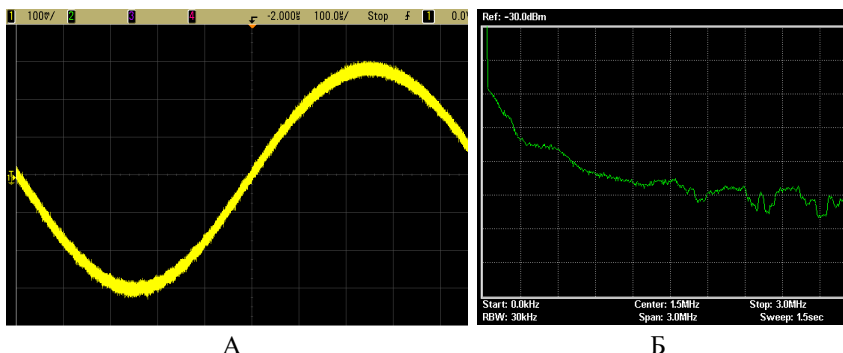


Рис. 3. Сигнал на выходе генератора с ЦАП на основе ШИМ с  $\Delta$ - $\Sigma$  модулятором 2-го порядка (А) и его спектральная плотность мощности (Б)

Применение  $\Delta$ - $\Sigma$  модуляции исключило ступенчатые изменения выходного сигнала, уровень шума в полосе пропускания ФНЧ (до 500 кГц) уменьшен на 10-15 дБ, что является существенным улучшением.

### Выводы

На базе платы Raspberry Pi Pico реализован функциональный генератор с возможностью выбора формы и частоты колебания. Проведен эксперимент по исследованию формы колебания и его спектра для случая синусоиды с частотой 1 кГц. Применение ЦАП с двукратной модуляцией (сначала  $\Delta$ - $\Sigma$ , затем широтно-импульсная) позволило существенно уменьшить уровень шума квантования в полосе сигнала.

Дополнительное увеличение отношения сигнал/шум возможно за счет увеличения прямоугольности АЧХ ФНЧ, а также за счет отказа от ШИМ и применения ЦАП лестничного типа.

**Проект реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей 2023/2024 Стипендиальной программы Владимира Потанина.**

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Raspberry Pi Pico Datasheet*. Режим доступа: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf> (дата обращения 30.05.2024)
2. *Joseph Yiu. The Definitive Guide to ARM Cortex-M0 and Cortex-M0+ Processors*. Second edition. Elsevier Inc. – 2015, 743 p.



3. ARMv6-M Architecture Reference Manual. Режим доступа: [https://github.com/hyf6661669/ARM\\_documents/blob/main/ARMv6-M%20Architecture%20Reference%20Manual.pdf](https://github.com/hyf6661669/ARM_documents/blob/main/ARMv6-M%20Architecture%20Reference%20Manual.pdf) (дата обращения: 30.05.2024 г.)
4. *Vankka, Jouko.* (2000). Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications. 951-22-5232-5.
5. *Bristow-Johnson, Robert.* (1996). Wavetable Synthesis 101, A Fundamental Perspective.
6. *Куряев И.* Проектирование высокопроизводительных ЦАП с ШИМ для промышленных приложений // Электронные компоненты и технологии №3, 2021 – С.64-68
7. *Марьев А.А.* О выборе параметров широтно-импульсной модуляции для цифроаналогового преобразования // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2023»: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2023. том 2 // С.83-89
8. *Schreier, Richard & Pavan, Shanthy & Temes, Gabor.* (2017). Understanding Delta-Sigma Data Converters. 10.1002/9781119258308.
9. *Кауфман М., Сидман А.Г.* Практическое руководство по расчетам схем в электронике: справ. в 2 т. Т.2: пер. с англ./под ред. Ф.Н. Покровского. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 288 с.: ил.
10. *Тутце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.

**Марьев Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, учебно-лабораторный корпус "Д", аудитория Д-110; Телефон: +7 (8634) 37-16-32, email: [aamarev@sfedu.ru](mailto:aamarev@sfedu.ru).

**Maryev Alexandr Alexandrovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor, Department of fundamentals of Radioengineering, Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: [aamarev@sfedu.ru](mailto:aamarev@sfedu.ru).

Тимошенко Данил Александрович

## **ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ДВОЙНОЙ БУФЕРИЗАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА НА БАЗЕ RASPBERRY PI PICO**

*Доклад посвящен разработке цифроаналогового преобразователя на базе платы Raspberry Pi Pico. В работе рассмотрены вопросы по проектированию цифроаналогового преобразователя, управлению интерфейсом USB, обмену данными между интерфейсом USB и широтно-импульсным модулятором, а также программированию микроконтроллера RP2040.*

*Raspberry pi pico, интерфейс usb, цифроаналоговый преобразователь, широтно-импульсная модуляция, прямой доступ к памяти, фильтр нижних частот.*

Timoshenko Danil Alexandrovich

## **DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER WITH DOUBLE BUFFERING BASED ON PULSE-WIDTH MODULATOR ON RASPBERRY PI PICO**

*The paper is devoted to the development of a digital-to-analog converter based on Raspberry Pi Pico. The paper deals with the design of digital-to-analog converter, USB interface control, data exchange between USB interface and pulse-width modulator, as well as programming of RP2040 microcontroller.*

*Raspberry pi pico, usb interface, digital to analog converter, pulse width modulation, direct memory access, lowpass filter.*

### **Введение**

Данная работа является частью проекта «Блок ввода-вывода аналоговых сигналов с интерфейсом USB», выполняемого совместно с Передовой инженерной школой ЮФУ. Плата Raspberry Pi Pico выступает в роли USB-аудиоустройства, которое принимает цифровой сигнал и преобразует его в аналоговый сигнал, то есть работает как устройство вывода с интерфейсом USB.

На плате Raspberry Pi Pico отсутствует аппаратный цифроаналоговый преобразователь [1], поэтому решено использовать выход широтно-импульсного модулятора (ШИМ) для выполнения цифроаналогового преобразования [2].

### **Основная часть**

Цифроаналоговый преобразователь реализован таким образом, что микроконтроллер RP2040, на котором основана плата Raspberry Pi Pico, по шине USB получает данные в формате PCM8 (8 бит) или PCM16 (16 бит) от персонального компьютера. С помощью контроллера DMA (*direct memory access* – прямой доступ к памяти) данные передаются через промежуточный буфер в широтно-импульсный модулятор, который генерирует ШИМ сигнал [3]. Этот сигнал с выбранного вывода платы поступает на вход аналогового ФНЧ для сглаживания. На рис. 1 изображена структурная схема ЦАП на основе ШИМ.

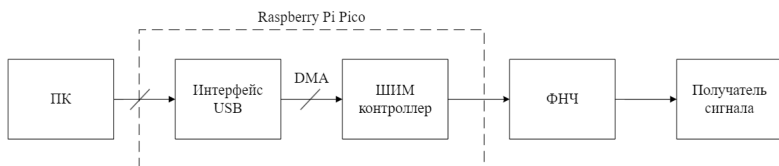


Рис. 1. Структурная схема ЦАП на основе ШИМ

Рассмотрим работу передачу данных от интерфейса USB до широтно-импульсного модулятора более подробно. На рис. 2 представлена схема, поясняющая работу буферов для передачи сигнала.

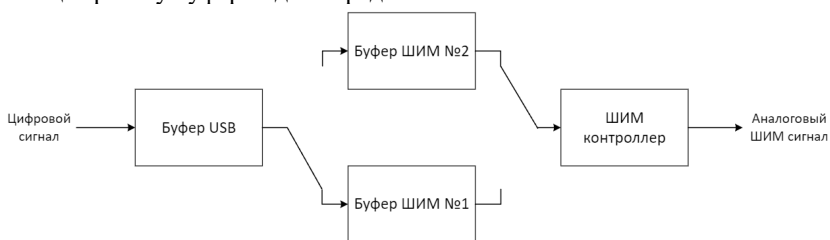


Рис. 2. Структурная схема передачи данных при двойной буферизации

Полученные данные от интерфейса USB хранятся в буфере USB. Далее данные передаются в буфер ШИМ №1, а в это время данные из буфера ШИМ №2 передаются в ШИМ контроллер, который их преобразует в аналоговый вид. Таким образом реализован двухстраничный буфер ШИМ для передачи данных от интерфейса USB до широтно-импульсного модулятора. В тот момент, когда заканчивается запись в один буфер и чтение из другого, буферы меняются местами (фактически происходит обмен указателями) и их работа дальше продолжается [4].

Передачей данных от последнего буфера ШИМ в широтно-импульсный модулятор занимается подсистема DMA. Структурная схема каналов DMA приведена на рис. 3.

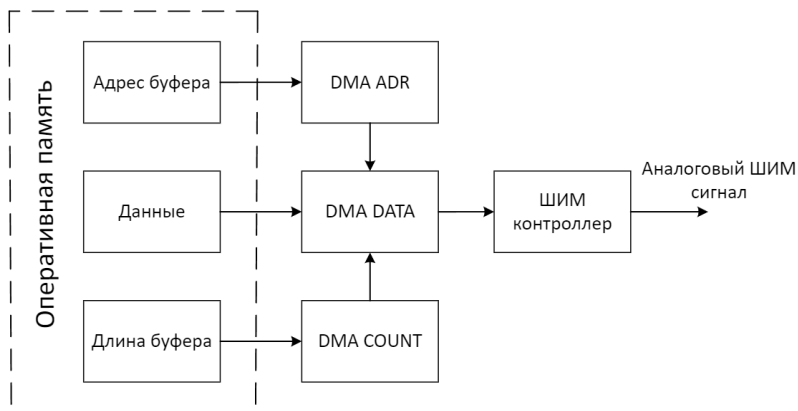


Рис. 3. Структурная схема работы DMA каналов

DMA – это отдельная подсистема микроконтроллера, которая необходима для передачи данных из одной области памяти в другую область памяти или на периферийное устройство без участия центрального процессора. Для работы DMA канала необходимо задать адрес памяти, по которому хранятся данные, количество передач и адрес, по которому нужно отправить данные. За передачу данных из буфера ШИМ в широтно-импульсный модулятор отвечает канал DMA DATA. Этот канал настраивают два других канала DMA ADR и DMA COUNT, которые в свою очередь передают адрес и количество передач (размер буфера ШИМ). Эти три канала DMA вызывают друг друга по цепочке непрерывно [5].

Микроконтроллер генерирует ШИМ сигнал следующим образом: происходит наращивание счётчика от 0 до 255, то есть реализован 8-битный ЦАП. Каждый такт микроконтроллера прибавляет единицу к значению счётчика. Пороговое значение задается равным отсчету РСМ8, полученному микроконтроллером по USB. При значении счётчика от 0 до порогового значения на выводе платы генерируется логическая единица (3.3 В), при значении счётчика выше порогового – логический ноль [3]. Временные диаграммы, поясняющие работу ШИМ на Raspberry Pi Pico, приведены на рис. 4.

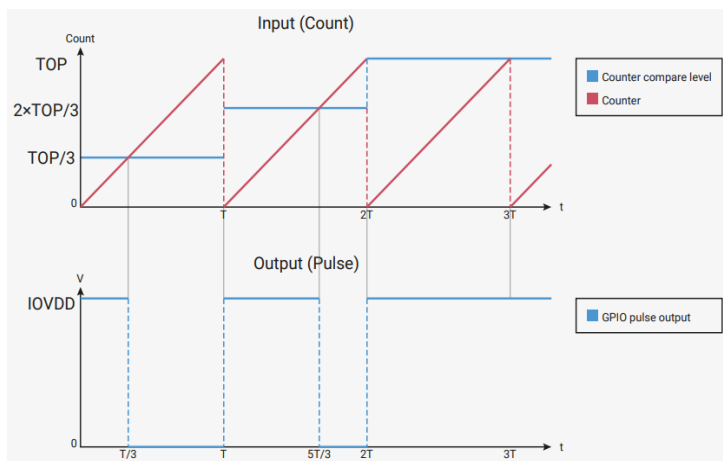


Рис. 4. Формирование ШИМ сигнала на Raspberry Pi Pico

После широтно-импульсного модулятора сигнал проходит через фильтр нижних частот. Сигнал на выходе ФНЧ представлен на рис. 5. ЦАП имеет следующие параметры: частота ШИМ 250 кГц, разрядность 8 бит, частота дискретизации сигнала 250 кГц, частота гармонического сигнала 1 кГц, частота среза фильтра также 1 кГц.

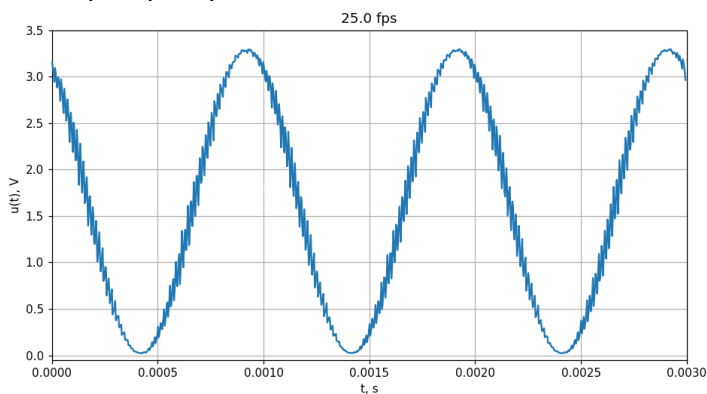


Рис. 5. Сигнал на выходе ФНЧ

На текущем этапе проекта разработка ЦАП ведется с применением ФНЧ 1-го порядка (RC-цепочка), поэтому частота среза занижена для лучшего сглаживания высокочастотных пульсаций.

Такой фильтр имеет один существенный недостаток. Крутизна спада в полосе подавления составляет всего лишь 20 дБ/декаду, то есть фильтр 1-го порядка не обеспечивает характеристик, необходимых при построении ЦАП с использованием ШИМ. Однако на этапе разработки программной части такой фильтр является наиболее удобным и простым решением [6].

Параллельно с разработкой ЦАП ведется разработка активного ФНЧ 8-го порядка с полосой пропускания 192 кГц и достаточно высокой прямоугольностью АЧХ.

### **Выводы**

В результате проделанной работы была создана программа для микроконтроллера RP2040 платы Raspberry Pi Pico. Программа реализована на языке программирования C. Она позволяет принимать цифровые сигналы с персонального компьютера и преобразовывать их в аналоговые сигналы.

Таким образом, был реализован прототип подсистемы вывода сигналов для проекта «Блок ввода-вывода аналоговых сигналов с интерфейсом USB». Проект может быть полезен в образовательном процессе при обучении студентов программированию и цифровой обработке сигналов. Также данная технология будет полезна при разработке систем программно-определяемого радио, необходимыми элементами которых являются АЦП и ЦАП.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Технические характеристики платы Raspberry Pi Pico. <https://www.raspberrypi.com/> (дата обращения: 19.05.2024)
2. Using PWM Output as a Digital-to-Analog Converter on a TMS320F280x Digital Signal Controller. Application Report (SPRAA88A) <https://www.ti.com/lit/an/spraa88a/spraa88a.pdf?ts=1717230151734> (дата обращения: 19.05.2024)
3. RP2040 Datasheet A microcontroller by Raspberry Pi. <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf> (дата обращения: 19.05.2024)
4. Разработка графического интерфейса с помощью библиотеки Qt3. [https://opennet.ru/docs/RUS/qt3\\_prog/x2947.html](https://opennet.ru/docs/RUS/qt3_prog/x2947.html) (дата обращения: 21.05.2024)
5. *Raspberry Pi Pico. C/C++ SDK. Libraries and tools for C/C++ development on RP2040 microcontrollers.* <https://www.raspberrypi.com/> (дата обращения: 21.05.2024)

6. *Плотников Ю. В.* Использование выхода ШИМ как цифро-аналогового преобразователя / Ю. В. Плотников, Ю. С. Уймин // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. — Екатеринбург: УрФУ, 2018. — С. 237-241.
7. *Кестер У.* Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Уолт Кестер. — Москва: Техносфера, 2010. - 328 с.
8. *Кестер У.* Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. — Москва: Техносфера, 2007. - 1016 с.
9. 5. Лайонс Р., Цифровая обработка сигналов/ Р.Лайонс – М.: Бином, 2007. – 652с.
10. Цифровая обработка сигналов. Многоскоростные системы. Лекция 16 апреля 2018 г. МФТИ.

**Тимошенко Данил Александрович**, студент кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления ЮФУ. **Адрес:** Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, учебно-лабораторный корпус "Д", аудитория Д-110; Телефоны: +7 (8634) 37-16-32; +7 (863) 218-40-00 доб. 30109; +7 (8634) 68-08-90 доб. 30109 email: dant@sfedu.ru

**Timoshenko Danil Alexandrovich**, student, Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFU. **Address:** Russia, Rostov region, 347922, Taganrog, Nekrasovsky per., 44, educational and laboratory building "D", auditorium D-110; Phones: +7 (8634) 37-16-32; +7 (863) 218-40-00 ext. 30109; +7 (8634) 68-08-90 ext. 30109 email: dant@sfedu.ru

УДК 621.372.542.2

Белик Владимир Андреевич

## **АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ С ОДНОПОЛЯРНЫМ ПИТАНИЕМ ДЛЯ БЛОКА ВВОДА-ВЫВОДА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ**

*Доклад посвящен разработке активного фильтра нижних частот для блока ввода-вывода аналоговых сигналов. Рассмотрены вопросы проектирования и изготовления фильтров 2-го, 4-го и 8-го порядка, а также результаты измерения их характеристики.*

*Фильтр нижних частот, нелинейные искажения, амплитудно-частотная характеристика.*

Belik Vladimir Andreevich

## ACTIVE LOW-PASS FILTER WITH UNIPOLAR POWER SUPPLY FOR THE ANALOG SIGNALS I/O UNIT

*The report is devoted to the development of an active low-pass filter for the analog signal input/output unit. The issues of designing and manufacturing filters of the 2nd, 4th and 8th order, as well as the results of measuring their characteristics, are considered.*

*Low-pass filter, nonlinear distortion, amplitude-frequency response.*

### **Введение**

В рамках проекта «Блок ввода-вывода аналоговых сигналов с интерфейсом USB», выполняемого при поддержке Передовой Инженерной школы (ПИШ) ЮФУ, одной из центральных задач является проектирование активных фильтров нижних частот (ФНЧ) для аналого-цифрового (АЦП) и цифроаналогового (ЦАП) преобразователей.

ФНЧ — это устройство, которое эффективно пропускает спектральные составляющие сигнала ниже некоторой частоты (частоты среза) и подавляет более высокочастотные составляющие. Степень подавления зависит от порядка фильтра [1].

### **Основная часть**

При работе блока ввода-вывода максимальная частота дискретизации сигнала равна 384 кГц, так как блок работает со стандартным драйвером устройств USB Audio Class 2 [2]. В этой связи частота среза фильтра выбрана в соответствии с теоремой Котельникова [3]: 192 кГц. Для снижения требований к прямоуглольности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) частота дискретизации АЦП и ЦАП повышена до 500 кГц (тракт цифровой обработки сигналов содержит преобразователь частоты дискретизации).

В соответствии с рекомендациями из работы [4] по полупроводниковой схемотехнике была выбрана оптимальная схема активного звена 2-го порядка – схема с многопетлевой отрицательной обратной связью, приведенная на рис. 1.

Передаточная функция активного ФНЧ 2-го порядка с многопетлевой обратной связью определяется выражением:

$$A(s_n) = \frac{R_2/R_1}{1 + w_g * C_1 * (R_2 + R_3 + \frac{R_2 * R_3}{R_1}) * s_n + w_g^2 * C_1 * C_2 * R_2 * R_3 * s_n^2} \quad (1)$$



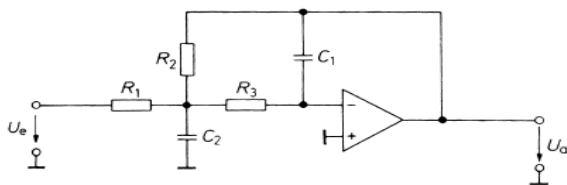


Рис. 1. Схема активного ФНЧ 2-го порядка с многопетлевой обратной связью

Ряды номиналов E24 и E96 для резисторов более доступны, чем для других радиоэлементов, поэтому при расчете фильтра сначала выбирают номиналы конденсаторов и затем рассчитывают сопротивления резисторов. Для этого решим уравнения относительно сопротивлений и получим:

$$R_2 = \frac{a_1 C_2 - \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4 * C_1 * C_2 * b_1 * (1 - A_0)}}{4 * \pi * f_g * C_1 * C_2} \quad (2)$$

$$R_1 = \frac{-R_2}{A_0} \quad (3)$$

$$R_3 = \frac{b_1}{4 * \pi^2 * f_g^2 * C_1 * C_2 * R_2} \quad (4)$$

Чтобы операционный усилитель мог считаться идеальным, на частоте среза фильтра он должен иметь высокий коэффициент петлевого усиления. По этой причине даже при низких частотах среза требуются быстродействующие операционные усилители. Для частоты среза 192 кГц этому требованию удовлетворяют такие распространенные модели операционных усилителей, как LM358[5] и NE5532[6].

Выбрав из таблицы, в которой рассчитаны коэффициенты передаточной функции а и b, можно синтезировать фильтры различного порядка и типа (Чебышева с разной неравномерностью АЧХ в полосе пропускания, Баттерворта, Бесселя и др.).

На начальном этапе работы был выполнен синтез ФНЧ 2-го порядка и его моделирование в среде Multisim. Был получен ФНЧ 2 порядка с частотой среза, близкой к заданным 192 кГц. Для блока ввода-вывода желательно обеспечить возможность работы с постоянными напряжениями и токами, но однополярное питание ОУ не позволяет фильтру пропускать постоянный ток, так как требует включения разделительных конденсаторов на входе и выходе каждого каскада. Двуполярное питание организуется при помощи микросхемы ICL7660 [7], принципиальная схема конвертора постоянного напряжения показана на рис. 2.

Путем каскадного соединения двух ФНЧ 2-го порядка можно получить ФНЧ 4-го порядка. При исследовании формы сигнала на выходе собранного фильтра 4-го порядка было обнаружено, что при двуполярном питании сигнал на выходе фильтра имеет существенные нелинейные искажения [8] (рисунок 3, А).

Добавление подтягивающих (pull-down) резисторов номиналом 500 Ом между выходом каждого каскада и минусом питания решило данную проблему [9] (рис. 3, б).

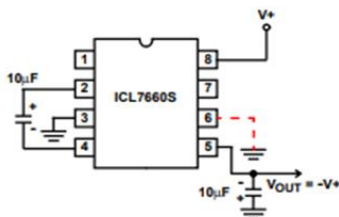


Рис. 2. Типовая схема конвертера постоянного напряжения на микросхеме ICL7660S

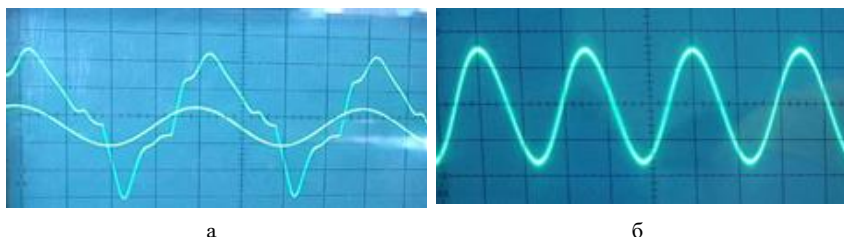


Рис. 3. Устранение переходных искажений. Сигналы на входе (синусоида) и выходе (искаженное колебание) фильтра без подтягивающих резисторов (а). Сигнал на выходе фильтра после подключения подтягивающих резисторов (нет видимых нелинейных искажений)

Отсутствие нелинейных искажений позволяет измерить амплитудно-частотную характеристику. АЧХ, полученная с помощью Multisim, и АЧХ, измеренная экспериментально, представлены на рис. 4.

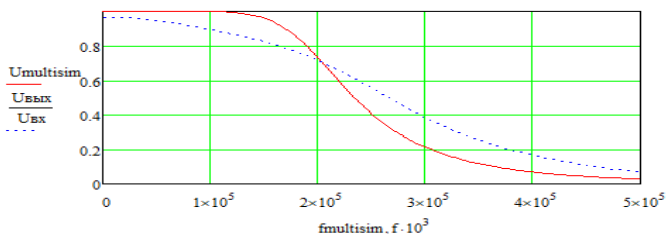


Рис. 4. АЧХ фильтра 4-го порядка: модель, созданная в пакете Multisim (пунктир) и результат измерений (сплошная линия)

Конечной задачей было синтезировать фильтр 8-го порядка, его можно получить путём каскадного соединения четырех фильтров 2-го порядка, которые могут быть реализованы на одной микросхеме LM324 Сравнение АЧХ, полученных по коэффициентам передаточной функции, в среде разработки Multisim и экспериментально, приведено на рис. 5.

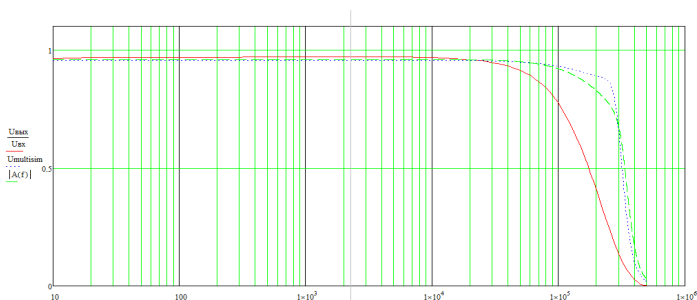


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики ФНЧ 8 порядка: измеренная экспериментально, полученная в программе Multisim и полученная из передаточной функции

Частота среза, определенная по экспериментальной АЧХ, примерно равна 100 кГц, отличия от теоретической частоты среза объясняются отклонениями параметров элементов фильтра от номиналов. Расчет фильтра был повторен для завышенной частоты среза, чтобы экспериментальная частота среза получилась нужной (ближе к требуемым 192 кГц).

Было установлено, что в собранном фильтре микросхема инвертора напряжения работает в режиме, близком к перегрузке, что не позволит в дальнейшем от одного инвертора питать сразу несколько фильтров. Было

принято решение перейти к схеме с однополярным питанием и смещением по постоянному току, представленной на рис. 6. АЧХ фильтров, собранных на безопасной макетной плате и на печатной плате представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

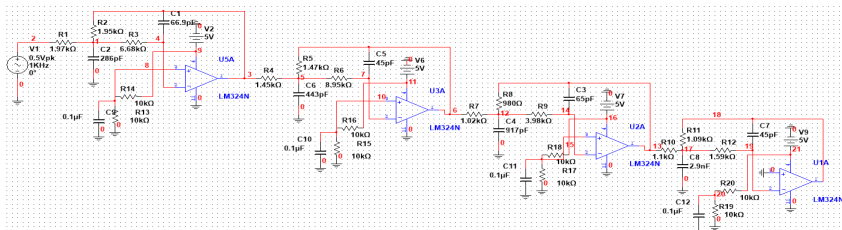


Рис. 6. Принципиальная схема ФНЧ 8 порядка с однополярным питанием

Трассировка платы была выполнена с помощью программного обеспечения Sprint layout [10], рисунок дорожек представлен на рис. 9. Плата была изготовлена с применением термопереноса тонера.

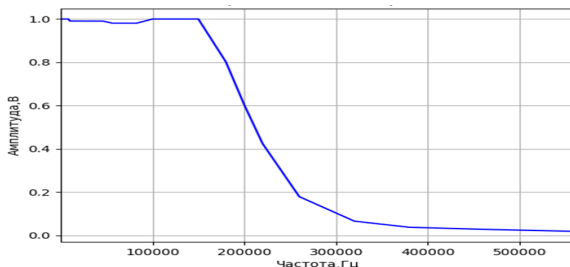


Рис. 7. АЧХ ФНЧ 8 порядка, собранного на макетной плате

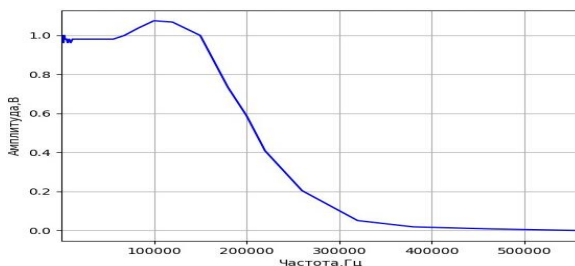


Рис. 8. АЧХ ФНЧ 8 порядка, собранного на печатной плате

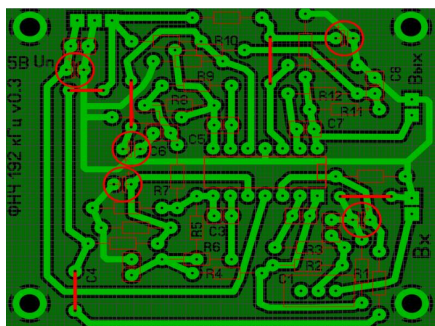


Рис. 9. Разработанная печатная плата ФНЧ 8 порядка

### **Выводы**

В рамках проекта «Блока-вывода аналоговых сигналов с интерфейсом USB» был разработан аналоговый активный ФНЧ 8-го порядка для применения в составе АЦП и ЦАП. На практике были закреплены навыки работы с операционными усилителями, освоены методы проектирования активных фильтры от 2-го до 8-го порядка, а также приемы изготовления печатных плат. В дальнейшем планируется доработка фильтра и создание двух его специализированных версий: для работы с АЦП и с ЦАП.

**Работа выполнена при материальной поддержке Передовой инженерной школы ЮФУ, грант 4L/22-04-ПИШ СТУД-04.**

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Фолкенберри Л.М.* Применения Операционных Усилителей И Линейных Ис. Автор: Лусис М. Фолкенберри Перевод С Английского Л.М. Наймарка, МОСКВА: ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»: 1985
2. Audio Devices Rev. 2.0 and Adopters Agreement Режим доступа: <https://www.usb.org/document-library/audio-devices-rev-20-and-adopters-agreement> (дата обращения: 24.05.2024)
3. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы 4 изд., Москва: Радио и связь 1986 г.
4. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника Том I-12 изд., Москва: ДМК-828 с. 2007 г.

5. Single Supply Dual Operational Amplifiers LM258, LM358, LM358A, LM358E, LM2904, LM2904A, LM2904E, LM2904V, NCV2904, © Semiconductor Components Industries, LLC, 2019 www.onsemi.com
6. Single Supply Quad Operational Amplifiers LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902, © Semiconductor Components Industries, LLC, 2019 www.onsemi.com
7. ICL7660S, ICL7660A, Copyright Intersil Americas LLC 1999, 2004, 2005, 2008, 2011, 2013.
8. *Брюс Картер и Рон Манчини*, Операционные усилители для всех, перевод с английского к.т.н. А.Н.Рабодзея, Москва издательский дом Додэка-XXI, 2011.
9. Power Amplifier Seminar, John Brown, Month, 200x, Texas Instruments
10. Проектирование печатных плат в программе Sprint Layout 6, М.Г. Царёв, Ульяновск, 2016. – 97 с.: ил.

**Белик Владимир Андреевич** – студент кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления ЮФУ, техник-проектировщик Передовой инженерной школы Адрес: Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, учебно-лабораторный корпус "Д", аудитория Д-110; Телефоны: +7 (8634) 37-16-32; +7 (863) 218-40-00 доб. 30109; +7 (8634) 68-08-90 доб. 30109 email: vbeli@sfnedu.ru

**Belik Vladimir Andreevich** – student, Department of antennae and radio transmitting devices, development engineer of Leading engineer school, Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: vbeli@sfnedu.ru.

УДК 621.314.26

Нагорный Владимир Александрович, Белый Иван Сергеевич

## **КВАДРАТУРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРА**

*В данной работе был собран и исследован квадратурный преобразователь частоты на основе мультиплексора FST3253. Получены квадратурные составляющие на выходе схемы.*

*Квадратурный преобразователь частоты, мультиплексор, квадратурные составляющие.*

Nagornyi Vladimir Alexandrovich, Belyi Ivan Sergeevich  
**QUADRATURE FREQUENCY CONVERTER BASED ON  
A MULTIPLEXER**

*In this work, a quadrature frequency converter based on the FST3253 multiplexer was assembled and investigated. The quadrature components at the output of the circuit are obtained.*

*Quadrature frequency converter, multiplexer, quadrature components.*

### **Введение**

Преобразователь частоты – это устройство, которое переносит частоту сигнала вдоль частотной оси при сохранении его структуры. Устройство может переносить спектр сигнала с несущей в нулевую частоту, то есть формировать комплексную огибающую, вещественной частью которой является синфазная составляющая, а мнимой – квадратурная [6 – 10].

### **Основная часть**

1. Рассмотреть двойную балансную схему детектора Тейло

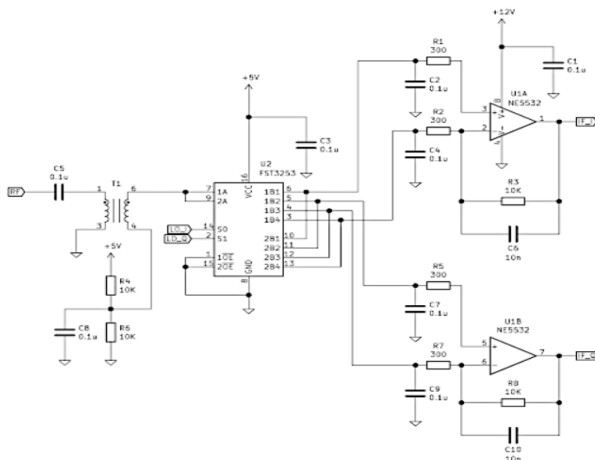


Рис. 1. Принципиальная схема детектора Тейло [1 – 2]

2. Изготовление трансформатора для реализации схемы

Для реализации данной схемы необходимо было выполнить изготовление трансформатора с общей точкой.

Трансформатор состоит из 30 витков на первичной обмотке и по 15 витков на вторичной. Чтобы убедиться в работоспособности данной конструкции рассмотрели сигналы на выходах обмотки на частоте 500 кГц.

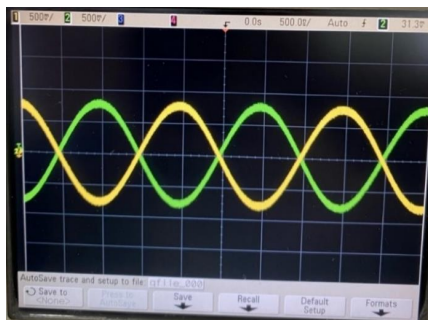


Рис. 2. Сигналы на выходах трансформатора

Из осциллограммы видим, что сигналы имеют одинаковую амплитуду и находятся в противофазе, следовательно трансформатор работает правильно.

### 3. Создание управляющих импульсов с помощью Raspberry Pi Pico

Для этого написан код на языке программирования Python, который формирует необходимые логические уровни на нужных входах микросхемы и устанавливает правильный сдвиг по фазе управляющих импульсов (90°) [4].

```
PWM_CHAN_REGS[n1].CSR_BF.DIVMODE = 0
PWM_CHAN_REGS[n1].CSR_BF.PH_RET = 0
PWM_CHAN_REGS[n1].CSR_BF.PH_ADV = 0
PWM_CHAN_REGS[n1].DIV_BF.INT = 5
PWM_CHAN_REGS[n1].DIV_BF.FRAC = 0
PWM_CHAN_REGS[n1].CC_BF.A = 6
PWM_CHAN_REGS[n1].CC_BF.B = 6
PWM_CHAN_REGS[n1].TOP_BF.TOP = 11
PWM_CHAN_REGS[n2].CSR_BF.DIVMODE = 0
PWM_CHAN_REGS[n2].CSR_BF.PH_RET = 0
PWM_CHAN_REGS[n2].CSR_BF.PH_ADV = 0
PWM_CHAN_REGS[n2].DIV_BF.INT = 5
```



Из приведенной части кода для регулирования частоты импульсов изменялись регистры DIV\_BF.INT [3], а для определения их скважности рассматриваются соотношения CC\_BF [3] и TOP\_BF.TOP [3].

#### 4. Сборка схемы и анализ полученных результатов

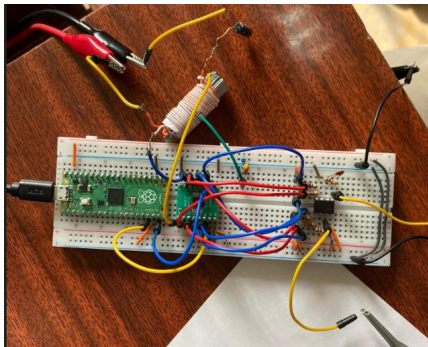


Рис. 3. Собранная схема

Проанализируем полученные результаты:



а)

б)

Рис. 4. Полученные квадратурные составляющие:

а) – при частоте тактовых импульсов 83,33 кГц и отклонении частоты на 1 кГц; б) – при частоте тактовых импульсов 83,33 кГц и отклонении частоты на -1 кГц

Можно заметить, что при смещении частоты на 1 кГц влево и вправо сигнал на выходе одинаковый, однако на рисунке а) квадратурная составляющая опережает синфазную, а на рисунке б) квадратурная составляющая опаздывает на  $90^\circ$  по сравнению с синфазной.

Рассмотрим результаты на более высоких частотах:

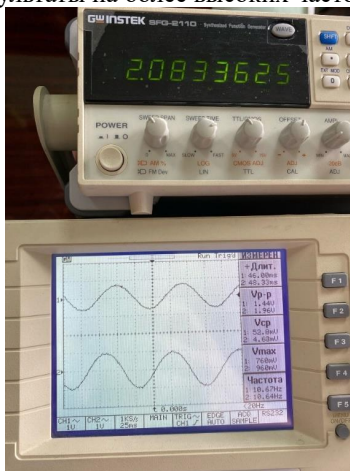
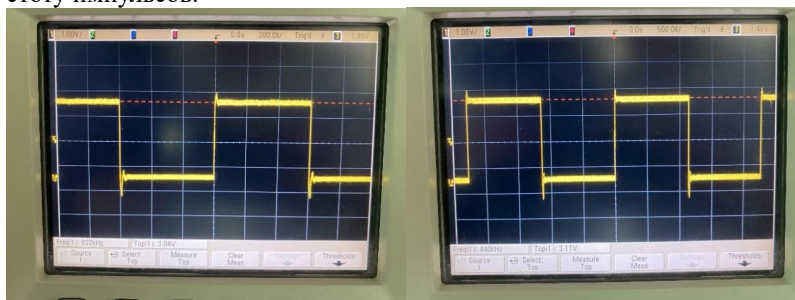


Рис.5. Полученные квадратурные составляющие при частоте входного сигнала  $f = 2,0833625$  МГц

### 5. Формирование прямоугольных импульсов с помощью I2C интерфейса на выходе синтезатора частоты SI5351

В качестве генератора импульсов будем использовать синтезатор частоты SI5351[5], управляемый через интерфейс I2C с той же платы Raspberry Pi Pico, так как он позволяет точнее и плавнее менять синтезируемую частоту импульсов.

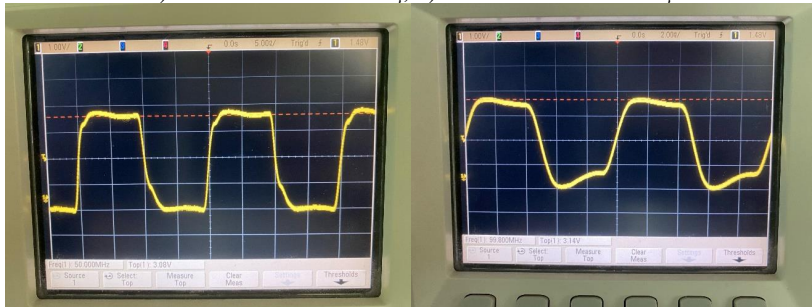


а)

б)

*Рис. 6. Прямоугольные импульсы:*

*а) – с частотой 440 кГц; б) – с частотой 832 кГц*

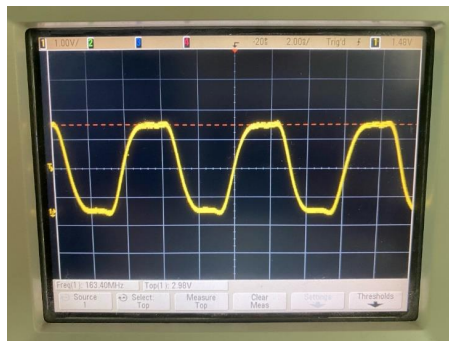


*а)*

*б)*

*Рис. 7. Прямоугольные импульсы:*

*а) – с частотой 50 МГц; б) – с частотой 100 МГц*



*Рис.8. Прямоугольные импульсы с частотой 163 МГц*

На данном этапе удалось синтезировать только такой диапазон частот. Для получения более низких частот необходимо использовать делитель SI\_R\_DIV\_128. При повышении частоты наблюдаются заметные пульсации, затягивание фронтов и, что хуже, нестабильность частоты генерации.

### **Выводы**

В ходе данной работы был создан и протестирован квадратурный преобразователь частоты, который сдвигает спектр сигнала на разностную частоту. По приведенным выше исследованиям можно сделать вывод, что разработанное устройство полноценно работает. Исходя из этого планируется выполнить данную схему на печатной плате, топология которой также сейчас в разработке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ultra Low Noise, High Performance, Zero IF Quadrature Product Detector and Preamplifier By Dan Tayloe.
2. Квадратурный сэмплирующий детектор по схеме детектора Тейло <https://eax.me/tayloe-detector/> (дата обращения: 10.04.2024)
3. RP2040 Datasheet
4. FST 3253 Datasheet
5. SI5153 Datasheet
6. *Марьев А. А.* Методы и устройства цифровой обработки сигналов. Цифровой анализ сигналов / А. А. Марьев. – Ростов-на-Дону - Таганрог: Южный федеральный университет, 2020. – 132 с.
7. *Федосов В. П.* Радиотехнические цепи и сигналы : Учебное пособие / В. П. Федосов. – Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2017. – 282 с.
8. *Цветков Ф.А., Терешков В.В.* Комплексные сигналы в радиотехнических устройствах передачи и приема информации: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015.
9. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов М.: Радио и связь, 1986.
10. *Маркович И.И.* Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах – Ростов н/Д: Издательство ЮФУ, 2012.

**Нагорный Владимир Александрович**, студент Института Радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, телефон: +7 (8634) 37-16-32, email: [nagornyi@sfedu.ru](mailto:nagornyi@sfedu.ru).

**Белый Иван Сергеевич**, студент Института Радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, телефон: +7 (8634) 37-16-32, email: [ibelyi@sfedu.ru](mailto:ibelyi@sfedu.ru).

**Nagornyi Vladimir Alexandrovich**, student at the Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Southern Federal University, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: [nagornyi@sfedu.ru](mailto:nagornyi@sfedu.ru).

**Belyi Ivan Sergeevich**, student at the Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Southern Federal University, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: [ibelyi@sfedu.ru](mailto:ibelyi@sfedu.ru).

Максимова София Михайловна

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АНАЛИЗЕ ФИНАНСОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ**

*В статье рассматривается роль искусственного интеллекта в анализе финансовых данных для принятия инвестиционных решений. Он помогает уменьшить влияние человеческого фактора, связанного с эмоциями и привычками, и позволяет инвесторам принимать более информированные решения. ИИ может анализировать большие объемы данных, включая финансовые отчеты, новостные ленты и информацию из социальных медиа, и принимать решения на основе математических моделей и аналитических инструментов. В области инвестиций ИИ может помочь в прогнозировании поведения рынка, обнаружении необычных событий и спадов, снижении операционных рисков и увеличении скорости и объема сделок. Кроме того, ИИ может помочь в формировании собственных данных с применением методов машинного обучения и в разработке торговых стратегий на основе проведенного анализа.*

*Искусственный интеллект, нейронные сети, финансовый рынок, автоматизация, инвестиции.*

Maximova Sofia Mikhailovna

## **THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE ANALYSIS OF FINANCIAL DATA TO MAKE INVESTMENT DECISIONS**

*The article examines the role of artificial intelligence in the analysis of financial data for making investment decisions. It helps to reduce the impact of the human factor associated with emotions and habits, and allows investors to make more informed decisions. AI can analyze large amounts of data, including financial reports, news feeds and information from social media, and make decisions based on mathematical models and analytical tools. In the field of investments, AI can help in predicting market behavior, detecting unusual events and downturns, reducing operational risks and increasing the speed and volume of transactions. In addition, AI can help in the formation of its own data using machine learning methods and in the development of trading strategies based on the analysis.*

## **Введение**

Искусственный интеллект (ИИ), основанный на нейронных сетях, в настоящее время широко обсуждается и применяется в различных областях. С помощью ИИ можно создавать изображения и музыкальные композиции. Современные генеративные нейронные сети способны вести содержательный диалог, из-за чего людям иногда трудно определить, взаимодействуют ли они с нейросетевыми алгоритмами или живым человеком.

## **Основная часть**

На протяжении десятилетий нейронные сети использовались на финансовых рынках для самых разных целей. Основная цель внедрения ИИ во всех областях – повысить автоматизацию и эффективность работы, а также масштаб и управление рисками. Алгоритмическая торговля, являющаяся формой классической торговли, основана на заранее определенных правилах, которые определяют, когда должны совершаться транзакции, исходя из таких факторов, как цена, время и объем. Благодаря алгоритмам торговля может быть автоматизирована с минимальным вмешательством человека [1]. По данным на 2021 год, около 80% транзакций на американском фондовом рынке в настоящее время полностью или частично автоматизированы [9]. Ассоциация ФинТех провела исследование, которое показало, что более 90% финансовых учреждений используют системы на базе искусственного интеллекта в своей деятельности. Кроме того, опрос показал, что более 80% этих учреждений используют решения для анализа данных, в то время как 60% используют обработку текста, а 30% внедряют технологии распознавания речи и компьютерного зрения [4]. Доля таких компаний представлена в табл. 1.

Таблица 1

Доля компаний, использующих технологии ИИ в различных отраслях [3]

	Компьютерное зрение	Глубокое обучение	Распознавание лиц	Генерация текста	Распознавание речи	Рекомендательные системы	Обучение подкреплением	Роботизация бизнес-процессов
Все индустрии	34	30	18	18	23	25	20	39
Юридические консультации	32	37	11	12	22	23	26	46
Торговля	33	36	19	20	11	32	19	25
Финансовые сервисы	24	22	24	20	30	30	19	47
Здравоохранение	32	18	5	5	12	16	13	16
Технологии	37	45	24	29	29	34	23	48

До недавнего времени в области искусственного интеллекта доминировали традиционные подходы. Однако последние достижения в области обработки данных и вычислительных мощностей значительно ускорили разработку и внедрение генеративного ИИ. Сегодня классические ИИ-решения пользуются большим спросом на финансовых рынках и были усовершенствованы до такой степени, что в некоторых случаях могут работать автономно, без вмешательства человека [2]. В результате компании все чаще интегрируют ИИ в свою деятельность и искусственный интеллект становится все более распространенной технологией, способной произвести революцию в финансовых организациях.

Одним из наиболее важных применений ИИ в финансах является кредитный скоринг. Системы кредитного скоринга, управляемые ИИ, позволяют финансовым учреждениям точно оценивать риски и потребности клиентов, предоставляя мгновенные результаты благодаря анализу данных [2]. Эти системы могут работать полностью автономно. Это дополняет традиционные методы оценки кредитоспособности клиента, такие как анализ счетов за различные услуги. Благодаря включению в модель кредитного скоринга новых переменных, полученных на основе информации о счетах за различные услуги, становится возможной более точная оценка клиентов с ограниченной кредитной историей, что делает работу более удобной [8]. Это позволяет клиентам получать доступ к персонализированным продуктам и услугам, адаптированным к их конкретным потребностям [1].

Широкое внедрение искусственного интеллекта можно рассматривать как дополнительное средство повышения эффективности финансовых учреждений. ИИ используется не только крупными организациями, но и частными лицами и инвесторами. Эта технология предоставляет рекомендации по диверсификации портфеля и распределению активов, помогая

инвесторам экономить время на принятии инвестиционных решений с помощью инструментов, управляемых ИИ, которые автоматически совершают сделки. Число компаний, использующих ИИ, неуклонно растет [3]. Некоторые хедж-фонды даже полностью перешли на управление с использованием нейросетевых планировщиков. Искусственный интеллект анализирует новости, экономические события и принимает инвестиционные решения на основе всей полученной информации. Он работает на основе алгоритмов, которые обрабатывают огромные объемы данных и принимают решения с использованием математических моделей и аналитических методов. Эти данные включают финансовые отчеты, новостные статьи, информацию из социальных сетей, графики цен и другие источники [4]. Они могут помочь в выявлении тенденций и прогнозировании будущих изменений на рынке.

В качестве основных преимуществ использования искусственного интеллекта для инвестора можно выделить [5]:

- прогнозирование потребительского поведения и рыночных тенденций на основе анализа исторических данных;
- создание прогнозов в реальном времени, основываясь на анализе изменений цен, валютных курсов, мировых индексов, сырьевых товаров и других ключевых индикаторов;
- выявление аномальных событий и рыночных спадов;
- снижение операционных рисков для инвесторов;
- увеличение скорости и объема торговых операций;
- генерация собственных данных с использованием методов машинного обучения;
- разработка торговых стратегий на основе проведенного анализа.

Искусственный интеллект учитывает уникальные характеристики каждого инвестора при предоставлении индивидуальных инвестиционных рекомендаций. Это включает в себя инвестиционные цели, горизонты, доходы и расходы [10]. Цифровые консультанты на базе искусственного интеллекта используют эту информацию, чтобы рекомендовать акции, взаимные фонды или облигации, которые наиболее подходят для конкретных потребностей каждого инвестора. Алгоритмы искусственного интеллекта могут анализировать рыночные тенденции быстрее и точнее, чем традиционные методы, что позволяет получать более точные прогнозы о потенциальной доходности различных вариантов инвестирования. Это позволяет быстро получать дополнительные мнения о формировании портфеля и решениях о



перебалансировке, а также технический и фундаментальный анализ инвестиционных возможностей [3]. Искусственный интеллект также может автоматизировать различные процессы, извлекая финансовую информацию из отчетов и создавая регрессионные модели для анализа экономических показателей на макро- и микроуровне. Это помогает получить более полное представление об инвестиционном ландшафте и позволяет принимать обоснованные решения на основе анализа данных [7].

Сложные алгоритмы искусственного интеллекта могут учитывать изменения весовых коэффициентов и влияние различных факторов на разных этапах анализа. Однако эти алгоритмы могут допускать ошибки при прогнозировании неожиданных событий. Большинство роботов-советников используют простые алгоритмы, основанные на правилах, хотя некоторые начинают внедрять алгоритмы прогнозирования. Использование искусственного интеллекта не исключает возможности вмешательства человека, так как система может переключаться в ручной режим в периоды повышенной волатильности или объема транзакций, в зависимости от заранее заданных параметров.

Существует несколько наиболее распространённых нейросетей для анализа финансовых данных [1]:

Trade Ideas — это торговая платформа, которая использует искусственный интеллект, инструменты моделирования и другие функции, помогающие пользователям разобраться в торговле на фондовом рынке и инвестициях. Начинающие трейдеры могут воспользоваться преимуществами Holly AI, программного обеспечения, которое снижает риски и предлагает брокерские счета с нулевой комиссией, называемые "Brokerage Plus".

TrendSpider — это инструмент технического анализа, который автоматически генерирует индивидуальные торговые алгоритмы с использованием передовых методов машинного обучения. Нет ограничений на количество рынков или инструментов безопасности, которыми можно торговать с помощью этого инструмента. Его искусственный интеллект упрощает поиск оптимальных торговых настроек. С помощью этого программного обеспечения пользователи могут точно определять, когда следует совершать транзакции, основываясь на производительности системы или рыночных показателях.

SignalY — это бот для торговли криптовалютами, который упрощает процесс покупки и продажи цифровых активов. Платформа имеет простой и удобный интерфейс с прямой интеграцией с несколькими блокчейн-

сетями. Пользователи могут следить за профессиональными трейдерами и совершать сделки на выбранных биржах, отслеживая их эффективность в одном месте. Бот поддерживает целый ряд торговых стратегий, включая базовые и продвинутые методы, такие как фиксация прибыли, трейлинг-стопы, стоп-лоссы, фильтры объема и отклонения цен. Он также поддерживает усреднение затрат, что помогает управлять рисками и оптимизировать доходность.

### **Выводы**

Современные технологии, основанные на искусственном интеллекте, продемонстрировали эффективность в различных областях, включая инвестиции. ИИ может значительно улучшить принятие инвестиционных решений, особенно в сегодняшней высококонкурентной среде, где трейдеры и аналитики сталкиваются с растущей конкуренцией со стороны автоматизированных систем, способных быстро анализировать большие объемы данных и принимать решения [3][4]. Использование ИИ становится все более значимым. В области искусственного интеллекта наблюдается рост числа хедж-фондов, которые используют нейросетевой подход для анализа новостей, экономических событий и принятия инвестиционных решений. Такой подход позволяет этим фондам превосходить традиционные инвестиционные стратегии, делая более осознанный выбор на основе данных.

Аналитики хедж-фондов уделяют значительное время сбору и анализу исторической информации с целью разработки алгоритмов. Однако они сталкиваются с растущей конкуренцией со стороны систем искусственного интеллекта, которые работают быстрее и постоянно совершенствуются. Эти системы искусственного интеллекта могут обрабатывать огромные объемы информации за короткий промежуток времени, предоставляя управляющим хедж-фондами более точную информацию о тенденциях рынка и инвестиционных возможностях [6]. Кроме того, системы искусственного интеллекта помогают снизить влияние эмоций человека на процесс принятия решений, тем самым повышая общую эффективность инвестиционных стратегий. Использование ИИ в инвестиционной деятельности может свести к минимуму негативное влияние эмоций, таких как страх и жадность, на эффективность инвестиционного портфеля [6]. Поскольку технология искусственного интеллекта продолжает развиваться, вполне вероятно, что ее внедрение в финансовом секторе сыграет значительную роль в поддержании доверия инвесторов и финансовой стабильности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бахтияров Р.Р.* Возможности искусственного интеллекта для анализа рынка ценных бумаг // Вестник науки №5 (74) том 1. С. 496 - 500. 2024 г.
2. *Кашеварова Н.А., Панова Д.А.* Анализ современной практики применения технологии искусственного интеллекта в финансовой сфере и его влияния на трансформацию финансовой экосистемы / Креативная экономика.
3. Основные направления развития финансового рынка Российской Федерации на 2023 год и период 2024 и 2025 годов / Банк России.
4. *Федорова И. А., Орунов А. Б.* «Искусственный интеллект в финансовой сфере: современная практика регулирования». С. 26 - 31.
5. *Антонова Д. В., Вымятина Ю. В.* «Развитие финансовой составляющей экосистем с учётом финансовой инфраструктуры страны» С. 58 - 62.
6. Ассоциация ФинТех (23.08.2023). Искусственный интеллект – основа для создания финансовых услуг нового поколения
7. *Аламир Х.С., Заргарян Е.В.* Адаптивные системы управления движением// В сборнике: ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ (ИТСАУ-2021). сборник трудов XIX Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Ростов-на-Дону - Таганрог, 2021. С. 344-347.
8. *Ауси Р.М., Заргарян Е.В.* Цифровая информационная безопасность и способы её защиты в свете действующего законодательства// В книге: Инженерно-техническое образование и наука. Сборник трудов второй международной научно-практической конференции. Под общей редакцией И.В. Чистякова. Новороссийск, 2022. С. 54.
9. *Заргарян Е.В., Филонова Е.С.* Эффекты применения технологий ПОТ в системах интеллектуального управления освещением на производстве// В сборнике: Прикладные вопросы точных наук. Материалы VII Международной научно – практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей. 2023. С. 121 – 124.
10. *Ганцевский А.В., Заргарян Е.В.* Анализ существующих методов оптической сепарации ТБО/ Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. Т.3. №2 (10). С. 188-191.

**Максимова София Михайловна**, студентка Политехнического института (филиал) ДГТУ в г. Таганроге, Россия, город Таганрог, улица Петровская 109а, 347904, телефон: +7 (928) 778-71-94, email: [sofiamaximova.2003@mail.ru](mailto:sofiamaximova.2003@mail.ru).

**Maximova Sofia Mikhailovna**, student of the Polytechnic Institute (branch) of DSTU in Taganrog, Russia, Taganrog, Petrovskaya street 109a, 347904, phone: +7 (928) 778-71-94, email: [sofiamaximova.2003@mail.ru](mailto:sofiamaximova.2003@mail.ru).

УДК 621.396

Федосов Валентин Петрович, Циркуленко Артемий Викторович

**ЦИФРОВОЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ В  
УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО КАНАЛА СВЯЗИ СИСТЕМЫ  
MIMO-OFDM НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

*Рассмотрен алгоритм обработки пространственно-временных сигналов в условиях сложного канала связи системы MIMO-OFDM на основе нейронной сети. С ростом и развитием сетей передачи данных возрастают как количество пользователей (приемников), так и число базовых станций (передатчиков), что ведет к тому, что происходит сильное усложнение условий для передачи и приема сигналов, а формируемые каналные матрицы с ростом числа антенн также увеличиваются в размерах, что ведет к ужесточению требований касаясь вычислительной сложности алгоритма обработки и приема сигналов. Один из способов решить эту проблему – увеличение скорости работы алгоритмов обработки при том же или даже лучшем качестве работы. В последние годы активно развиваются различные алгоритмы, основанные на нейронных сетях, и их применение в тех или иных областях науки и техники показывает отличные результаты с меньшей вычислительной сложностью и более высокой точностью.*

*В настоящей работе предложены различные модификации алгоритма на основе нейронной сети, увеличивающие его точность, проведено сравнение работы алгоритма и его модификаций с различными классическими методами. Показано, что предложенные модификации увеличивают точность алгоритма.*

*MIMO-OFDM, цифровой алгоритм, нейронная сеть, сложный канал связи, частота ошибки битов, пространственно-временной сигнал, приемник.*

Fedosov Valentin Petrovich, Tsirkulenko Artemy Viktorovich

## **DIGITAL ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIO-TEMPORAL SIGNALS IN CONDITIONS OF A COMPLEX COMMUNICATION CHANNEL OF THE MIMO-OFDM SYSTEM BASED ON A NEURAL NETWORK**

*An algorithm for processing spatio-temporal signals under conditions of a complex communication channel of the MIMO-OFDM system based on a neural network is considered. With the growth and development of data transmission networks, both the number of users (receivers) and the number of base stations (transmitters) increase, which leads to the fact that the conditions for transmitting and receiving signals become very complicated, and the formed channel matrices also increase with the increase in the number of antennas in size, which leads to stricter requirements regarding the computational complexity of the algorithm for processing and receiving signals. One way to solve this problem is to increase the speed of processing algorithms with the same or even better quality of work. In recent years, various algorithms based on neural networks have been actively developed, and their application in various fields of science and technology shows excellent results with less computational complexity and higher accuracy.*

*This paper proposes various modifications of the algorithm based on a neural network, increasing its accuracy, and compares the operation of the algorithm and its modifications with various classical methods. It is shown that the proposed modifications increase the accuracy of the algorithm.*

*MIMO-OFDM, digital algorithm, neural network, complex communication channel, bit error rate, space-time signal, receiver*

### **Введение**

На текущий момент в радиотехнике существует множество различных алгоритмов обработки и приема сигналов, при этом с ростом количества базовых и мобильных станций возникают новые вызовы, связанные с созданием новых программных алгоритмов с меньшей вычислительной сложностью и хорошим выигрышем даже в условиях применения в каналах со сложными условиями (например, в плотной городской застройке). Классические алгоритмы приема сигналов в ММО имеют как достоинства, так и различные недостатки [1, 2, 3]. Среди классических алгоритмов особый интерес представляют адаптивные алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов [4, 5] и иные

алгоритмы, предложенные исследователями ММО-OFDM систем (в частности, в зарубежных исследованиях).

При этом главные недостатки некоторых из этих алгоритмов – это высокая вычислительная сложность и недостаточная точность при их применении в сложных высокореллированных (по времени и частоте) каналах связи.

### Постановка задачи

Математическая модель сигнала, улавливаемого приемником, может быть сформулирована следующим образом:

$$y = Hx + n, \quad (1.1)$$

где  $y$  – вектор принимаемого сигнала размером  $N_r$ ,  $H$  – матрица канала размером  $N_t \times N_r$ ,  $x$  – передаваемый передатчиком сигнал размера  $N_t$ ,  $n$  – аддитивный квазибелый (полоса шума шире полосы приемника) гауссов шум размера  $N_r$  с некоторой заданной дисперсией  $\sigma^2$ .

Цель приемника – найти такую оценку  $\check{x}$  передаваемого вектора  $x$ , которая минимизировала бы следующее соотношение:

$$\check{x} = \arg \min \|y - Hx\|_2, \quad (1.2)$$

### Описание базового алгоритма на основе нейронной сети

Для независимых и одинаково распределенных канальных матриц предлагается следующая структура одного слоя нейронной сети MMNet:

$$z_t = \check{x}_t + \theta_t^{(1)} H^H (y - H\check{x}_t), \quad (1.3)$$

$$\check{x}_{t+1} = \eta(z_t, \sigma_t^2). \quad (1.4)$$

То есть сигнал последовательно проходит сквозь линейный и нелинейный обучаемые компоненты. Причем для нелинейного компонента дисперсия входного шума оценивается как:

$$\sigma_t^2 = \frac{\theta_t^{(2)}}{N_t} \left( \frac{\|I - A_t H\|_F^2}{\|H\|_F^2} \left[ \|y - H\check{x}_t\|_2^2 - N_r \sigma^2 \right] + \frac{\|A_t\|_F^2}{\|H\|_F^2} \sigma^2 \right), \quad (1.5)$$

Нейронная сеть MMNet собирается из нескольких слоев  $T$ . В качестве метрики средним значением для всех слоев является метрика в пространстве  $L_2$  – потеря при обучении модели:

$$L = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \|\check{x}_t - x\|_2^2. \quad (1.9)$$

### Описание модификаций и экспериментальных исследований

Ниже представлена архитектура MMNet-2.

В ходе экспериментов было решено немного модифицировать формулу для нелинейного компонента следующим образом:

$$\check{x}_{t+1} = \theta_t^{(3)} [\eta(z_t, \sigma_t^2) + \theta_t^{(4)}], \quad (1.10)$$

Следующим пунктом улучшения являются начальные приближения. В качестве модификации была предложена формула Ксавье [6] для начальных приближений, в которой они распределены по равномерному закону.

Другая гипотеза заключалась в том, что использование множественного оценщика на выводе может дать некоторый выигрыш за счет уменьшения дисперсии погрешности.

При проведении экспериментов были заданы параметры канала связи и нейронной сети соответственно в табл. 1 и 2.

Таблица 1.

Параметры нейронной сети

Общее число слоев	10
Общее число эпох для обучения по времени	1000
Общее число эпох для обучения по частоте	9
Число образцов в пакете при обучении	500
Чувствительность оптимизатора	0.001
Вид оптимизатора	Адам
Число обучаемых точек ОСШ	4

Таблица 2.

Параметры системы связи

Вид модуляции	QAM-4
Число антенн передатчика	16
Число антенн приемника	64
Число символов во временной области	4
Число поднесущих в частотной области	48

На рис. 1 показаны результаты моделирования и усреднения алгоритмов на основе нейронной сети MMNet и ее модификаций по каналу связи с нормальным числом обусловленности, созданного с помощью симулятора QuaDRiGa. Использовалась реализация канала BERLIN\_UMa\_LOS\_seed22 [7]. Эта 3D модель канала была получена в результате измерений в Берлине (Германия) параметров наземных городских ячеек большого размера (до нескольких километров). Компонента прямой видимости присутствует.

При этом было проведено сравнение с такими алгоритмами, как QRD SIC [8], QRD+K-best-8 [9], MMSE, cLLL [10]+MMSE, cLLL+QRD. Кодирование не применяется. Под MMNet-2 понимается модификация MMNet со всеми изменениями, кроме множественной оценки, а в MMNet-2-10 используется усреднение по 10 оценщикам.

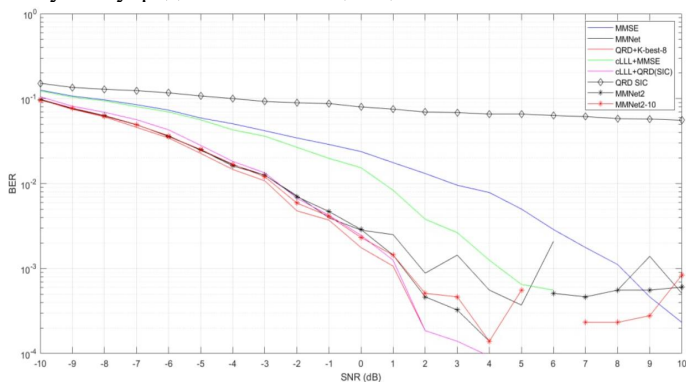


Рис. 1. Кривые BER для различных типов алгоритмов (QAM-4)

## Выводы

Результаты моделирования показывают, что использование нейронных сетей в качестве основы для алгоритма приема сигналов способно обеспечивать достаточно низкую вероятность ошибки битов даже в условиях работы в реальном многопутном канале связи, при этом, внесение дополнительных модификаций способно еще сильнее улучшить эти результаты.

Среди существующих недостатков алгоритма следует выделить ограничение по минимальной частоте ошибок битов при высоких отношениях сигнал/шум. Этот вопрос планируется проработать в дальнейших исследованиях.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Emanuele Viterbo and Joseph Boutros*. A universal lattice code decoder for fading channels. *IEEE Transactions on Information theory*, 45(5):1639–1642, 1999.
2. *Shaoshi Yang and Lajos Hanzo*. Fifty years of MIMO detection: The road to large-scale MIMOs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):1941–1988, 2015.
3. *Erik G Larsson*. MIMO detection methods: How they work. *IEEE signal processing magazine*, 26(3), 2009
4. *Федосов В.П., Ломакина А.В.* Алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов. Учебное пособие. - Таганрог: Издательство ЮФУ, 2015. - 73 с.
5. *Легин А.А.* Адаптивный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов для цифровой линии связи в среде с переотражениями – диссертация, 2019. - 167 с.
6. *Glorot, X., & Bengio, Y.* (2010). Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (Vol. 9, pp. 249-256)*.
7. *Jaeckel, S.* (2017). Quasi-deterministic channel modeling and experimental validation in cooperative and massive MIMO deployment topologies [Doctoral dissertation, Technische Universität Ilmenau]. *Digitale Bibliothek Thüringen*.
8. *Mao, Hongliang & Feng, Wei & Pei, Yukui & Ge, Ning.* (2013). SIC based soft QRD detection for coded single carrier block transmission with unique word. *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*. 4348-4352. 10.1109/GLOCOM.2013.6831757.
9. *Guo, Zhan & Nilsson, Peter.* (2006). Algorithm and implementation of the K-best Sphere decoding for MIMO detection. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*. 24. 491 - 503. 10.1109/JSAC.2005.862402.
10. *Gan, Ying & Ling, Cong & Mow, Wai Ho.* (2009). Complex Lattice Reduction Algorithm for Low-Complexity MIMO Detection. *Signal Processing, IEEE Transactions on*. 57. 2701 - 2710. 10.1109/TSP.2009.2016267.

Понимаш Захар Алексеевич

## **НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ИЗ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ТРАНСФОРМЕР**

*В этом докладе представлен нейросетевой алгоритм для автоматического извлечения признаков из цифровых сигналов, основанный на модифицированной архитектуре трансформера. Основное отличие предложенной модели от классической архитектуры трансформера заключается в добавлении нелинейного слоя после модуля самовнимания, что позволяет улучшить выявление сложных зависимостей в данных. Признаки формируются на скрытом слое во время одновременного решения задач классификации, прогнозирования и фильтрации. Описаны структура и работа модифицированного блока трансформера.*

*Трансформеры, нелинейный слой, цифровая обработка сигналов, нелинейный слой.*

Ponimash Zakhar Alekseevich

## **NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR AUTOMATIC FEATURE EXTRACTION FROM DIGITAL SIGNALS BASED ON TRANSFORMER NEURAL NETWORKS**

*This paper presents a neural network algorithm for automatic feature extraction of digital signals based on a modified transformer architecture. The main difference between the proposed model and the classical transformer structure is the addition of a linear layer after the self-attention module, which makes it possible to improve the identification of complex dependencies in the data. Features are gradually hidden while simultaneously solving classification, prediction and filtering problems. The structure and operation of the modified transformer block are described.*

*Transformers, nonlinear layer, digital signal processing, nonlinear layer.*

### **Введение**

В последние годы использование нейросетевых моделей для анализа и обработки цифровых сигналов стало одним из ключевых направлений в области машинного обучения [1-9]. Традиционные методы извлечения признаков, основанные на ручной настройке и эвристических подходах, постепенно уступают место автоматическим системам. Нейросетевые алгоритмы используются в задачах анализа медицинских сигналов [1-3], задачи

демодуляции модулированного сигнала [4], так же в прочих областях среди которых, распознавание речи [5], определение диктора [6]. Одним из наиболее перспективных подходов в этой области являются трансформеры — нейросетевые архитектуры, которые по ряду характеристик превосходят сверточные и рекуррентные нейронные сети, и используются для обработки как текста, так и цифровых сигналов [9, 10], кроме того, они нашли применения и во многих других задачах.

Мой доклад посвящен разработке и исследованию модифицированной архитектуры трансформера для автоматического извлечения признаков из цифровых сигналов. В процессе работы была внедрена новая структура трансформера, включающая модифицированный блок трансформера, в котором после модуля самовнимания добавлен нелинейный слой. Это нововведение позволило улучшить способность модели к выявлению сложных и нелинейных зависимостей в данных.

В докладе рассмотрен принцип работы предлагаемой архитектуры, описан модифицированный блок трансформера и нелинейный слой.

### **Основная часть**

Основная идея данного подхода заключается в применении подхода для извлечения признаков из цифровых сигналов, аналогичного тому подходу который сейчас применяется сейчас в нейронных сетях для генерации текста, таких как GPT3.5, gpt 4, mistral[10] и т.п.. Т.е. решать задачу прогнозирования временного ряда, в данной работе происходит прогнозирования в двух временных точках,  $k$  и  $k+n$ , где  $k \geq 0, n > 0$ , кроме того, решается задача классификации сигналов. Классификация работает следующим образом, сигнал нарезается на блоки по 130 отсчетов, после чего вычисляется спектральная плотность мощности каждого блока и эти блоки кластеризуются при помощи алгоритма  $k$ -means. Далее берется вектор этого блока из слоя извлечения признаком и предсказывается метка класса.

Такой подход с двумя с ошибками получаемыми при решении 2-х задач прогнозирования, и одной задачи классификации приводит к тому, что на скрытом слое (с которого извлекаются признаки), агрегируется информация о сигнале, достаточная для решения всех 3х задач. В этой работе  $k = 0, n = 1$ .

На рис. 1 приведена архитектура нейросети для извлечения признаков. Сигнал поступает на модифицированный блок трансформера. В предлагаемой архитектуре трансформера после модуля самовнимания добавлен нелинейный слой. Эта модификация позволяет улучшить выявление сложных и нелинейных зависимостей в данных. Нелинейный слой состоит из двух

линейных слоев функций активации, которые улучшают способности к обучению и обобщению (рис. 3). Сам модифицированный блок трансформера изображен на рис. 2. После к выходу описанного выше блока применяется сигмоидальная вектор-функция, на которой и выделяются признаки, далее следуют системы прогнозирования и классификации.

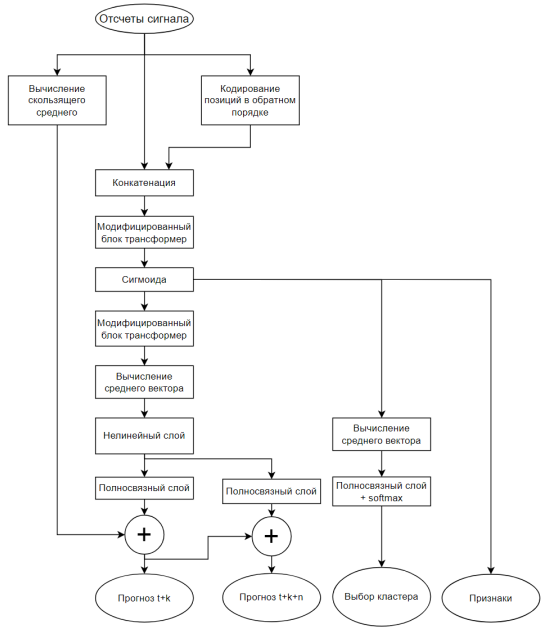


Рис. 1. Архитектура нейронной сети для извлечения признаков,  $k = 0$ ,  $n = 1$

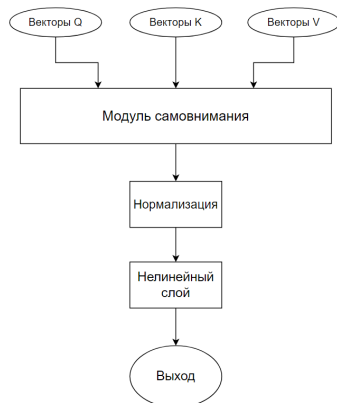


Рис. 2. Модифицированный блок трансформера, после модуля самовнимания добавлен нелинейный слой

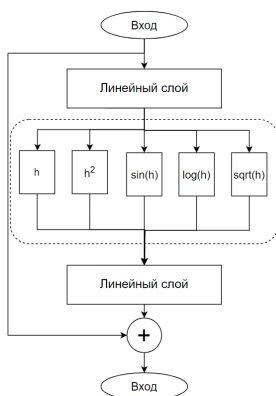


Рис. 3. Архитектура нелинейного слоя

Ниже показаны примеры решения задач прогнозирования и фильтрации сигнала. На рис. 4, показан пример фильтрации, средняя метрика R2 для задачи фильтрации между фильтрованным и сигналом без шума составила 0.81. А для задачи прогнозирования (рис. 5) – 0.78, f1 метрика для классификации составила 0.91.

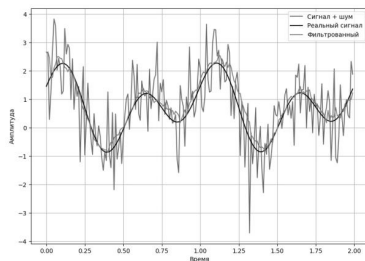


Рис. 4. Результат работы на задаче фильтрации

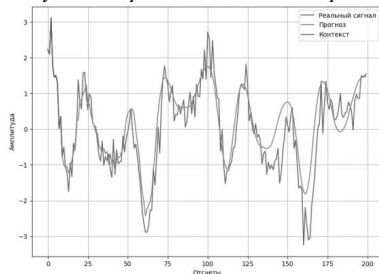


Рис. 5. Результат работы на задаче прогнозирования

## Выводы

В этой работе представлена модифицированная архитектура трансформера для автоматического извлечения признаков из цифровых сигналов. Добавление нелинейного слоя после модуля самовнимания позволяет улучшить способность модели к выявлению сложных зависимостей в данных. Экспериментальные результаты демонстрируют значительное повышение эффективности по сравнению с традиционными методами и стандартными архитектурами трансформеров. Извлеченные признаки с применением данного алгоритма могут использоваться в последствии для классификации сигналов, таких как ЭЭГ, ЭКГ, речь, данные сейсмографов и т.п., а также для предсказания параметров сигналов и систем, например для выбора начальных условий при моделировании отраженного сигнала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев Д.М., Шумилин А.С., Минюк А.Н., Понимаеш З.А.. Система автоматического поиска участков эпилептической активности в составе облачной платформы хранения, систематизации и обработки медицинских данных // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – Режим доступа:

- <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37371> (дата обращения: 31. 05. 2024)
2. *Алексеев Д.М., Шумилин А.С., Минюк А.Н., Понимаиш З.А.*. Ансамбль классификаторов: реализация, оценка эффективности и интеграция в облачную платформу хранения, систематизации и обработки медицинских данных // *Современные наукоемкие технологии.* – 2019. – № 9. С. 20-25.
  3. *Алексеев Д.М., Минюк А.Н., Понимаиш З.А., Шумилин А.С.* Разработка и описание структуры и функционала облачной платформы хранения, систематизации и обработки медицинских данных: интеграция системы автоматического поиска участков эпилептической активности// *Системы управления и информационные технологии*, №3(77), 2019. – С. 52-55.
  4. *Shilian Zheng, Xiaoyu Zhou, Shichuan Chen, Peihan Qi, and Xiaoni Yang*, "DemodNet: Learning Soft Demodulation from Hard Information Using Convolutional Neural Network". 2020.
  5. *S. A. Zahorian, A. M. Zimmer, and F. Meng*. Vowel Classification for Computer based Visual Feedback for Speech Training for the Hearing Impaired in ICSLP. 2002.
  6. *Понимаиш З.А.*. Разработка алгоритма классификации сигналов на основе нейронных сетей. 2018. — Режим доступа: <https://hub.lib.sfedu.ru/repository/material/800841304/> (дата обращения: 31. 05. 2024)
  7. *Fernandez, Santiago; Graves, Alex. Schmidhuber, Jürgen*. Sequence labelling in structured domains with hierarchical recurrent neural networks. Proceedings of IJCAI. 2007.
  8. *Turker I., Serkan K., Levent E., Askar M., Gabbouj M.*. Real-Time Motor Fault Detection by 1D Convolutional Neural Networks. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016
  9. *Yihong D., Ying P., Muqiao Y., Songtao L., Qingjiang S.*. Signal Transformer: Complex-valued Attention and Meta-Learning for Signal Recognition. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.04392>. 2021. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2106.04392> (дата обращения: 31. 05. 2024)
  10. Albert Q. Jiang, Alexandre Sablayrolles, Arthur Mensch, Chris Bamford, Devendra Singh Chaplot, Diego de las Casas, Florian Bressand, Gianna Lengyel, Guillaume Lample, Lucile Saulnier, Léo Renard Lavaud, Marie-Anne Lachaux, Pierre Stock, Teven Le Scao, Thibaut Lavril, Thomas Wang, Timothée Lacroix, William El Sayed // *Mistral 7B* // 10.10.23 // <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.06825>

**Понимаш Захар Алексеевич**, аспирант 3-го курса ИРТСУ ЮФУ, телефон: +7 (988) 546-47-39, email: [ponimashz@mail.ru](mailto:ponimashz@mail.ru).

**Ponimash Zakhar Alekseevich**, 3rd year graduate student at IRTSU SFU, phone: +7 (988) 546-47-39, email: [ponimashz@mail.ru](mailto:ponimashz@mail.ru).



УДК 621.391

Деркачев Владимир Александрович, Лысюк Юрий Алексеевич,  
Новодранова Любовь Владимировна, Селиванов Артем Владиславович

**БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ  
СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ  
РАДИОСИСТЕМЫ**

*В последнее время к изучению вопроса быстрого прототипирования систем связи наблюдается повышенный интерес, что связано со стремительным развитием беспроводной связи, применяемой в различных сферах деятельности. Применение в рамках прототипирования программно определяемых радиосистем (SDR) оправдано в виду возможности осуществления быстрой разработки цифровой обработки сигналов (ЦОС) с применением языков программирования высокого уровня, что в значительной степени ускоряет разработку системы и построение прототипов системы.*

*Беспроводная связь, программно определяемое радио, SDR, быстрое прототипирование.*

Derkachev Vladimir Aleksandrovich, Lysyuk Yuri Alekseevich,  
Novodranova Lyubov Vladimirovna, Selivanov Artem Vladislavovich

**RAPID PROTOTYPING OF A WIRELESS COMMUNICATION  
SYSTEM BASED ON A SOFTWARE DEFINED RADIO SYSTEM**

*Recently, there has been increased interest in studying the issue of rapid prototyping of communication systems, which is associated with the rapid development of wireless communications used in various fields of activity. The use of software-defined radio systems (SDR) as part of prototyping is justified due to the possibility of rapid development of digital signal processing (DSP) using high-level programming languages, which significantly speeds up the development of the system and the construction of system prototypes.*

*Wireless connection, software defined radio, SDR, rapid prototyping.*

**Введение**

Появление программно-определяемых радиостанций, несомненно, сильно повлияло на возможности проектирования новых систем связи.

Применяя принципы систем SDR имеется возможность разработки реконфигурируемых систем с широким спектром возможностей. Совместное применение SDR платы и программной платформы с открытым исходным кодом GNU Radio [1] позволяет осуществить тестирование и создавать прототипы приемных и передающих блоков радиостанций. Применяя гибкий подход к проектированию с применением графического интерфейса разработки (с возможностью самостоятельно дополнить библиотеки дополнительными модулями) возможно обеспечить быстрый переход от моделирования к развертыванию полноценной радиостанции [2].

Рис. 1,а) иллюстрирует контраст между традиционными радиостанциями, в которых демодуляция является аппаратно определяемой операцией, выполняемой внутри аналогового приемника, и программно определяемой радиосвязью, в которой все операции демодуляции определяются программно и, следовательно, перепрограммируются. Как показано на рисунке 1б, после некоторой минимальной аналоговой обработки и настройки SDR использует методы ЦОС для интерпретации входящих сигналов или, в случае передачи, для генерации исходящих сигналов. Это позволяет одному и тому же физическому оборудованию работать практически с любым типом сигнала и потенциально имеет множество практических применений [3,4].

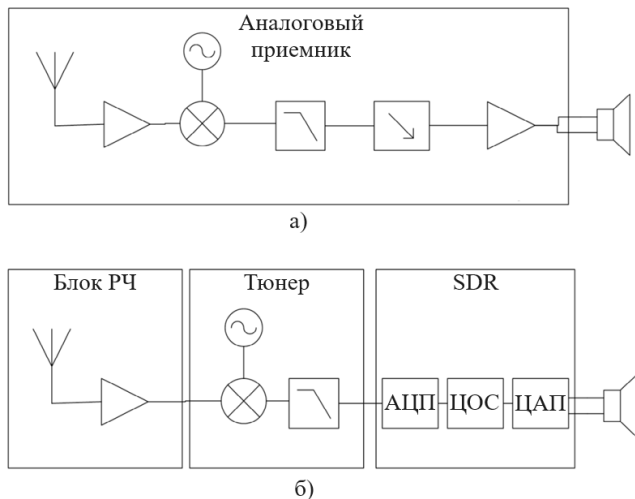


Рис. 1. Сравнение аналоговых и SDR приемников

## **Программное обеспечение**

Для управления платой SDR, получения и передачи данных с ее помощью применяется программное обеспечение известное как GNU Radio. GNU Radio — это программное обеспечение, которое работает на главном компьютере. Данная программа предоставляет пользователю инструменты и блоки для создания радиоприемников или передатчиков, а также для обработки радиосигналов

Пакет программного обеспечения состоит из набора компонентов, одним из которых является встроенное ПО, которое загружается в SDR плату при инициализации устройства во время выполнения. Прошивка, поставляемая с GNU Radio, предназначена для обеспечения эффективной связи с платой через USB. Именно внутри главного компьютера, на котором работает GNU Radio, основные компоненты цифровой обработки сигналов (ЦОС) применяются к сигналу.

В GNU Radio существует две основные абстракции. Блоки кода низкого уровня для повышения эффективности написаны на C++ и состоят из небольших компонентов обработки сигналов. Именно здесь разработчик может реализовать код для демодуляции входящего радиосигнала, реструктуризации информации в пакеты или выполнения фильтрации сигнала в частотной области. Код высокого уровня написан на Python и в основном подразумевает соединения различных блоков обработки сигналов вместе в ориентированный граф. Поскольку Python является интерпретируемым языком, он не требует дополнительного времени компиляции во время разработки или тестирования, и это может быть использовано разработчиком для быстрого развертывания приложений. В приложении к SDR радиостанциям блоки ЦОС в GNU Radio можно рассматривать как относящиеся к одной из трех категорий: Источники — это блоки, имеющие исходящие сигналы и не имеющие входов. Приемники — это блоки, которые допускают один или несколько входов, но не имеют выходов. Фильтры — это промежуточные блоки, которые допускают один или несколько входящих сигналов и один или несколько исходящих сигналов [5].

### **Прототипирование передатчика**

Первым этапом прототипирования является передача сигнала с модуляцией BPSK. Для этого генерируется поток битов и модулируется с применением блока модулятора Constellation. На рис. 2 показана блок схема тестируемого передатчика. На рис. 3 показаны временная диаграмма, сигнальное созвездие и спектр сигнала передатчика.

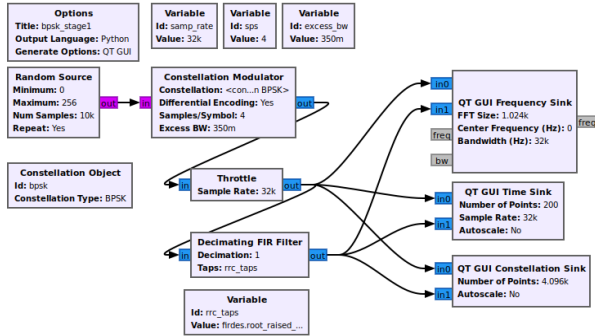


Рис. 2. Схема передатчика

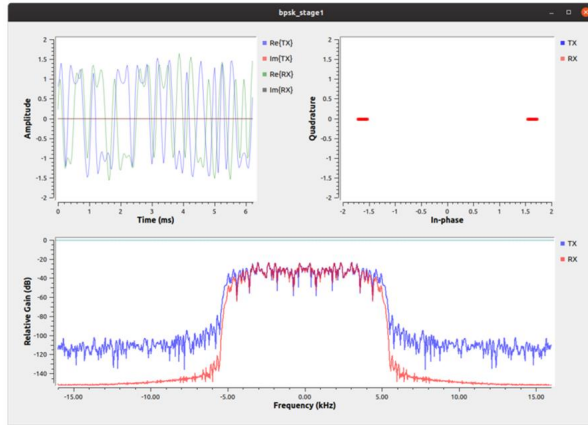


Рис. 3. Временная диаграмма, сигнальное созвездие и спектр сигнала с передатчика

## Прототипирование приемника

Далее на рис. 4 показана схема приемника/передатчика. Дополнительно добавлены блоки Polyphase Clock Sync (блок временной синхронизации), Costas Loop (блок фазовой автоподстройки частоты – ФАПЧ), Constellation Decoder (демодулятор), Differential Decoder (дифференциальный декодер).

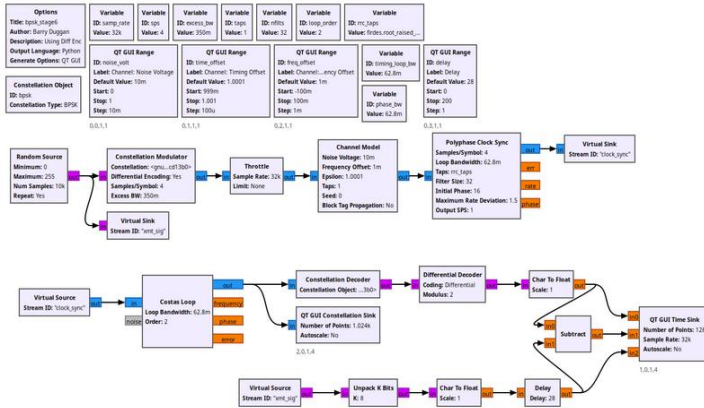


Рис. 4. Схема приемника/передатчика

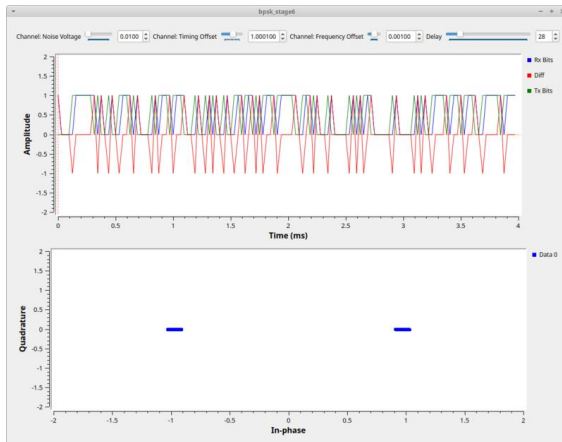


Рис. 5. Временная диаграмма, сигнальное созвездие и спектр сигнала на выходе приемника

## Выводы

Показанный пример демонстрирует возможности быстрого прототипирования с применением программной платформы GNU Radio. Показанная модель позволяет осуществить первоначальное моделирование без использования внешних устройств, таких как SDR платы. При подключении SDR плат возможно осуществлять натурные эксперименты, а если добавить малошумящий усилитель (МШУ) и подходящей антенны возможно

проведение полевых испытаний моделей. Однако, разработка конечных устройств требует перехода на C++ или CUDA (в зависимости от архитектуры вычислителя, используемого для ЦОС).

**Научные исследования выполнены в рамках студенческого проекта "Разработка макета системы связи программно определяемой радиосистемы" Передовой инженерной школы "Инженерия киберплатформ" ЮФУ.**

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. GNU Radio [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL.: <https://www.gnuradio.org>, свободный – (дата обращения 15.05.2024)
2. *Tucker D. C., Tagliarini G. A.* Prototyping with gnu radio and the usrp-where to begin //IEEE Southeastcon 2009. – IEEE, 2009. – С. 50-54.
3. *Molla D. M. et al.* Software defined radio platforms for wireless technologies //IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 26203-26229.
4. *Xu Y. et al.* Software defined radio-based wireless sensing system //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 17. – С. 6455.
5. *Gummineni M., Polipalli T. R.* Implementation of reconfigurable transceiver using GNU Radio and HackRF One //Wireless Personal Communications. – 2020. – Т. 112. – №. 2. – С. 889-905.

**Деркачев Владимир Александрович**, старший преподаватель, кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем ИРТСУ, Южный Федеральный Университет, Россия, город Таганрог, Некрасовский пер, 44, 347922, телефон: +79614154733, email: [vderkachev@sfedu.ru](mailto:vderkachev@sfedu.ru).

**Лысюк Юрий Алексеевич**, студент, кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем ИРТСУ, Южный Федеральный Университет, Россия, город Таганрог, Некрасовский пер, 44, 347922, телефон: +79198809170, email: [ilysiuk@sfedu.ru](mailto:ilysiuk@sfedu.ru).

**Новодранова Любовь Владимировна**, студент, кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем ИРТСУ, Южный Федеральный Университет, Россия, город Таганрог, Некрасовский пер, 44, 347922, телефон: +79654602806, email: [imaslova@sfedu.ru](mailto:imaslova@sfedu.ru).

**Селиванов Артем Владиславович**, студент, кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем ИРТСУ, Южный Федеральный Университет, Россия,

город Таганрог, Некрасовский пер, 44, 347922, телефон: +79518403289, email: [seli@sfedu.ru](mailto:seli@sfedu.ru) .

**Derkachev Vladimir Alexandrovich**, Senior Lecturer, Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems, IRTSU, Southern Federal University, Russia, Taganrog, Nekrasovsky Lane, 44, 347922, phone: +79614154733, email: [vderkachev@sfedu.ru](mailto:vderkachev@sfedu.ru) .

**Alekseevich Lysyuk Yuri**, student, Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems and DCS, Southern Federal University, Russia, Taganrog, Nekrasovsky Lane, 44, 347922, phone: +79198809170, email: [ilysiuk@sfedu.ru](mailto:ilysiuk@sfedu.ru) .

**Novodranova Lyubov Vladimirovna**, student, Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems and DCS, Southern Federal University, Russia, Taganrog, Nekrasovsky Lane, 44, 347922, phone: +79654602806, email: [lnaslova@sfedu.ru](mailto:lnaslova@sfedu.ru) .

**Selivanov Artem Vladislavovich**, student, Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems and DCS, Southern Federal University, Russia, Taganrog, Nekrasovsky Lane, 44, 347922, phone: +79518403289, email: [seli@sfedu.ru](mailto:seli@sfedu.ru) .

УДК 621.371

Косак Роман Эдуардович

## **ВЛИЯНИЕ ВСТАВОК ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА КРОМКЕ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ВИВАЛЬДИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

*В статье рассмотрено улучшение характеристик излучения излучателя Вивальди благодаря использованию эллиптических вставок на его кромке. Показано влияние такой формы кромки на коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициент усиления (КУ) излучателя в составе бесконечной антенной решетки. Характеристики излучения получены в сверхширокой полосе (СШП) частот. В ходе исследования определено, что введение вставок эллиптической формы на кромках излучателя Вивальди шириной 2 мм и длиной 3 мм позволяет расширить рабочую полосу частот по уровню КСВН  $\leq 3$ , а также улучшить средний уровень согласования. При этом коэффициент перекрытия по уровню КСВН  $\leq 3$  возрастает с 2,943 до 3,401.*

*Излучатель Вивальди, КСВН, КУ, СШП, антенная решетка.*

## EFFECT OF ELLIPTICAL SHAPE INSERTS ON THE EDGE OF THE VIVALDI RADIATOR ON RADIATION CHARACTERISTICS

*The article presents the improvement of the radiation characteristics of the Vivaldi radiator due to the use of elliptical inserts on its edge. The influence of this edge shape on the voltage standing wave ratio (VSWR) and realized gain (RG) of the radiator as part of an infinite antenna array is shown. The radiation characteristics were obtained in an ultra-wide frequency band.*

*The research determined that the introduction of elliptical inserts on the edges of the Vivaldi radiator with a width of 2 mm and a length of 3 mm makes it possible to expand the operating frequency band in terms of  $VSWR \leq 3$ , as well as improve the average level of matching. At the same time, the overlap ratio at the level of  $VSWR \leq 3$  increases from 2.943 to 3.401.*

*Vivaldi radiator, VSWR, realized gain, ultra-wideband, antenna array.*

### **Введение**

На сегодняшний день существует много задач по разработке антенных решеток в различных сферах: радиоэлектронная борьба, радиолокация, управление летательными аппаратами. Важно, чтобы антенная решетка могла работать в широкой или даже сверхширокой полосе частот.

Антенная решетка состоит из излучателей, каждый из которых должен обладать малыми массо-габаритными параметрами и обеспечивать требуемые характеристики излучения в рабочей полосе частот. С этими задачами отлично справляются излучатели на основе антенны Вивальди [1].

Антиподный излучатель Вивальди представляет собой экспоненциально расширяющуюся щель, выполненную из металлических слоев, которые располагаются на разных сторонах диэлектрической подложки. Благодаря простой конструкции и возможности работы в сверхширокой полосе частот антенны и излучатели Вивальди применяются в радиоастрономии, ТВ-системах и системах мобильной спутниковой связи [2].

Важную роль играет форма излучателя Вивальди – именно она во многом определяет его характеристики излучения. Использование прямоугольных вырезов и вставок позволяет расширить рабочую полосу частот и улучшить согласование [3-4]. Введение синусоидального рифления кромки излучателя Вивальди позволяет увеличить коэффициент перекрытия [5].



Таким образом, изменение кромки главных лепестков излучателя Вивальди является довольно распространенным способом улучшения характеристик излучения. Целью данной работы являлось исследование влияния эллиптических вставок на кромке излучателя Вивальди на его КСВН и КУ.

## Основная часть

### 1. Излучатель Вивальди без эллиптических вставок

В работе за основу взят излучатель Вивальди без рифления из [5]. Размер ячейки решетки  $100 \text{ мм} \times 120 \text{ мм} \times 185 \text{ мм}$ . Подложка выполнена из материала RT/dugoid 5880, а питание производится с помощью коаксиального кабеля (рис. 1).

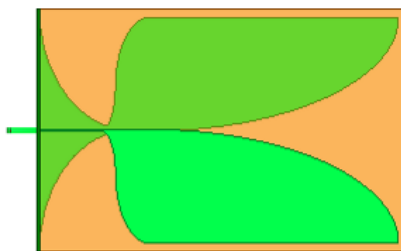


Рис. 1. Излучатель Вивальди без эллиптических вставок

Рассмотрим КСВН (рис. 2, а) и КУ (рисунки 2, б)) данного излучателя в диапазоне от 200 до 1000 МГц.

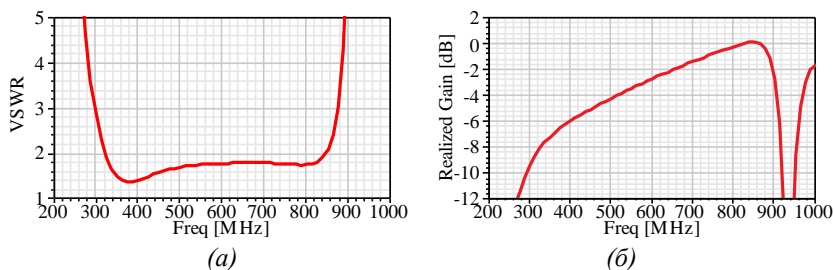


Рис. 2. КСВН а) и КУ б) излучателя Вивальди без эллиптических вставок

Согласно рис. 2, а), рабочая полоса частот излучателя Вивальди без эллиптических вставок находится в пределах от 297,2 до 874,7 МГц по уровню КСВН  $\leq 3$ . Коэффициент перекрытия (КП), определяемый как отношение

верхней граничной частоты к нижней, равен 2,943. Как видно из рис. 2, б), КУ в указанной полосе частот находится в пределах от -9,71 до 0,03 дБ.

## 2. Исследование влияния эллиптических вставок по краям излучателя

Конструкция излучателя с эллиптическими вставками представлена на рис. 3. Размер вставок 2 мм × 3 мм, а количество равно 35 с каждой стороны. Эллиптические вставки расположены с периодом 4 мм.

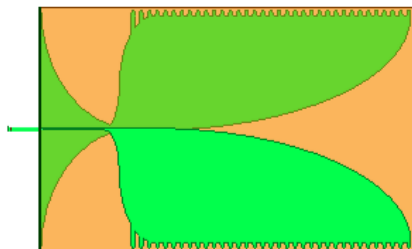


Рис. 3. Излучатель Вивальди с эллиптическими вставками размером 3 мм

В ходе работы определено, что введение эллиптических вставок шириной 1, 2 и 4 мм не приводит к значительному расширению рабочей полосы частот, однако снижает средний уровень КСВН. Рассмотрим результаты при ширине вставок 3 мм (рис. 4, а) и б)).

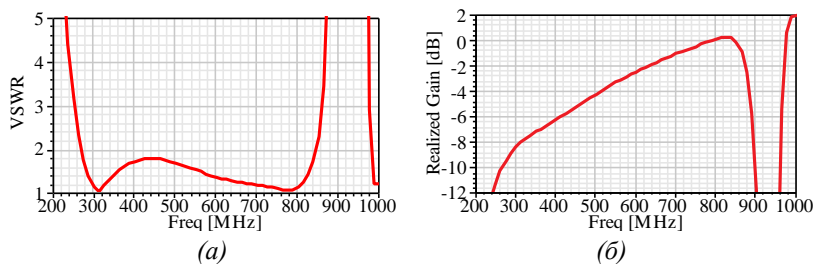


Рис. 4. КСВН а) и КУ б) излучателя Вивальди с эллиптическими вставками

Из рис. 4, а) можно определить, что рабочая полоса частот излучателя Вивальди без эллиптических вставок находится в пределах от 252,2 до 857,7 МГц по уровню КСВН  $\leq 3$  (КП равен 3,401). КУ в указанной полосе частот находится в пределах от -11,10 до 0,21 дБ, как видно из рисунка 4 (б).

Анализ проведенных исследований показывает, что рабочая полоса частот излучателя с эллиптическими вставками даже по уровню КСВН  $\leq 2$  оказывается шире и располагается в пределах от 269,9 до 843,5 МГц (КП = 3,125). При этом, если рассмотреть средний уровень КСВН в рабочей полосе частот, у излучателя с эллиптическими вставками он окажется ниже по сравнению с излучателем без вставок. Так, средний уровень КСВН СШП излучателя с эллиптическими вставками располагается ниже уровня КСВН = 1,6 практически во всей рабочей полосе частот.

Таким образом, излучатель Вивальди с эллиптическими вставками, как и излучатель без вставок, будет являться сверхширокополосным, однако его согласование будет лучше. КУ обоих излучателей в рабочей полосе частот изменяется слабо.

### **Выводы**

Использование эллиптических вставок размером 3 мм  $\times$  2 мм позволяет расширить рабочую полосу частот излучателя Вивальди. Так, КП по уровню КСВН  $\leq 3$  возрастает с 2,943 до 3,401. При этом, излучатель является сверхширокополосным как по уровню КСВН  $\leq 3$ , так и по уровню КСВН  $\leq 2$ , следовательно среднее значение согласования у излучателя со вставками лучше.

**Работа выполнена в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета в г. Таганрог.**

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *P. Gibson*, "The Vivaldi aerial," in *Proc. 9th Eur. Microw. Conf.*, vol. 1, 1979, pp. 101-105.
2. *Зырянов Ю. Т., Федюнин П. А., Белоусов О. А.* [и др.] *Антенны: учебное пособие для вузов* — 5-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 412 с.
3. *Kosak R. E. and Gevorkyan A. V.* "Research of Ways to Improve Radiation Characteristics of Phased Array Radiator Based on Vivaldi Antenna," 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2021, pp. 211-214.
4. *Косак Р. Э., Геворкян А. В., Юханов Ю. В.* Излучатель фазированной антенной решетки узкоугольного сканирования // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2022): Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным

участием имени профессора О.Н. Пьявченко в двух томах. Том 2. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. – с. 258-263.

5. *Косак Р. Э.* Влияние синусоидального рифления кромки излучателя Вивальди на характеристики излучения // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2023): Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко в двух томах. Том 2. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2023. – с. 124-129.

**Косак Роман Эдуардович**, аспирант, заведующий лабораторией кафедры АиРПУ ИРТСУ ЮФУ, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7 (8634) 37-17-33, email: [kosak@sfedu.ru](mailto:kosak@sfedu.ru).

**Kosak Roman Eduardovich**, postgraduate student, head of the laboratory of the Department of Antennas and Radiotransmitting Devices IRESC SFU, Russia, Taganrog, Nekrasovskiy lane, 44, 347922, phone: +7 (8634) 37-17-33, email: [kosak@sfedu.ru](mailto:kosak@sfedu.ru).

УДК 004.716

Жилин Сергей Викторович, Архипенко Владимир Владимирович,  
Басан Елена Сергеевна

## АДАПТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

*Целью исследования является разработка системы передачи данных для ячеистой сети на базе радиомодулей nRF24, функционирующей в диапазоне 2.4 ГГц, с адаптивным регулированием скорости передачи данных. Задачи включают выбор и настройку аппаратных компонентов (платформы Arduino и Raspberry Pi Pico), разработку программного обеспечения с использованием Arduino IDE и тестирование системы в различных условиях эксплуатации. Результаты показали, что адаптивное изменение скорости передачи данных и длины пакетов значительно улучшает производительность и устойчивость сети в условиях загруженного спектра. Радиомодули EBYTE E01-2G4M27D продемонстрировали высокую эффективность и стабильность. Таким образом, предложенная система является перспективным решением для создания надежных и экономически эффективных ячеистых сетей в области Интернета вещей, обеспечивая оптимальный баланс между производительностью и надежностью.*

*Адаптивное регулирование скорости передачи данных, ячеистая сеть, производительность сети, устойчивость сети, nRF24L01, EBYTE E01-2G4M27D, Arduino, Raspberry Pi Pico.*

Zhilin Sergey Viktorovich, Archipenko Vladimir Vladimirovich,  
Basan Elena Sergeevna

## **ADAPTIVE DATA RATE CONTROL**

*The aim of the research is to develop a data transmission system for a mesh network based on nRF24 radio modules, operating in the 2.4 GHz band, with adaptive data rate control. The tasks include selection and configuration of hardware components (Arduino and Raspberry Pi Pico platforms), software development using Arduino IDE and testing the system under different operating conditions. The results showed that adaptive variation of data rate and packet length significantly improves network performance and resilience in busy spectrum conditions. The EBYTE E01-2G4M27D radio modules demonstrated high efficiency and stability. Thus, the proposed system is a promising solution for building reliable and cost-effective mesh networks in the field of Internet of Things, providing an optimal balance between performance and reliability.*

*Adaptive data rate control, mesh network, network performance, network stability, nRF24L01, EBYTE E01-2G4M27D, Arduino, Raspberry Pi Pico.*

**Введение.** С развитием Интернета вещей (IoT) количество подключенных устройств увеличивается, создавая высокие требования к использованию частотного спектра. Поскольку произвольный выбор частот невозможен из-за жесткого регулирования и лицензирования [1], наиболее используемым безлицензионным диапазоном остается 2.4 ГГц. Диапазон занят множеством устройств, таких как Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee и другие [2], что приводит к увеличению загруженности и зашумленности спектра, снижая дальность работы, ухудшая качество связи и увеличивая вероятность коллизий.

Для минимизации этих негативных факторов и обеспечения надежной связи разрабатываются новые стандарты и технологии, способные эффективно работать в условиях высокой загруженности спектра. Одним из перспективных направлений является использование ячеистой сети, обеспечивающей высокую стабильность и качество работы при достаточном количестве узлов.

Для реализации данного решения используются популярные и доступные компоненты. В качестве микроконтроллера выбрана платформа Arduino, известная своей универсальностью и доступностью, что способствовало демократизации технологий [3] и позволило исследователям и энтузиастам экспериментировать в различных областях, включая связь [4]. В качестве радиомодуля выбраны nRF24L01 в диапазоне 2.4ГГц. Эти модули обеспечивают высокую пропускную способность, значительную дальность и множество настраиваемых режимов работы. Хотя в базовой комплектации они не поддерживают ячеистую сеть, их функционал можно расширить, что открывает новые возможности для создания сетевых решений.

Ячеистая сеть обладает рядом преимуществ, объединяя простые и доступные модули в сеть, что значительно повышает устойчивость и масштабируемость. В условиях перегруженности спектра использование динамических маршрутов передачи данных и адаптивных методов управления частотами улучшает производительность сети и снижает зашумленность.

#### **Описание экспериментальной установки и аппаратных средств.**

Для реализации установки использовались доступные и недорогие компоненты, что снизило затраты и упростило воспроизводимость эксперимента.

Изначально использовался МК Arduino Nano на базе Atmel MEGA328PB, однако его производительность и объем памяти оказались недостаточными для базовой ноды. Поэтому его заменили на более мощную платформу Raspberry Pi Pico с чипом RP2040, который обеспечил необходимую производительность и гибкость. Для дочерних нод производительности Arduino Nano достаточно.

Для беспроводной связи использовались радиомодули с усилителем мощности сигнала и низкошумящим усилителем: nRF24L01+PA+LNA и E01 2G4M27D от компании EBYTE. Все радиомодули подключались через SPI адаптер, обеспечивая надежное соединение и эффективную передачу данных.

Использовались стандартные антенны с усилением 2dBi и антенны компании EBYTE с усилением 3dBi, 4dBi и 5dBi для улучшения качества связи и дальности передачи данных. Это позволило провести сравнительный анализ эффективности различных антенн.

Для визуализации применялся OLED дисплей с разрешением 128x64 на базе контроллера SSD1306, обеспечивая удобный вывод информации. Полный лог данных передавался через COM-порт на ноутбук для анализа и хранения.

Эксперименты проводились в лаборатории и на открытой местности. В лаборатории тестировалась интерференция и стабильность связи, а на открытой местности оценивались дальность связи и адаптивность скорости передачи данных в условиях отсутствия значительных помех.

Этот подход обеспечил гибкость и надежность системы, позволив провести комплексное исследование возможностей сети на базе доступных компонентов.

**Принцип работы** системы передачи данных в ячеистой сети на базе радиомодулей nRF24 заключается в динамическом изменении скорости передачи и длины пакетов для максимальной надежности и эффективности связи. Система использует адаптивный алгоритм, учитывающий текущие условия сети и качество сигнала для оптимизации параметров передачи.

Инициализация соединения начинается с настройки радиомодулей на максимальную скорость передачи данных (по умолчанию 2 Mbps), канал связи и мощность сигнала. Если соединение не удается установить, алгоритм последовательно снижает скорость до 1 Mbps и далее до 250 kbps, увеличивая дальность и устойчивость связи. Если на минимальной скорости соединение не установлено, алгоритм начинает уменьшать длину пакетов с 32 байт до 16 и 8 байт. Этот процесс продолжается до успешного установления соединения или достижения минимально возможной длины пакета.

При успешном соединении алгоритм оценивает качество передачи данных по количеству потерянных пакетов, используя верхний и нижний пороги. Если количество потерянных пакетов ниже верхнего порога, алгоритм пытается повысить скорость передачи данных. Если превышает нижний порог, скорость снижается для обеспечения стабильности и уменьшения ошибок передачи.

Так как радиомодули nRF24 не имеют функции измерения уровня сигнала (RSSI), контроль качества соединения осуществляется по количеству потерянных пакетов. Этот метод эффективно оценивает состояние сети и принимает меры для обеспечения стабильной и надежной связи.

Адаптивный алгоритм обеспечивает гибкость и эффективность управления передачей данных, автоматически снижая скорость при ухудшении качества сигнала и повышая её при улучшении. Это позволяет системе динамически адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать надежное функционирование сети в различных сценариях.

В итоге, система на базе радиомодулей nRF24 демонстрирует высокую адаптивность и эффективность, значительно улучшая характеристики связи

в ячеистой сети. Адаптивное изменение скорости передачи данных и длины пакетов обеспечивает максимальную надежность и производительность сети, делая систему пригодной для различных областей и условий эксплуатации.

**Модель затухание сигнала.** Потери в тракте рассчитывались по уравнению (1) с учетом передаваемой (излучаемой) мощности  $P_t$ , принимаемой мощности  $P_r$ , коэффициента усиления передающей антенны  $G_t$ , а также коэффициента усиления приемной антенны  $G_r$ . Уравнение потерь в тракте (все параметры в дБ) имеет следующий вид, рассчитанный в [5]:

$$P_L = P_t - P_r + G_r + G_t \quad (1)$$

Существует обобщенная классификация моделей распространения сигналов, которые минимизируют детализацию местности или пути, учитывая помехи и препятствия как составляющие потерь, зависящих от расстояния. В то же время модели, учитывающие особенности местности, оценивают потери от каждой помехи отдельно, интегрируя измеренные переменные в общую систему. В основном используются четыре основные модели потерь при распространении сигналов: две одночастотные и две многочастотные. [6, 7, 8].

Моделирование потерь в каналах связи полезно для расчета ослабления сигнала при его прохождении от передатчика к приемнику с учетом расстояния и других факторов. Модели различаются по методам: одни используют топографический профиль для анализа сигнала, другие основываются только на несущей частоте и расстоянии [9, 10].

Рассмотрим модель прогнозирования потерь в свободном пространстве. Основным элементом этой модели является потеря в свободном пространстве (FSPL), которая зависит от частоты несущего сигнала ( $f$  в ГГц). Важными факторами также являются расстояние между передатчиком и приемником ( $d$  в метрах) и выбранное опорное расстояние ( $d_0$ ). Модель характеризуется коэффициентом экспоненциального затухания (PLE,  $n$ ). Уравнение модели отражает зависимости [11, 12, 13], показано в (2). Опорное расстояние для данной модели составляет 1 м, как указано в [12]:

$$P_L(d)[dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi f d_0}{c} \right)^2 + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2)$$

**Тестирование, анализ и результаты.** Для оценки максимальной дальности передачи проводилось тестирование с использованием разных антенн, а также с настройками мощности передатчика на различных уровнях. При тестирования измерялись как теоретические, так и фактические значения.



Таблица 1

## Теоретическая и фактическая дальность

Модуль	Антенны	Мощность модуля	Скорость передачи данных								
			2Mbps			1Mbps			250kbps		
			Теор. дальность	Фактич. дальность	% рас- хож-де- ния	Теор. даль- ность	Фак- тич. даль- ность	% рас- хож- дения	Теор. даль- ность	Фак- тич. даль- ность	% рас- хож- дения
nRF24L01+ PA+LNA	5dBm	0 dBm	670m	550m	17,90%	850m	720m	15,30%	1 737m	1 510m	13,07%
	4dBm	0 dBm	572m	485m	15,14%	725m	625m	13,82%	1 482m	1 320m	10,93%
	3dBm	0 dBm	488m	400m	17,97%	619m	530m	14,34%	1 264m	1 105m	12,60%
	2dBm	0 dBm	416m	320m	23,08%	528m	375m	28,96%	1 079m	890m	17,49%
	5dBm	-6 dBm	416m	310m	25,48%	528m	390m	26,12%	1 079m	860m	20,27%
	5dBm	-12 dBm	258m	201m	22,20%	328m	280m	14,59%	670m	580m	13,42%
	5dBm	-18 dBm	160m	115m	28,32%	204m	160m	21,41%	416m	310m	25,48%
EBYTE E01-2G4M27D	5dBm	0 dBm	1 694m	1 610m	4,98%	2 210m	2 090m	5,43%	4 904m	4 685m	4,46%
	4dBm	0 dBm	1 419m	1 390m	2,07%	1 851m	1 790m	3,31%	4 108m	3 990m	2,87%
	3dBm	0 dBm	1 189m	1 155m	2,85%	1 551m	1 501m	3,21%	3 441m	3 310m	3,81%
	2dBm	0 dBm	996m	930m	6,62%	1 299m	1 220m	6,08%	2 883m	2 710m	5,98%
	5dBm	-6 dBm	996m	940m	5,62%	1 299m	1 230m	5,31%	2 883m	2 725m	5,46%
	5dBm	-12 dBm	585m	550m	6,05%	764m	725m	5,05%	1 694m	1 605m	5,27%
	5dBm	-18 dBm	344m	310m	9,91%	449m	410m	8,65%	996m	890m	10,64%

На рис. 1 представлен график зависимости максимальной дальности передатчика от их максимальной выходной мощности. Из графика следует, что знание дальности и скорости передачи данных позволяет подобрать оптимальные значения мощности передатчика. Это способствует снижению зашумления эфира и экономии энергопотребления.

Результаты тестирования показали, что использование антенн с высоким коэффициентом усиления и оптимизация мощности передатчика значительно увеличивают дальность передачи данных. Как видно из табл. 1, процент расхождения между теоретическими и фактическими значениями варьируется в зависимости от мощности передатчика и типа антенны.

Радиомодуль EBYTE E01-2G4M27D показал наименьшее расхождение между теоретическими и фактическими значениями, что указывает на его высокую эффективность и стабильность в условиях тестирования.

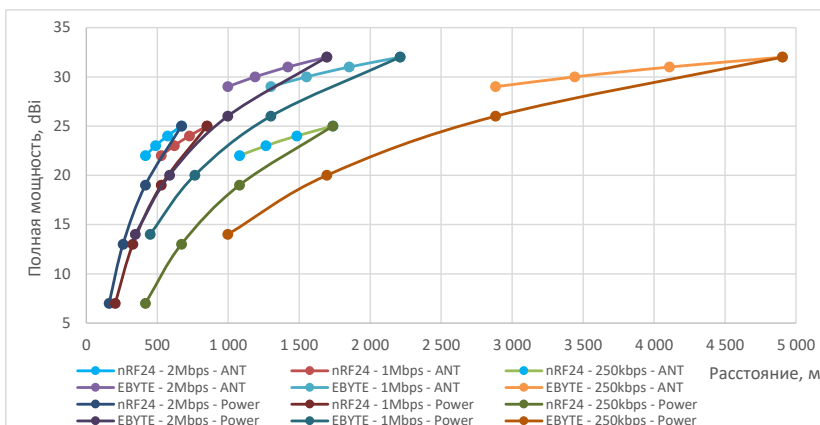


Рис. 1. Дальности передачи от полной мощности

**Заключение.** Адаптивное регулирование скорости передачи данных критично для надежной связи в загруженном спектре, что актуально в эпоху роста Интернета вещей. В статье описана система передачи данных на базе радиомодулей nRF24 в диапазоне 2.4 ГГц, используя платформы Arduino и Raspberry Pi Pico. Экспериментальная установка с различными антеннами и радиомодулями показала высокую гибкость и надежность. Программное обеспечение в среде Arduino IDE эффективно управляло параметрами соединения, улучшая качество связи и снижая зашумленность спектра.

Тестирование показало, что адаптивное изменение скорости и длины пакетов значительно повышает производительность и устойчивость сети.

Таким образом, система на базе радиомодулей nRF24 и платформ Arduino и Raspberry Pi Pico представляет собой перспективное решение для создания надежных и экономически эффективных ячеистых сетей в области IoT, обеспечивая оптимальный баланс между производительностью и надежностью.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

11. Kortuem G., Kawsar F., Sundramoorthy V., and Fitton D. Smart objects as building blocks for the internet of things // IEEE Internet Computing, vol. 14, no. 1, pp. 44–51, Feb. 2010
12. Darroudi S. M., & Gomez C. (2017). Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey. // Sensors, 17(7), 1467

13. *Harris I.* The Arduino Platform and C Programming", // Online, дата обращения: 29.04.2024 - <https://www.coursera.org/learn/arduino-platform>
14. *Bergmann, N. W., Wallace, M., Calia, E.* Low Cost Prototyping System for Sensor Networks // Proc. 6th Int. Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Inform. Process. (ISSNIP), Brisbane QLD, pp. 19–24, 2010
15. *Elezumghi M.K., Afullo T.J.* An Efficient Approach of Improving Path Loss Models for Future Mobile Networks in En-closed Indoor Environments. // IEEE Access. 2021, 9, 110332–110345.
16. *Alwarafy A., Sulyman A.I., Alsanie A.* // Path-Loss Channel Models for Receiver Spatial Diversity Systems at 2.4 GHz. Int. J. Antennas Propag. 2017, 2017, 1–12.
17. *Howard, S.J.; Pahlavan, K.* Measurement and analysis of the indoor radio channel in the frequency domain. // IEEE Trans. Commun. 1990, 39, 751–755.
18. *Handayani, P.; Mubarakah, L.; Hendrantoro, G.* Path loss and Shadowing Characteristics in Indoor Environment at 2.4 GHz Band. // In Proceedings of the IEEE International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, Indonesia, 20–21 May 2015
19. *Qamar, F.* Enhancing QOS Performance of the 5G Network by Characterizing mm-Wave Channel and Optimizing Interference Cancellation Scheme. // Ph.D. Thesis, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaya, March 2020.
20. *Thomas, T.A.; Rybakowski, M.; Sun, S.; Rappaport, T.S.; Nguyen, H.; Kovacs, I.Z.; Rodriguez, I.* A Prediction Study of Path Loss Models from 2-73.5 GHz in an Urban-Macro Environment. // In Proceedings of the 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, China, 15–18 May 2016; pp. 1–5.
21. *Sun, S.; Rappaport, T.S.; Thomas, T.A.; Ghosh, A.; Nguyen, H.C.; Kovacs, I.Z.; Rodriguez, I.; Koymen, O.; Partyka, A.* Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications. // IEEE Trans. Veh. Technol. 2016, 65, 2843–2860.
22. *Rappaport, T.S.; MacCartney, G.R.; Samimi, M.K.; Sun, S.* Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. // IEEE Trans. Commun. 2015, 63, 3029–3056.
23. *Andersen, J.B.; Rappaport, T.S.; Yoshida, S.* Propagation measurements and models for wireless communications channels. // IEEE Commun. Mag. 1995, 33, 42–49.

**Жилин Сергей Викторович** – аспирант, кафедра безопасности информационных технологий Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; 347928; e-mail: [szhilin@sfedu.ru](mailto:szhilin@sfedu.ru).

**Архипенко Владимир Владимирович** – аспирант, кафедра безопасности информационных технологий Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; 347928; e-mail: [arkhipenko@sfedu.ru](mailto:arkhipenko@sfedu.ru).

**Басан Елена Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра безопасности информационных технологий Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; 347928; e-mail: [ebasan@sfedu.ru](mailto:ebasan@sfedu.ru);

**Zhilin Sergey Viktorovich** – postgraduate student, the department of information technology security Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”; 347928, Russia, Taganrog, 44, Nekrasovskiy; e-mail: [szhilin@sfedu.ru](mailto:szhilin@sfedu.ru).

**Arkhipenko Vladimir V.** – postgraduate student, the department of information technology security Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”; 347928, Russia, Taganrog, 44, Nekrasovskiy; e-mail: [arkhipenko@sfedu.ru](mailto:arkhipenko@sfedu.ru).

**Basan Elena Sergeevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor, the department of information technology security Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”; 347928, Russia, Taganrog, 44, Nekrasovskiy; e-mail: [ebasan@sfedu.ru](mailto:ebasan@sfedu.ru).

УДК 53.088.7

Сердюков Владимир Владимирович, Коротков Константин Станиславович

## **К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ В СМЕСИТЕЛЕ**

*Выявление погрешности измерений абсолютных фазовых сдвигов, возникающих в смесительном диоде при гетеродинном преобразовании частоты из-за его нелинейности. Целью исследования является решение проблемы влияния нелинейности фазовых сдвигов гармоник при умножении частоты на результаты измерений абсолютных фазовых сдвигов, возникающих в смесителе и погрешностей в*

различных методах измерений этих сдвигов в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты входного СВЧ сигнал. В статье показано неравенство фазовых сдвигов гармоник произведению номера гармоники, умноженной на фазовый сдвиг умножаемого сигнала используемых в методах измерений абсолютных фазовых сдвигов смесителей. Предложен метод, лишенный этих погрешностей.

Смеситель СВЧ сигналов, сдвиг фаз, гетеродинное преобразование частоты.

Serdyukov Vladimir Vladimirovich, Korotkov Konstantin Stanislavovich

## ON THE ISSUE OF DETERMINING PHASE SHIFTS IN A MIXER

*Identification of measurement errors of absolute phase shifts occurring in a mixing diode during heterodyne frequency conversion due to its nonlinearity. The aim of the study is to solve the problem of the influence of the nonlinearity of phase shifts of harmonics when frequency multiplication on the measurement results of absolute phase shifts occurring in mixers and errors in various measurement methods of these shifts in the mixer during heterodyne frequency conversion of the input microwave signal. The article shows the inequality of phase shifts of harmonics by the product of the harmonic number multiplied by the phase shift of the multiplied signal used in the measurement methods of absolute phase shifts of mixers. A method devoid of these errors is proposed.*

*Microwave signal mixer, phase shift, heterodyne frequency conversion.*

### Введение

В последнее время, для передачи информации широкое распространение получил способ фазовой модуляции радиосигналов как наиболее крипто- и помехозащищенный. При этом подавляющее число устройств для приема таких радиосигналов использует принцип гетеродинного преобразования частоты с применением смесителей радиосигналов, построенных на основе полупроводниковых диодов, которые вносят дополнительный сдвиг фаз и в принципе являющийся паразитным, искажающим передаваемую информацию. Это связано с тем, что всякий полупроводниковый диод имеет реактивные элементы в виде индуктивности, объема полупроводника  $L_s$ , по которому протекает сигнал, и барьерной емкости  $C_b$  p-n перехода, которые, как всякая реактивность, вносят в протекающий через них сигнал время задержки, что эквивалентно дополнительному сдвигу фаз, особенно в диапазоне СВЧ.

### Основная часть

В настоящее время разработаны шесть инструментальных способов определения (измерения с последующим вычислением результатов) сдвигов фаз, возникающих в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты. Метод трёх смесителей [1] когда последовательно измеряются сдвиги фаз трёх смесителей, один из которых испытуемый, а два других вспомогательные с последующим вычислением по результатам измерений сдвига фаз испытуемого смесителя. [2]

Метод двойного преобразования частоты [3] в котором с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) измеряют общий сдвиг фаз двух последовательно соединённых испытуемых смесителя, включённых один в прямом, а второй в обратном направлениях с общим для обеих гетеродином, а полученный результат делят пополам и приписывают каждому из испытуемых смесителей.

Метод отражения [2] при котором через испытуемый смеситель пропускается испытательный сигнал в прямом направлении, который на его выходе отражается от нагрузки с известным коэффициентом отражения и опять возвращается через смеситель на его вход, где и измеряют сдвиг фазы между прямым и отражённым сигналами, который равен сдвигу фаз испытуемого смесителя. [4]

Метод фазовой опоры в котором используют ВАЦ содержащий генератор комбинационных частот вырабатывающих гармоники путём умножения частоты опорного кварцевого генератора 10 МГц с дискретностью гармоник 10 МГц, которые используют для получения испытательного сигнала, испытуемого смесителя и опорного сигнала ПЧ, который сравнивают по фазе с выходным сигналом ПЧ этого же смесителя, в результате чего измеряют их фазовый сдвиг. [5]

Сигнал гетеродина также сравнивают по фазе с соответствующей ему гармоникой и измеряют фазовый сдвиг между ними. Затем вычитают этот фазовый сдвиг из измеренного фазового сдвига сигнала ПЧ в результате чего получают фазовый сдвиг смесителя вносимый им в сигнал ПЧ при гетеродинном преобразовании частоты входного сигнала.

Сигналы всех гармоник когерентны между собой. Поэтому считают, что их фазовые сдвиги соответствуют фазе исходного сигнала опорного кварцевого генератора умноженной на номер гармоники

Но как было показано ранее фазы гармоник отличаются друг от друга на величину  $\Delta\varphi_{\text{П}}$  разную для каждой отдельной гармоники, что является прямой погрешностью измерений, так как измеряется не истинный фазовый

сдвиг испытуемого смесителя, а его реплика, отличающаяся от истинного сдвига фаз на величину  $\Delta\varphi_{\Pi}$ . Поэтому необходима таблица индивидуальной коррекции сдвигов фаз с дискретностью равной частоте опорного кварцевого генератора.

Все вышеперечисленные методы испытаний смесителей имеют существенные недостатки.

В методе трёх смесителей главная и существенная погрешность при измерении фазы возникает из-за согласования входных сопротивлений смесителей, собранных в пару между собой и входами каждой пары смесителей и входами ВАЦ, к которым они присоединяются для испытаний. Как показывает практика, погрешность измерения фазы при КСВ входов смесителей 1,5-2,0 может достигать  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$  градусов.

Метод отражения применим для измерения параметров смесителей в том числе и фазы, только в случае, когда потери преобразования смесителя в прямом и обратном направлении равны и кроме того, не превышают 10 дБ.

Метод двойного преобразования частоты пригоден только для измерений двух совершенно идентичных по параметрам смесителей и совершенно непригоден для двух последовательно соединённых смесителей с разными потерями преобразования и, следовательно, с разными собственными сдвигами фаз. Кроме того, даже при двух совершенно идентичных по параметрам смесителях соединённых последовательно в пару амплитуда испытательного сигнала на входе второго смесителя пары будет меньше по амплитуде, чем амплитуда испытательного сигнала на входе первого смесителя пары на величину его потерь преобразования, что неизбежно приводит к разным сдвигам фаз у первого и второго смесителей пары.

В методе фазовой опоры главный недостаток состоит в том, из-за нелинейности фазовых сдвигов между гармониками фазовой опоры это приводит к измерению не самого фазового сдвига вносимого смесителем при гетеродинном преобразовании в сигнал ПЧ, а его реплики отличающиеся от истинного сдвига фаз на величину  $\Delta\varphi_{\Pi}$  разную для разных гармоник.

Все испытательные сигналы в таком методе являются когерентными так как получены на основе частоты опорного кварцевого генератора 10 МГц.

В то же время известен метод измерения абсолютного сдвига фаз смесительного диода, лишенный вышеперечисленных недостатков.

Который [6] состоит в том, что одновременно измеряют сумму и разность сдвигов фаз двух смесителей, один из которых опорный, а другой

испытуемый при общем гетеродине для обоих смесителей. При измерении суммы сдвига фаз испытуемой и опорной смесители соединяются вместе последовательно выходами ПЧ. На вход испытуемого смесителя подают испытательный сигнал, который в результате прямого преобразования частоты в испытуемом смесителе и обратного преобразования частоты в опорном смесителе снимают с его выхода с частотой равной частоте входного испытательного сигнала и подают на один из двух входов фазометра, но другой вход которого поступает входной испытательный сигнал, в результате чего измеряют общий сдвиг фаз (сумму) двух смесителей в виде:

$$\sum \varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)$$

где  $\varphi_1$  — сдвиг фаз испытуемого, а  $\varphi_2$  — сдвиг фаз опорного смесителей. Затем измеряют разность сдвигов фаз между включёнными параллельно в диапазоне их промежуточных частот в результате чего получают  $\Delta\varphi$ .

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

После чего вычисляют истинные сдвиги фаз испытуемого смесителя  $\varphi_1$ , по формуле

$$\varphi_1 = \frac{\sum \varphi + \Delta\varphi}{2} \quad (1)$$

и опорного смесителя  $\varphi_2$  по формуле

$$\varphi_2 = \frac{\sum \varphi - \Delta\varphi}{2} . \quad (2)$$

### Заключение

Проанализирован сдвиг фаз, вносимый полупроводниковым смесительным диодом в процессе гетеродинного преобразования частоты входного сигнала в сигнал ПЧ.

Показано, что он нелинеен в диапазоне частот, а его величина определяется постоянным активным и индуктивным сопротивлениями объёма полупроводника и переменной барьерной ёмкостью р-п перехода, теоретический инженерный расчёт которой весьма сложен и не всегда возможен.

На этом основании сделан вывод о возможности в настоящее время только инструментальных измерений сдвигов фаз, вносимых смесительным диодом в сигнал ПЧ при гетеродинном преобразовании частоты.



Рассмотрены известные инструментальные методы измерения сдвигов, вносимых смесительным диодом в сигнал ПЧ при гетеродинном преобразовании частоты и показаны их недостатки.

Приведено описание нового способа измерений сдвига фаз смесительного диода при преобразовании частоты лишенного этих недостатков.

Показано, что в случае применения полупроводникового диода для умножения частоты, сдвиги фаз каждой из гармоник не равны сдвигу фаз исходного для умножения сигнала, умноженного на номер гармоники, и их величина индивидуальна для каждой гармоники.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Епифанов Е.И., Новиков В.А., Чемес Е.А.* Экспериментальные исследования радиочастотных смесителей. // Радиотехника. 1988. № 10.
2. *Дансмор, Джоэль П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Джоэль П. Дансмор; перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитоновой [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 735 с.: ил., табл.; 25 см. - (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII-32.); ISBN 978-5-94836-505-3: 1500 экз. стр.557.
3. *Дансмор, Джоэль П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Джоэль П. Дансмор; перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитоновой [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 735 с.: ил., табл.; 25 см. - (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII-32.); ISBN 978-5-94836-505-3: 1500 экз. стр.534.
4. *Дансмор, Джоэль П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Джоэль П. Дансмор; перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитоновой [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 735 с.: ил., табл.; 25 см. - (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII-32.); ISBN 978-5-94836-505-3: 1500 экз. стр.560.
5. *Дансмор, Джоэль П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Джоэль П. Дансмор; перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитоновой [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 735 с.: ил., табл.; 25 см. - (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII-32.); ISBN 978-5-94836-505-3: 1500 экз. стр.564.

6. *Коротков К.С. Малышков В.Е. Суровенный В.Г.* Способ определения сдвига фаз четырехполосников с преобразователем частоты / А.с. СССР № 1475347 G01R 27/28 с приоритетом от 13.12.86. Зарегистр. 22.12.86.

**Сердюков Владимир Владимирович**, старший преподаватель кафедры радиофизики и нанотехнологий Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 968 644 44 68.

**Serdyukov Vladimir Vladimirovich**, Senior Lecturer, Department of Radiophysics and Nanotechnology, Kuban State University, Krasnodar, Russia, 149 Stavropol Street, 350040, phone: +7 968 644 44 68.

УДК 53.088.7

Сердюков Владимир Владимирович, Коротков Константин Станиславович,  
Голан Антон Васильевич, Маньшина Александра Тарасовна,  
Калужная Софья Евгеньевна

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ФАЗ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ И СВЧ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МОДУЛЯХ СИСТЕМ СВЯЗИ С МНОГОУРОВНЕВЫМИ ФОРМАТАМИ МОДУЛЯЦИИ**

*Важным элементом любого измерительного прибора оптического или СВЧ диапазона является векторный вольтметр, измеряющий сдвиг фаз и отношение амплитуд сигналов. Реализацией таких приборов практически не занимаются и это в основном является интеллектуальной собственностью крупных компаний, поэтому разработка такого доступного устройства необходима. Целью работы являются расчет и проектирование структурной и функциональной схемы устройства, измеряющего разности фаз сигналов, с возможностью приема команд управления и передачи результатов через высокоскоростной Ethernet интерфейс. В результате, рассмотрены основные методы построения векторных вольтметров с использованием микроконтроллеров и FPGA, произведено моделирование оптических каналов связи и создано устройство измерения сдвига фаз.*

*ПЛИС, смесители, сдвиг фаз, СВЧ, оптоэлектроника, векторный вольтметр.*

Serdyukov Vladimir Vladimirovich, Korotkov Konstantin Stanislavovich, Golan Anton Vasilyevich, Manshina Alexandra Tarasovna,  
Kalyuzhnaya Sofia Evgenyevna

## **DETERMINATION OF THE PHASE DIFFERENCE IN OPTOELECTRONIC AND MICROWAVE INTERFACE MODULES OF COMMUNICATION SYSTEMS WITH MULTILEVEL MODULATION FORMATS**

*An important element of any optical or microwave measuring device is a vector voltmeter that measures the phase shift and the ratio of signal amplitudes. The implementation of such devices is practically not engaged in and it is mainly the intellectual property of large companies, therefore the development of such an affordable device is necessary. The purpose of the work is. calculation and design of the structural and functional circuit of a device that measures the phase differences of signals, with the ability to receive control commands and transmit the results via a high-speed Ethernet interface. As a result, the basic methods of constructing vector voltmeters using microcontrollers and FPGAs are considered, optical communication channels are modeled and a phase shift measurement device is created.*

*FPGA, mixers, phase shift, microwave, optoelectronics, vector voltmeter.*

### **Введение**

Экспоненциальный рост потребности современного общества в скорости и объеме получения информации повышает требования к помехоустойчивости, защищенности и высокой пропускной способности ВОЛС. Перед инфокоммуникационными компаниями стоит проблема увеличения пропускной способности в существующих магистральных и локальных сетях [1]. Особое внимание заслужили новые форматы модуляции, использование которых возможно при использовании современного стационарного оборудования. Однако внедрение новых форматов модуляции невозможно без разработки более совершенных интерфейсных модулей, реализующих эти форматы. Подобные модули способны измерять не только амплитуду, но и фазу сигналов. В оптических интерфейсах зачастую измерение разности фаз может производиться интерференционными методами на компонентах интерфейсов до использования АЦП. В радиосистемах, если они низкоскоростные, (обычно они реализуются с помощью FPGA), задача измерения фазового сдвига решается программным способом – формированием аппаратной части из вентиляй. Однако при скоростях выше 1 Гб/с достичь

требуемых параметров измерения фазового сдвига возможно лишь с применением более сложных систем наподобие ASIC (интегральная схема целевого применения) и NPU (блок сетевой обработки).

### **Основная часть**

На основе проведенного анализа методов модулирования несущей, используемых в современных системах связи, а также устройства интерфейсных модулей, непосредственно формирующих передаваемый сигнал, установлено, что:

- в интерфейсном модуле должны производиться измерение амплитуды и фазы сигнала;
- для увеличения скорости передачи данных интерфейсные модули, как правило, представляют собой либо специальные логические интегральные схемы (ASIC), либо программируемые пользователем вентильные матрицы (FPGA).

Задачами разрабатываемого устройства являются:

- оцифровка двух синхронизированных гармонических радиосигналов частотой 278 кГц;
- вычисление в реальном времени разности фаз и отношения амплитуд этих сигналов;
- передача обработанных данных на ПК по протоколу Ethernet.

Исходя из предъявляемых задач, можно сформулировать требования к компонентам и схеме реализации разрабатываемого устройства, измеряющего фазу сигнала:

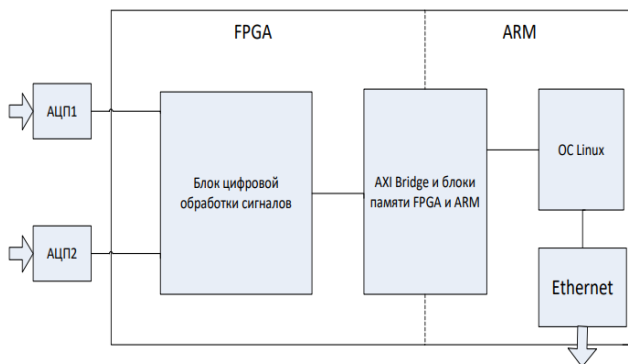
- наличие двух высокоскоростных АЦП большой разрядности;
- высокая скорость обработки данных;
- возможность проведения калибровок устройства, необходимых при изменении параметров измеряемых сигналов;
- наличие Ethernet модуля, поддерживающего работу со стандартами не ниже Fast Ethernet;
- устройство должно быть реализовано без использования навесного монтажа, для уменьшения влияния внешних помех.

Исходя из задач и требований программная обработка, реализованная на микроконтроллере, признана нецелесообразной из-за больших задержек при обработке и меньшей производительности микроконтроллеров по сравнению с аппаратными средствами. Так как для немассовых устройств применение ASIC является нецелесообразным по различным причинам, в

первую очередь из-за высокой сложности разработки. Поэтому был выбран СБИС с программируемой логикой Cyclone V от компании Intel [2].

Наиболее подходящей под требования является плата ADC-SoC от компании Terasic, где обозначены как элементы, подключенные к FPGA, так и к микропроцессору (обозначен как HPS) [3].

На основе проведенного анализа и с учетом выбранных компонентов были выбраны структурная и функциональная схемы, На рис. 1 приведена структурная схема.



*Рис. 1. Структурная схема разрабатываемого устройства, измеряющего разность фаз двух синхронизированных гармонических сигналов*

Особенностью данного чипа является то, что на одном кристалле расположены и FPGA, и микропроцессор ARM Cortex A9, имеющие возможность обмена данными с помощью шины AXI, что позволит разделить процессы обработки данных и их передачи [4].

Как видно из рис. 5 оцифрованные сигналы подаются на цифровые смесители, где перемножаются с ортогональными колебаниями сгенерированными NCO. На выходах смесителей для каждого входного сигнала фактически будут наблюдаться действительная и мнимая компоненты.

Далее подключаются СИС-фильтры, пропускающие только сигнал с частотой равной разности частот входного сигнала и гетеродина. Вычисление фазы и амплитуды каждого сигнала выполняется с помощью алгоритма CORDIC. Вычисление фазы может проводиться с точностью до десятых и сотых долей градуса. После чего рассчитывается разность фаз двух гармонических сигналов и отношение их амплитуд.

Проведя анализ сигналов, FPGA записывает полученные данные в ячейки памяти, к которым посредством AXI Bridge имеет доступ микропроцессор ARM Cortex A9 [3]. Микропроцессор, с установленной операционной системой на базе Linux, проводит расчет отношения амплитуд сигналов, переводит значение в градусы, формирует кадры протокола Ethernet и передает их на физический уровень.

### **Разработка на языке Verilog блока обработки измеряемых сигналов**

Задача блока NCO, используя в качестве входного сигнала только тактирующие импульсы, генерировать синус и косинус частотой 278 кГц. Чтобы получить нужную частоту сигнала на выходе, необходимо чтобы на входе конвейера CORDIC каждый такт частоты clk по определенному алгоритму изменялась фаза. Программный код составлен в Quartus Prime Lite версия 18.0, являющейся частью дистрибутива Intel FPGA.

Для работы реализуемого алгоритма необходим мультипликативный преобразователь частоты, работу которого можно описать следующей формулой.

$$\sin(\alpha) \cdot \sin(\varphi) = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \varphi) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \varphi), \quad (3)$$

На рис. 1 показана структурная схема цифрового преобразователя частоты. Был отдельно произведен расчет и программная реализация CIC фильтра, а также был программно реализован алгоритм CORDIC, вычисляющий фазу и амплитуду сигналов.

Задачей модуля PHASE\_METER является объединение описанных выше блоков и модулей в одну структуру.

На структурной схеме кроме описанных выше модулей также присутствуют дополнительные регистры. Они необходимы для корректной передачи сигналов между модулями – отсутствие этих связующих регистров приводит к полной невозможности передачи данных следующему модулю.

В разрабатываемой системе ведущими блоками являются IP-ядра Terasic\_AD9254 (с подключенным IP-ядром PHASE\_METER) и Arria V/Cyclone V Hard Processor System, ведомыми, соответственно, On-Chip Memory (RAM or ROM) Intel FPGA IP и PHASE\_METER. Задачей блоков Terasic\_AD9254 (исходный код IP-ядра открыт) является управление АЦП и прием оцифрованных сигналов для дальнейшей обработки (блок подключен к физическим входам/выходам чипа).

С помощью Lightweight HPS-to-FPGA в FPGA из микропроцессора передаются команды на начало измерений и информация о количестве отсчетов АЦП, которые нужно принять и обработать. Все интерфейсы Avalon Mapped-Memory данного блока являются ведущими.

Для работы системы, необходимо чтобы в блоки PHASE\_METER и Terasic\_AD9254 поступили команды на начало измерений. Источником команд является микропроцессор, передающий команды с помощью моста Lightweight HPS-to-FPGA. Работа микропроцессора при взаимодействиях с FPGA определяется приложением, скомпилированным под ОС Linux и запускаемым из файлового пространства операционной системы. Смонтированный образ ОС Linux записан на флэш-карту, входящую в комплект поставки платы Terasic ADC-SoC. Работа через операционную систему избавляет от необходимости написания программного кода, реализующего передачу информации по Ethernet интерфейсу, т.к. уже содержит все необходимые драйверы. Погрешности измерения разработанного устройства не превышают  $\pm 0,02$  и  $\pm 0,1$  дБ для разностей фаз и отношений амплитуд соответственно.

#### Заключение

В инженерном программном обеспечении OptiSystem проведено моделирование работы транспондеров DP-QPSK и DP-16QAM форматов модуляции. На основе моделирования проведён анализ полученных характеристик работы линии длиной 300 км на одной из несущих DWDM систем передачи при скорости передачи данных от каналообразующего оборудования до 100 Гбит/с, а также соотношении «сигнал-шум» канала передачи в пределах от 8 до 24 дБ. В результате анализа было определено, что требуемая полоса пропускания канала DWDM относительно формата NRZ при DP-QPSK модуляции уменьшается в 4 раза относительно потока каналообразующего оборудования, а при DP-16QAM модуляции – в 8 раз. Таким образом, для передачи потока в 100 Гбит/с DP-QPSK требует полосы пропускания канала 25 Гбит/с, а DP-16QAM – 12.5 Гбит/с.

Для применения в стенде по измерению фазовой задержки гетеродина преобразования частоты [4] были составлены структурная и функциональная схемы устройства, измеряющего разность фаз двух гармонических сигналов заданной частоты 278 кГц

На языке аппаратного программирования Verilog для процессов, обрабатываемых FPGA, составлена программа объемом 818 строк для реализации функциональной схемы устройства, измеряющего разность фаз двух

гармонических сигналов [5]. Также на языке программирования СИ мной составлена программа объемом 180 строк для микропроцессора ARM Cortex A9, входящего в состав СБИС Cyclone V. С помощью как готовых, так и самостоятельно созданных IP-ядер собрана логическая схема, для программирования FPGA.

На основании эксперимента определены относительные погрешности разработанного устройства, не превышающие  $\pm 0,02$  и  $\pm 0,1$  дБ при измерении разности фаз сигналов и отношения их амплитуд соответственно.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Наний О. Е.* Анализ форматов модуляции для систем DWDM со скоростью 40 Гбит/с / *О. Е. Наний, В. Н. Трешиков.* // Вестник связи. – 2012. – №1.
2. ADC-SoC User Manual. // Intel: official site. – 2016. – (Engl.). – URL: [https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en\\_US/portal/dsn/42/docus-dsnbk-42-2108361005542-adc-soc-user-manual-dsn.pdf](https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/portal/dsn/42/docus-dsnbk-42-2108361005542-adc-soc-user-manual-dsn.pdf) (дата обращения 06.05.2024).
3. *Jaymin P.* Design between AXI Lite and AHB Bus Protocol / *Jaymin P., Yash S., Lili H.* // Journal of Physics: Conference Series – 2021 – V. 1993.
4. Патент № 2618046 Российская Федерация, МПК G 01 R 25/00. Способ измерения разности фаз и отношения уровней двух гармонических сигналов: № 2016109376: заявл. 15.03.2016: опубл. 10.05.2017, Бюл. №13 / *Бабенко А. А., Гноевой А. В., Коротков К. С., Левченко А. С., Фролов Д. Р.*; заявитель и патентообладатель Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования "Кубанский Государственный Университет". – 12 с.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022660602 Российская Федерация. Программа для определения комплексного коэффициента передачи и отражения СВЧ-смесителей методом суммы и разности: №2022619520: заявл. 26.05.2022: опубл. 07.06.2022, / *Коротков К. С., Большов А. В., Гайденко И. В., Пожидаев Р. Б., Сердюков В. В.*; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «КубГУ») – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.



**Сердюков Владимир Владимирович**, старший преподаватель кафедры радиопроизведения и нанотехнологий Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 968 644 44 68.

**Serdyukov Vladimir Vladimirovich**, Senior Lecturer, Department of Radiophysics and Nanotechnology, Kuban State University, Krasnodar, Russia, 149 Stavropol Street, 350040, phone: +7 968 644 44 68.

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ**

*Представлен численный метод нахождения оптимального управления для многомерных нелинейных систем на основе обобщенной задачи динамического уравновешивания механических систем, заключающейся в обеспечении заданных законов изменения реакций в выбранных кинематических связях за счет добавления функций управления в другие связи. Метод базируется на представлении уравнений динамики систем в форме дифференциально – алгебраических уравнений. Оптимальность функций управления достигается для интегральных критериев, не содержащих в явном виде функции управления. Даны примеры рассматриваемого метода в задачах управления антропоморфными роботами и подвесками транспортных машин.*

*Оптимальное управление, нелинейная динамика, активная виброизоляция, робототехника.*

**THE METHOD OF OPTIMAL CONTROL OF AN ARBITRARY MECHANICAL SYSTEM**

*A numerical method for finding optimal control of multidimensional nonlinear systems is presented on the basis of a generalized problem of dynamic balancing of mechanical systems, which consists in providing specified laws of reaction change in selected kinematic connections by adding control functions to other connections. The method is based on the representation of the equations of system dynamics in the form of differential algebraic equations. The optimality of control functions is achieved for integral criteria that do not explicitly contain control functions. Examples of the considered method are given in the tasks of controlling anthropomorphic robots and suspensions of transport vehicles.*

*Optimal control, nonlinear dynamics, active vibration isolation, robotics.*

## Введение

Оптимальное управление нелинейными динамическими системами произвольной структуры и размерности – актуальная задача в таких областях как робототехника, транспортные машины и др. Классические методы теории оптимального управления трудноприменимы для нелинейных систем высокой размерности. Современные автоматизированные методы построения и решения математических моделей динамики систем, позволяют выполнять численные исследования прямой задачи управляемого движения для существенно нелинейных многомерных систем. Разработка методов синтеза управляемого движения для математических моделей указанного класса, существенно расширит круг решаемых задач, в том числе за счет включения в него новых областей – роботов со сложной локомоцией, группового движения роботов и т.д

### Теоретическое описание

Используется математическая модель динамики систем в форме дифференциально – алгебраических уравнений [1]

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{D}^T \\ \mathbf{D} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$   $n$ -мерный вектор координат системы,  $\mathbf{p}$   $k$ -мерный вектор множителей Лагранжа,  $\mathbf{M}$  матрица инерции,  $\mathbf{D}$  матрица коэффициентов уравнений связей,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$  вектор внешних сил,  $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$  - вектор правых частей вторых производных уравнений связей. При численном интегрировании системы (1), решается система линейных алгебраических уравнений

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0 \\ \mathbf{p}_0 \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

$\mathbf{A}$  матрица коэффициентов (1). Вектор множителей Лагранжа может быть разделен на три группы  $\mathbf{p} = (\mathbf{p}_3 \quad \mathbf{p}_2 \quad \mathbf{p}_1)^T$ , где  $\mathbf{p}_1$  подвектор множителей Лагранжа размерностью  $k_1$ , соответствующий управляющим приводам,  $\mathbf{p}_2$  подвектор множителей Лагранжа размерностью  $k_2$ , соответствующий некоторым выбранным реакциям связей,  $\mathbf{p}_3$  подвектор остальных множителей Лагранжа. Назначим множителям Лагранжа некоторые предписанные значения  $\mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_r(t)$ ,  $\mathbf{p}_r(t)$  известные функции, которые могут быть получены добавлением в правые части уравнений связей для  $\mathbf{p}_1$ , а именно  $\mathbf{Q}_1(\mathbf{x}) = \mathbf{w}(t)$ . Здесь  $\mathbf{w}(t)$  некоторые неизвестные функции. С учетом этого уравнение (2) может быть переписано

$$\begin{pmatrix} (\ddot{\mathbf{x}} & \mathbf{p}_3)^T \\ \mathbf{p}_r \\ \mathbf{p}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\ddot{\mathbf{x}}_0 & \mathbf{p}_{30})^T \\ \mathbf{p}_{20} \\ \mathbf{p}_{10} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 \end{pmatrix} \ddot{\mathbf{w}}(t). \quad (3)$$

$\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$  соответствующие подматрицы  $\mathbf{A}^{-1}$ . Из уравнения (3) можно найти вторые производные неизвестных функций  $\ddot{\mathbf{w}}(t)$

$$\ddot{\mathbf{w}}(t) = \mathbf{A}_2^{-1}(\mathbf{p}_r(t) - \mathbf{p}_{20}). \quad (4)$$

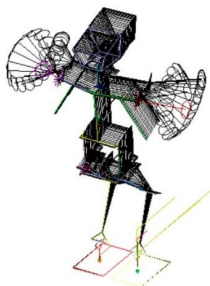
Уравнение (3) с учетом уравнения (4) описывает управляемое движение нелинейной системы (1) при условии минимизации интегрального критерия вида

$$I = \int_0^T R(\mathbf{p}_r(t)) dt. \quad (5)$$

где  $R$  является некоторой положительной функцией. Для простейшего случая  $\mathbf{p}_r(t) = 0$  следует  $I=0$ , т.е. (4) обеспечивает минимум интегрального критерия (5). Функции управления могут быть найдены из (3) и записаны в форме

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_{10} + \mathbf{A}_3 \ddot{\mathbf{w}}(t). \quad (6)$$

Условия существования решения систем (4) и (6) невырожденность матриц  $\mathbf{A}, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$ . В [2-9] приведены результаты использования метода для тестовых задач различной размерности. В [5-7] показано применение метода для задачи управления реакциями двуногих и четырехногих роботов - рис. 1. В работах [2-4] даны методы для систем с избыточными приводами. Метод может быть использован как вычислительное ядро для резервуарных вычислений [10]. Программно метод реализован в системе моделирования динамики тел ФРУНД [11].



*Рис. 1. Кинограмма движения андроида при смещении ЦМ назад с сохранением значения момента реакции в опоре относительно поперечной оси*

### **Выводы**

Рассмотренный метод может быть применим к широкому классу нелинейных систем, описываемых дифференциально – алгебраическими

уравнениями и позволяет получать численное решение задачи оптимального управления для критериев, заданных в форме уравнений связей. Перспективно применение метода для решения задач управления антропоморфными и зооморфными роботами.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Горобцов А.С., Карцов С.К., Плетнев А.Е., Поляков Ю.А.* // Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей: монография, М.: Машиностроение. 2011. 462 с.
2. Метод синтеза программного движения роботов с учетом заданных ограничений реакций в связях / А.С. Горобцов, А.Е. Марков, П.С. Тарасов, Ан.В. Скориков, А.В. Дианский // Робототехника и искусственный интеллект : материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Железногорск, 27 ноября 2021 г.) / под науч. ред. В. А. Углева ; Сибирский федеральный ун-т, Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии». - Красноярск, 2021. - С. 199-202. – URL: [https://aesu.ru/storage/conference/\\_docs/2021/RAI-21\\_print.pdf](https://aesu.ru/storage/conference/_docs/2021/RAI-21_print.pdf).
3. *Горобцов А.С., Сычев О.А., Орлова Ю.А., Смирнов Е.А., Григорьева О.Е., Бочкин А.М., Андреева М.И.* // Optimal Greedy Control in Reinforcement Learning, Sensors, 2022, Vol. 22, issue 22 (November-2). - Article 8920. - 14 p. - DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228920>
4. *Горобцов А.С.* Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения / А.С. Горобцов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2023. - № 3 (756). - 14-24. - DOI: 10.18698/0536-1044-2023-3-14-24.
5. *Горобцов А.С., Андреев А.Е., Марков А.Е., Скориков Ан.В., Тарасов П.С.* // Особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза устойчивого управляемого движения шагающих роботов, Труды СПИИРАН = SPIRAS Proceedings. - 2019. - Т. 18, № 1. - 85-122.
6. Управление движением робота-собаки методом обратной задачи / А.С. Горобцов, Е.Н. Рыжов, Н.В. Чигиринская, О.К. Чесноков // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2024. - № 4 (287). - С. 49-54. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-49-54.
7. *Горобцов А.С.* Управление локомоцией робота-андроида методом обобщенной задачи динамического уравнивания в невырожденном

- случае / А.С. Горобцов, Е.Н. Рыжов, П.С. Тарасов // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, ме-хатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2024. - № 4 (287). - С. 44-49. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-44-49.
8. Методы машинного обучения в управлении роботами со сложной локомоцией на основе обобщенной задачи динамического уравнивания / А.С. Горобцов, Ю.А. Орлова, Е.Н. Рыжов, А.Р. Донская // Российский форум «Микро-электроника 2023». 9-я Научная конференция «ЭКБ и микро-электронные модули» : сб. тез. (Парк науки и искусства «Сириус», 9-14 октября 2023 г.) / АО «НИИ
  9. Оптимальное управление динамикой автомобиля на основе обобщенной задачи динамического уравнивания / А.С. Горобцов, А.Е. Марков, А.В. Дианский, С.К. Карцов // XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ–2023) (г. Волгоград, 11-15 сентября 2023 г.) : материалы мультikonф. В 4 т. Т. 4 : материалы докл. локальной науч.-техн. конф. «Управление в перспективных наземных транспортных системах» (УПНТС–2023) / редкол.: И. А. Каляев (отв. ред.), В. Г. Пешехонов, С. Ю. Желтов [и др.] ; ФГБОУ ВО «Волгоградский гос. технический университет», Южный научный центр РАН, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН [и др.]. - Волгоград, 2023. - С. 51-53.
  - 10 *Nakajima K. and Fisher I., Reservoir Computing* (Springer, Berlin) 2021.
  - 11 ФРУНД – Система для решения нелинейных уравнений динамики. // Электронный ресурс. URL: <http://frund.vstu.ru/> (доступ 24 Октября 2022).

**Горобцов Александр Сергеевич**, доктор технических наук, зав. каф. «Высшая математика» Волгоградского государственного технического университета, Россия, город Волгоград, проспект им. В.И. Ленина 28, 400005, телефон: +7 (8442) 24-84-87, email: [vm@vstu.ru](mailto:vm@vstu.ru).

**Gorobtsov Alexander Sergeevich**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department. Higher Mathematics of Volgograd State Technical University, Volgograd, V.I. Lenin Avenue 28, 400005, Russia, phone: +7 (8442) 24-84-87, email: [vm@vstu.ru](mailto:vm@vstu.ru) .

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИТРУБНЫМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ**

*В работе рассматривается проблема внутритрубной диагностики трубопроводов сложной геометрии среднего диаметра трубопроводов 200-500 мм с использованием роботизированных устройств. Целью работы является разработка нового технического устройства для диагностики трубопроводов сложной геометрии в заданном диапазоне диаметров. Основные задачи исследования: разработка новой конструкции внутритрубного устройства, создание системы управления. Приведён анализ основных устройств для контроля внутритрубной поверхности, представлена новая конструкция робототехнического устройства, разработана система управления этой конструкцией для движения по участкам сложной геометрии с использованием множества подсистем управления.*

*Аварии на трубопроводах, внутритрубная диагностика, внутритрубные работы, управление робототехническими устройствами, система управления.*

Dmitry Nikolaevich Kuchev

## **DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR AN IN-LINE ROBOTIC COMPLEX**

*The paper considers the problem of in-line diagnostics of pipelines of complex geometry with an average diameter of 200-500 mm pipelines using robotic devices. The aim of the work is to develop a new technical device for diagnosing pipelines of complex geometry in a given diameter range. The main objectives of the research are the development of a new design of an in-line device, the creation of a control system. The analysis of the main devices for monitoring the inner tube surface is given, a new design of a robotic device is presented, a control system for this structure for movement along sections of complex geometry using a variety of control subsystems is developed.*

*Pipeline accidents, in-line diagnostics, in-line work, control of robotic devices, control system.*

Трубопроводный транспорт играет важную роль в энергетическом секторе Российской Федерации. Так своевременная диагностика и плановый ремонт позволяют содержать трубопроводы в требуемом техническом состоянии без финансово-экономических потерь и нанесения вреда

окружающей среде. В настоящий момент на территории РФ находится около 217 тыс. км. трубопроводного транспорта, из которых 47 тыс. км. составляют трубопроводы по транспортировке нефтяных продуктов, 150 тыс. км. составляют трубопроводы по транспортировке газообразных продуктов. [1]. При этом, до 80% отказов приходится на внутритрубную и наружную коррозию [2]. Так, например, 13 февраля 2023 г. произошёл разрыв резервной нитки магистрального газопровода в Ярославской области.

На данный момент использование ручных методов неразрушающего контроля, при внешнем обследовании трубопроводов, не является достаточно информативным способом контроля трубопроводов. При этом, данные методы имеют низкую степень автоматизации процесса и большую трудоёмкость. Использование внутритрубных робототехнических средств позволяет увеличить количество информации о техническом состоянии трубопровода, увеличить достоверность получаемых данных, что в свою очередь позволяет контролировать техническое состояние объекта контроля и прогнозировать остаточный срок службы. В современных робототехнических внутритрубных устройствах используются, в основном, следующие методы контроля: ультразвуковой, магнитный, электромагнитно-акустический, визуально-измерительный контроль.

Робототехнические средства для внутритрубной диагностики подразделяются на устройства без собственных двигателей и с собственными двигателями на борту [3]. Так, внутритрубный снаряд-дефектоскоп, перемещающийся под действием избыточного давления, относится к робототехническому устройству без собственных двигателей (рис. 1). Однако, подобные устройства имеют ряд недостатков, к которым можно отнести: возможная потеря диагностических данных на участках сложной геометрии, застопоривание на участках сложной геометрии, необходимость наличия пускоприёмочной камеры, отсутствие контроля в режиме реального времени, высокая скорость контроля не позволяет обнаружить дефекты небольших размеров.



*Рис. 1. Внутритрубный снаряд-дефектоскоп*

Внутритрубные робототехнические устройства с собственными двигателями, наиболее популярные в настоящее время: робототехническое устройство на гусеничной платформе компании АО «Диаконт» (рис. 2, а) и



робототехническое устройство на колёсной платформе АО «ИнтроСкан Технолоджи» (рис. 2, б). Робототехническое устройство на гусеничной платформе позволяет осуществлять контроль трубопроводов с условным проходным диаметром 700-1400 мм [4], обладает визуально-измерительным, ультразвуковым или магнитным контролем. Перемещение по вертикальным участкам осуществляется в диапазоне диаметров 700-1000 мм, наличие кабель-троса создаёт сложности при перемещении в отводах, что приводит к потере связи с устройством. Глубина исследования до 240 м, скорость до 3 м/мин. Робототехническое устройство на колёсной платформе перемещается в диапазоне условных проходных диаметров 300-1400 мм [5], осуществляет как визуально-измерительный контроль, так и ультразвуковую диагностику с сухим точечным контактом. Глубина исследования трубопровода до 1500 м, скорость 0,3 м/мин. Однако робототехническое устройство способно осуществлять контроль только внутри трубопроводов из ферромагнитного материала, ввиду наличия мотор-колёс с эффектом намагничивания.

Представленное описание существующих робототехнических устройств позволяет сделать вывод о необходимости разработки внутритрубного робота для диагностики, перемещающегося в широком диапазоне условных проходных диаметров, с возможностью движения по участкам сложной геометрии в диапазоне диаметров 200-500 мм, к которым относятся отводы (участки криволинейной формы), наклонно-вертикальные участки, участки с изменением поперечного сечения. В результате чего был разработан внутритрубный робототехнический комплекс (ВРК) опорно-прижимного типа, имеющий форму корпуса в виде конусно-цилиндрической части, напоминающего геометрию криволинейного участка. Устройство имеет шесть опорных ног, расположенных под углом  $60^{\circ}$  относительно друг друга, включая три приводных и три неприводных опорных ноги для движения в требуемом диапазоне диаметров.

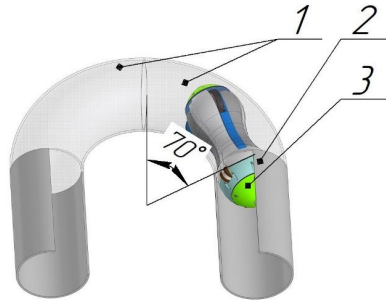


Рис. 2. Движение ВРК по криволинейному участку. 1 – два последовательно соединённых отвода; 2 – прямолинейный участок; 3 – ВРК

Разработанная конструкция внутритрубного устройства представляет нетривиальную задачу по созданию системы управления. Ввиду движения устройства в криволинейном участке типа отвод, использование кабель-троса с использованием оптоволокна не является допустимым при возникновении высокой вероятности излома данного кабеля о внутритрубную поверхность, также существующие системы управления, представленные в [6-10], не являются эффективными для управления движением новой конструкцией по участкам сложной геометрии. Вследствие чего была разработана система управления ВРК, которая включает в себя подсистему радиосвязи для передачи и приёма данных в системе управления, структура представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структура системы управления ВРК

Разработанная система управления представляет возможность дистанционного управления ВРК с использованием станции оператора, с которой отправляются и принимаются данные, при помощи подсистемы радиосвязи, которая связана с управляющим компьютером и контроллером устройства, что расположены на борту. Последние включают в себя подсистему регулировки диаметра ВРК, которая получает данные с датчика магнитного поля сервопривода, отвечающего за регулировку опорных ног, а также тензодатчиков и гироскопа, что вычисляют необходимую силу поджатия колёсных движителей к внутритрубной поверхности, управляющий сигнал отправляет на сервопривод вращения винта. Подсистема управления тяговой силой движения ВРК получают информацию с использованием датчиков магнитного поля колёсных движителей о скорости их перемещения и ориентации устройства от гироскопа, управляющий сигнал отправляется на электромоторы постоянного тока. Подсистема управления скоростью движения ВРК принимает показания с датчиков магнитного поля колёсных движителей, что позволяет осуществлять регулировку скорости поступательного движения конструкции, а также осуществлять поступательно-вращательное движение. Подсистема энергетического обеспечения регулирует подачу питания в зависимости от показаний датчика тока, напряжения аккумуляторной батареи. Подсистема диагностики трубопровода принимает данные с толщиномера и видеокамеры.

**Заключение.** В работе рассмотрена проблема перемещения внутритрубных устройств и контроля трубопроводов сложной геометрии, в диапазоне диаметров 200-500 мм. Предложена новая конструкция внутритрубного робота, представлено её движением в криволинейном участке с углом поворота  $180^{\circ}$ . Разработана новая система управления конструкцией ВРК, которая включает в себя множество подсистем управления, что позволяет осуществлять дистанционное управление робототехническим устройством, а также управлять силой поджатия колёсных движителей, тяговой силой движения, способом движения – поступательный/поступательно-вращательный. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании автономных внутритрубных робототехнических устройств опорно-прижимного типа.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии на магистральных газопроводах в России в 2022-2023 г. [Электронный ресурс] // РИА Новости. 2023 13 февраля. URL:

- <https://ria.ru/20230213/avarii-1851825840.html> (дата обращения: 23.09.2023).
2. *Поезжаева Е. В.* Робот - змея для технической диагностики и ремонта трубопроводов / Е. В. Поезжаева, В. С. Юшков // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2011. – № 14. – С. 93-98.
  3. *Поезжаева Е. В.* К вопросу о разработке модели механической конструкции робота промышленного автономного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов / Е. В. Поезжаева, Д. Н. Кучев, Е. Ю. Тонков // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 4. – С. 53-59.
  4. *Холоденко В. Б.* Внутритрубные диагностические роботизированные мобильные комплексы для труб различного диаметра / В. Б. Холоденко, А. П. Пахомов // Инновации. Наука. Образование. – 2022. – № 52. – С. 630-645
  5. *Ворончихин С. Ю.* Оценка технического состояния технологических трубопроводов компрессорных станций ПАО "Газпром" с применением роботизированных сканеров / С. Ю. Ворончихин, А. А. Самокрутов, Ю. А. Седелев // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2016. – № 3(27). – С. 120-130.
  6. *Голубкин И. А.* Система управления мобильным колесным роботом для внутритрубной инспекции газопроводов / И. А. Голубкин, И. А. Щербатов // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4(42). – С. 129-140.
  7. *Brown, Liam, Joaquin Carrasco, and Simon Watson.* 2021. "Autonomous Elbow Controller for Differential Drive In-Pipe Robots" *Robotics* 10, no. 1: 28.
  8. *Z. Yu, Z. Xing, Z. Zirui, L. Qiang and F. Gao,* "Design and Implementation of Sewage Pipeline Cleaning Robot Based on Beidou Positioning," *2022 19th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, Chengdu, China, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCWAMTIP56608.2022.10016503.
  9. *B. Zhang, M. Abdulaziz, K. Mikoshi and H. Lim,* "Development of an In-pipe Mobile Robot for Inspecting Clefts of Pipes," *2019 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, Bangkok, Thailand, 2019, pp. 204-208, doi: 10.1109/CIS-RAM47153.2019.9095803.
  10. *Кадхим Дхиргаам.* Управление перемещением колесного робота в трубопроводах с переменным проходным сечением : специальность 05.02.05 "Роботы, мехатроника и робототехнические системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кадхим Дхиргаам. – Владимир, 2011. – 157 с.

**Кучев Дмитрий Николаевич**, аспирант кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д.9, 614000. E-mail: [kuchevdmitri@yandex.ru](mailto:kuchevdmitri@yandex.ru).

**Kuchev Dmitry Nikolaevich**, postgraduate student of the Department of Information Technologies and Automated Systems, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Professor Pozdееv str., 9, 614000, Russia. E-mail: [kuchevdmitri@yandex.ru](mailto:kuchevdmitri@yandex.ru) .

УДК 007:51

Хуссейн Фирас Айманович

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ**

*В данной работе проводилось исследование методов решения задачи мульти коммивояжера, и был предложен новый метод решения этой задачи на основе уменьшения размера пространства решений. Проводился сравнительный анализ предложенного метода с методом из литературы. Критерии оценки качества решения были время расчёта решения, суммарное длина маршрутов и максимальный по длине путь среде коммивояжёров. Предложенный метод превосходил по всем показателям.*

*Задача мульти коммивояжера; распределение задач; целераспределение; мультиагентные системы; централизованное управление; групповое управление.*

Houssein Fieas Aimanovich

## **DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CENTRALIZED TASK ALLOCATION IN MULTI-AGENT SYSTEMS\***

*In this paper, research was carried out on methods for solving the multi-traveling salesman problem, and a new method was proposed for solving this problem based on reducing the size of the solution space. A comparative analysis of the proposed method with a method from the literature was carried out. The criteria for assessing the quality of the solution were the time of calculating the solution, the total length of the routes and the maximum length of the path among traveling salesmen. The proposed method was superior in all respects.*

**Введение.** В последние годы интеллектуальные вычислительные технологии привлекают все больше внимания исследователей. Многие из этих технологий вдохновлены природными явлениями и пытаются использовать преимущества различных аспектов поведения живых организмов на разных уровнях их организации.

Харрат и коллеги [1] предложили гибридный алгоритм AC2OptGA для решения задачи MTSP, комбинируя генетический алгоритм (GA) и муравьиный алгоритм. В этом алгоритме муравьиная колония генерировала решения, а GA улучшал их. Гомес и соавторы [2] применили GA для задачи выбора маршрута транспортных средств (VRP) с целью оптимизации ежедневных маршрутов работников компании в Ковильяне, Португалия, минимизируя стоимость и расстояние.

Акбай и Калайчи [3] разработали решение на основе алгоритма поиска переменных окрестностей для задачи MTSP с учетом сбалансированной стоимости. Они использовали 22 набора данных разных масштабов для своих вычислений. Муньос-Эррера и Сучан [4] исследовали фитнес-ландшафт (FLA) для задач MTSP и CVRP, предложив новую меру FLA для анализа структуры фитнес-ландшафта и взаимосвязей с производительностью алгоритмов.

Сюй и Чжан [5] реализовали гибридный алгоритм сбалансированного MTSP, основанный на генетических алгоритмах и методе локального поиска (two-opt). Хуфи и коллеги [6] провели обзор литературы по задачам оптимизации траектории беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), связанным с задачами коммивояжера и VRP, предоставив обзор методов и показателей производительности.

Перейра и соавторы [7] разработали гибридный алгоритм GABC-LS для решения минимального MTSP, сочетая генетический алгоритм, пчелиный алгоритм и два метода локального поиска (move1-inside и two-opt).

Методика решения задач, основанная на поведении муравьев при поиске пищи (оптимизация колонии муравьев — ACO), доказала свою эффективность в различных задачах оптимизации [8, 9]. Оригинальный ACO был модифицирован для применения в разных областях, таких как задачи назначения, раскраска графов, планирование, проектирование схем, сети связи, биоинформатика и маршрутизация транспортных средств. Были разработаны расширения ACO, такие как элитарная AS [10], Ant-Q [11], Ant Colony System [12], ранговая AS [13], популяционная ACO [14], Beam-ACO [15] и другие. Впоследствии ACO объединяли с другими алгоритмами для

создания гибридных методов с целью улучшения результатов, примеры чего можно найти в работах [16-19].

Объём пространства решений задачи MTSP с  $n$  городами и  $m$  коммивояжёрами можно вычислить с помощью числа Лаха [20]. Беззнаковые числа Лаха рассчитываются по следующей формуле:

$$L(n, m) = \left(\frac{n!}{m!}\right)^2 * \frac{m}{n(n-m)!} \quad (1)$$

**Предложенный метод.** Предложенный метод реализуется в несколько этапов:

Шаг 1: Первоначально решается задача коммивояжёра, где предполагается, что количество агентов равно одному. Это позволяет определить оптимальный маршрут, который должен пройти один агент, чтобы посетить все задачи и вернуться в начальную точку.

Шаг 2: После решения задачи коммивояжёра получается оптимальная последовательность выполнения задач. Эта последовательность затем разделяется между несколькими агентами, стараясь распределить задачи между ними как можно более равномерно.

Шаг 3: Далее происходит комбинаторный процесс выбора оптимальных первых и последних задач для каждого агента. Это позволяет определить начальную и конечную точки маршрута для каждого агента таким образом, чтобы минимизировать общее время выполнения всех задач.

Таким образом, этот метод включает в себя два основных алгоритма:

- Алгоритм решения задачи коммивояжёра, который позволяет определить оптимальный маршрут для посещения всех задач и возврата в начальную точку одному агенту.
- Алгоритм деления решения задачи коммивояжёра на несколько агентов, который распределяет полученный оптимальный маршрут между несколькими агентами, стараясь добиться равномерного распределения задач и оптимального использования ресурсов.

В качестве алгоритма решения задачи коммивояжёра был выбран муравьиный алгоритм - это метаэвристический алгоритм оптимизации, вдохновленный поведением муравьев при поиске пищи. Он используется для решения задачи коммивояжера (TSP) и других задач комбинаторной оптимизации. Основные шаги муравьиного алгоритма при решении задачи коммивояжера можно найти в работе [19].

После нахождения оптимального пути для задачи TSP необходимо разделить его между агентами для решения задачи MTSP. Этот процесс

начинается с формирования матрицы расстояний между всеми городами, включая промежуточные города по маршруту.

Затем рассчитывается примерная длина маршрута ( $d^*$ ), которую каждый агент должен пройти. Путем перебора городов первого агента находится такой город, расстояние до которого на кусочно-ломаной траектории максимально близко к  $d^*$ . Эти города становятся центрами для каждого агента.

Далее каждый следующий агент выбирает город, следующий за последним городом предыдущего агента, и этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут назначены все агенты. Затем рассчитывается и сохраняется сумма длин маршрутов для всех агентов.

Начальный город первого агента изменяется с целью проверки всех возможных решений, после чего сохраняется решение с наименьшей суммой пройденных расстояний.

Таким образом, этот подход минимизирует суммарное расстояние, пройденное всеми агентами, за счет оптимизации решения задачи TSP и равномерного деления маршрута TSP на сегменты одинаковой длины для каждого агента. Размер пространства возможных решений составляет  $(n-1)! + n-1$ , где  $n$  - количество городов в задаче MTSP.

**Результаты и сравнения.** Для сравнения используется алгоритм ACO-BMTSP [35], который, как и предложенный метод, базируется на муравьином алгоритме. Оба алгоритма были реализованы на языке программирования Python. количество итераций (itr) составляет 350, количество муравьев (ant) - 80, а коэффициент испарения феромона (rho) установлен на уровне 0.4. Для исследования были подготовлены три эталонные задачи Eil51, KroA100, KroA150 с 51, 100 и 150 городами последовательно. Для каждой из этих задач были установлены три сценария с 3, 5 и 10 агентами. Каждый сценарий запускался по 100 раз для сбора статистических данных. Критерии оценки результатов включают:

- время расчета решения,
- суммарную длину пройденных агентами путей,
- максимальную длину пути среди всех маршрутов, пройденных агентами.

В таблице выражены преимущества предлагаемого метода в процентах по каждому из критериев оценки, которые рассчитывались следующим образом:

$$advantage_{\%} = \left(1 - \frac{criterion_{proposed}}{criterion_{ACO-BMTSP}}\right) * 100 \quad (2)$$



где  $advantage\%$  – преимущества в процентах,  $criterion_{proposed}$  – среднее среди 100 экспериментов значения заданного критерия для предлагаемого метода,  $criterion_{ACO-BMTSP}$  – среднее среди 100 экспериментов значения заданного критерия для алгоритма ACO-BMTSP.

Таблица 1. Средины выигрыш в процентах по времени ( $avg_{time}$ ), суммы длины маршрутов ( $avg_{sum}$ ), максимальный по длине маршрут среди всех агентов ( $avg_{max}$ ) при использовании предложенного метода для сценариев eil51, KroA100, KroA150.

Задача	Eil51			KroA100			KroA150		
	3	5	10	3	5	10	3	5	10
Кол. агентов	3	5	10	3	5	10	3	5	10
$avg_{time}$ (%)	48.26	49.19	41.06	52.78	54.34	47.81	67.27	55.19	49.19
$avg_{sum}$ (%)	6.07	4.84	2.36	12.57	11.58	12.89	19.15	18.62	16.42
$avg_{max}$ (%)	9.22	10.9	9.39	14.22	12.78	13.31	20.25	18.67	17.18

Сравнительный анализ в итоге продемонстрировал, что применение предложенного метода обеспечивает следующие преимущества:

- а) время расчета решения задачи MTSP сокращается в среднем на 52%;
- б) общая длина пройденного пути уменьшается в среднем на 12%;
- в) максимальная длина маршрута среди всех пройденных агентами (неравномерность нагрузки) сокращается в среднем на 14%.

**Заключение.** В данной работе проводилось исследование методов решения задачи мульти-коммивояжера, и был предложен новый метод, основанный на уменьшении размера пространства решений. Сравнительный анализ показал, что при использовании предложенного метода в среднем:

- Время расчета решения задачи мульти-коммивояжера сокращается на 52%.
- Общая длина пути уменьшается на 12%.
- Дисбаланс нагрузки уменьшается на 14%.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Harrath, Y., Salman, A.F., Alqaddoumi, A., Hasan, H., Radhi, A. A novel hybrid approach for solving the multiple traveling salesmen problem. Arab. J. Basic Appl. Sci. 2019. – С 103–112.

2. *Gomes D.E., Iglésias M.I.D., Proença A.P., Lima T.M., Gaspar P.D.* Applying a Genetic Algorithm to a m-TSP: Case Study of a Decision Support System for Optimizing a Beverage Logistics Vehicles Routing Problem. *Electronics* 2021.
3. *Akbay M.A., Kalayci C.B.* A Variable Neighborhood Search Algorithm for Cost-Balanced Travelling Salesman Problem. In *Proceedings of the Metaheuristics Summer School, Taormina, Italy, 2018*.
4. *Muñoz-Herrera S.; Suchan K.* Constrained Fitness Landscape Analysis of Capacitated Vehicle Routing Problems. *Entropy* 2022. – C. 53.
5. *Xu H.L., Zhang C.M.* The research about balanced route MTSP based on hybrid algorithm. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Communication Software and Networks, Chengdu, China, 2009*; – C. 533–536.
6. *Khoufi I., Laouiti A., Adjih C.* A Survey of Recent Extended Variants of the Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems for Unmanned Aerial Vehicles. *Drones* 2019. – C. 66.
7. *de Castro Pereira S., Solteiro Pires E.J., de Moura Oliveira P.B.* A Hybrid Approach GABC–LS to Solve MTSP. In *Proceedings of the Optimization, Learning Algorithms and Applications, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022*; – C. 520–532.
8. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization. *IEEE Comput. Intell. Mag.* 2006. – C. 28–39.
9. *Zhan S.C., Xu J., Wu J.* The optimal selection on the parameters of the ant colony algorithm. *Bull. Sci. Technol.* 2003. – C. 381–386.
10. *Dorigo M.* Optimization, Learning and Natural Algorithms. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milano, Italy, 1992.
11. *Gambardella L.M., Dorigo M.* Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem. In *Machine Learning Proceedings 1995*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1995. – C. 252–260.
12. *Dorigo M., Gambardella L.M.* Ant colonies for the travelling salesman problem. *Biosystems* 1997. – C. 73–81.
13. *Bullnheimer B., Hartl R., Strauss C.* A New Rank Based Version of the Ant System—A Computational Study. *Cent. Eur. J. Oper. Res.* 1999. – C. 25–38.
14. *Guntsch M., Middendorf M.* A population based approach for ACO. In *Proceedings of the Workshops on Applications of Evolutionary Computation, Kinsale, Ireland, 3–4 April 2002*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002; – C. 72–81.
15. *Blum C.* Theoretical and Practical Aspects of Ant Colony Optimization; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2004; Volume 282.

16. Хуссейн Ф. А., Финаев В. И. Исследование эффективности алгоритма искусственных потенциалов, муравьиного алгоритма и их комбинации при планировании траектории движения мобильного робота. Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2020), 2020. – С. 39-48.
17. Huang K.L., Liao C.J. Ant colony optimization combined with taboo search for the job shop scheduling problem. Comput. Oper. Res. 2008, – С. 1030–1046.
18. Xiao J., Li L. A hybrid ant colony optimization for continuous domains. Expert Syst. Appl. 2011. – С. 11072–11077.
19. Rahmani R., Yusof R., Seyedmahmoudian M., Mekhilef S. Hybrid technique of ant colony and particle swarm optimization for short term wind energy forecasting. J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 2013. – С. 163–170.
20. Lah Ivo A new kind of numbers and its application in the actuarial mathematics. Boletim do Instituto dos Actuários Portugueses. 1954. – С. 7–15.
21. de Castro Pereira S., Solteiro Pires E.J., de Moura Oliveira P.B. Ant-Balanced Multiple Traveling Salesmen: ACO-BMTSP. Algorithms 2023, – С. 37.

**Хуссейн Фирас Айманович** – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: firas94mecha@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89996379357; м.н.с.

**Houssein Fieas Aimanovich** – Joint-Stock Company “Robotics and Control Systems” e-mail: firas94mecha@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: 89996379357; junior researcher.

УДК 531.46

Наим Муханнад

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТУРНИКА, УСТАНОВЛЕННОГО В НАЧАЛЕ НА ВИБРИРУЮЩЕЙ ЖЕСТКОЙ ПЛАТФОРМЕ**

*Краеугольным камнем статьи является изучение возможности управлять комплексной схемой управления, основанной на специализированной гидравлической помощи, в системы вооружения с целью сведения к минимуму возмущений в сопле оружия для точного метания снаряда. Моделирование турбулентности в запальном сопле во время обжига, которое установлено на тележке, выполняется различными расчетными методами: с использованием жестких и гибких элементов. Различные типы элементов используются для построения*

*наилучшего варианта гибкой модели для конкретной расчетной схемы. Перед началом динамического моделирования выполняется анализ, основанный на методе конечных элементов. Это делается для сверки численных результатов расчета модели с экспериментальными данными. Имитация турбулентности пускового сопла продемонстрирована как по периоду, так и по частоте. Наконец, в будущем ожидается полный контроль над дульными отклонениями такого оружия.*

*Системы метательного оружия, грузовики, возмущения стреляющего сопла, динамика стрельбы из оружия, конечно-элементная модель, ограничения и граничные условия, анализ модели, упругая многочастица.*

Naim Muhannad

## **MODELING AND DYNAMIC ANALYSIS OF A HORIZONTAL BAR INSTALLED AT THE BEGINNING ON A VIBRATING RIGID PLATFORM**

*The cornerstone of the article is the study of the possibility of controlling an integrated control scheme based on specialized hydraulic assistance in weapons systems in order to minimize disturbances in the nozzle of the weapon for accurate projectile throwing. Turbulence modeling in the ignition nozzle during firing, which is mounted on a trolley, is performed using various computational methods: using rigid and flexible elements. Different types of elements are used to build the best variant of a flexible model for a specific calculation scheme. Before starting dynamic modeling, an analysis based on the finite element method is performed. This is done to verify the numerical results of the model calculation with experimental data. Simulation of the turbulence of the starting nozzle has been demonstrated both in period and frequency. Finally, full control over the muzzle deflections of such weapons is expected in the future.*

*Propellant weapon systems, trucks, firing nozzle disturbances, weapon firing dynamics, finite element model, constraints and boundary conditions, model analysis, elastic multiparticle.*

### **Введение**

Такая система вооружения сильно различается по размеру, мощности и конфигурации. Основные компоненты системы орудия часто встречаются в большинстве типов, таких как дульный тормоз, ствол, затвор пистолета, механизмы отдачи и обратного хода, спуск, подъемный механизм, втулка, уравновешиватель, револьвер, механизм перемещения, шасси, торсионная балка, колено баланса, амортизатор и т. д.. Здесь, в этой статье, интересуется

самоходная 122 мм, которая загружается на тяжелый военный грузовик специального назначения из-за высокой частоты его использования в современной военной тактике.

**Создание полной динамической модели системы.** Для создания точной мульти-тело динамической модели МДМ, адекватно отражающей реальность и гарантирующей точность результата, требуется тщательный подход к трем этапам, относящимся как к заданию входных параметров, так и к способу реализации. Эти этапы следующие: задание внешней нагрузки, условий соединения различных компонентов, особенно в контактных зонах между ними, перемещения каждого компонента. Такие ограничения, которые могут быть явно определены в выбранной системе отсчета.

**Измерение и определение огневых сил (возбуждений).** Центральная точка кольца верхней части шасси, окружающего основание орудия, выбрана в качестве точки приложения сил и начала глобальной системы отсчета. По этой причине все вычисления всех величин производятся относительно этой точки. На Рис.1 пунктирной линией представлены результаты измерений возбуждающих сил в выбранной системе координат. Для того чтобы получить истинные значения этих сил, избежав при этом влияния колебательных процессов, измерения проводились на специальном укрепленном тестовом орудии по показаниям тензодатчиков в течение 0.1 с. Силовые факторы не исчезают полностью спустя 0.1с, однако стремительно уменьшаются после завершения выброса газов в конце второй десятой секунды. Таким образом, часть огневой нагрузки будет игнорироваться. Отметим, что нагрузки рассчитываются при нулевом угле ствола к горизонту, так как в этом случае значение нагрузки в продольном направлении максимально. Прежде чем приступить к изучению модального анализа построенного МКЭ, отметим, что наиболее важным фактором, влияющим на точность стрельбы, является продольный изгиб. На рис(2) показано, что первой преобладающей собственной частотой ( $\omega$ ) является продольный изгиб - около 4,9 Гц, он оказывает большое влияние на возмущение передней части платформы (ВМ).

### **Выводы**

*Результаты моделирования.* Представлены результаты динамического моделирования выстрела для тематического исследования WS. Изучая эти цифры, необходимо пояснить некоторые результаты следующим образом:  
1- Общее время ответа для всех МТДМ составляет около 150 миллисекунд.  
2- Кривые моделирования совпадают в случае временной истории для

величины смещения контрольной точки стрельбы грузового автомобиля. Это связано с тем, что гибкость шасси грузового автомобиля не приводит к значительному изменению эталонных направлений смещения. 3- Максимальное задание смещения составляет около 27.19 мм во всех случаях МТДМ (Рис. 3), в то время как максимальное изменение угла места составляет около  $0.15^\circ$  в случае совершенно жесткого шасси (Рис. 3).

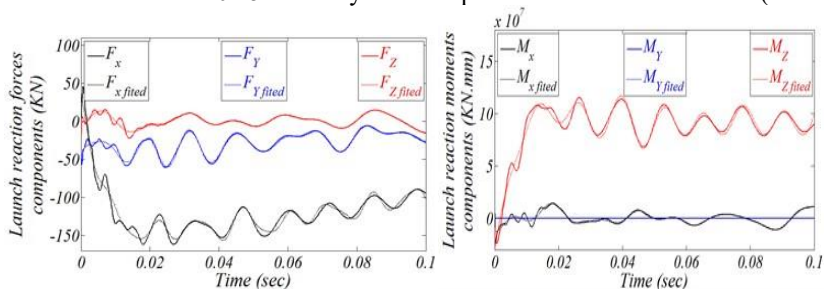


Рис.1 (а,б)

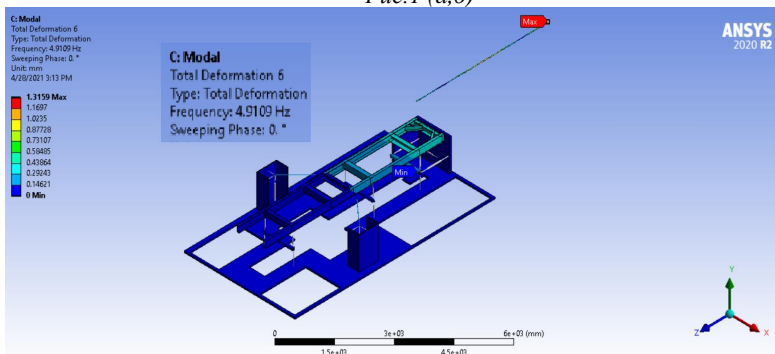


Рис.2

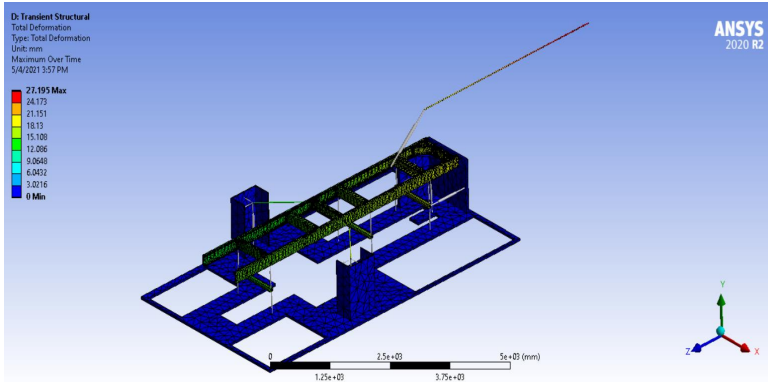


Рис. 3

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рахман Рослан Абд, Тамин Мохд Насир, Курди Оджо* (Rahman Roslan Abd, Tamin Mohd Nasir, Kurdi Ojo) Анализ напряжений большегрузного грузовика chassis в качестве предварительных данных для прогнозирования его усталостного ресурса с использованием МКЭ. *Jurnal Mekanikal*, Том 26, выпуск 1, 2008, с. 76-85.
2. *Раджаппан Р., Вивеканандхан М.* Статический и модальный анализ шасси с использованием FEA. *Международный журнал инженерии и науки*, том 2, 2013, с. 63-73.
3. *Тео Хан Фуй* "Статический и динамический анализ конструкции шасси грузового автомобиля весом 4,5 тонны". *Журнал механики*, том 24, 2007, с. 56-67.
4. *Цзя Цзянь, Чжэн Чанчжи* (*Jia Jian, Zheng Changzhi*), моделирование влияния конструктивных параметров на дульную вибрацию оружия и оптимизация с помощью метода SQP. *Китайский журнал машиностроения*, том 9, 2006.
5. *Рагаи А. Ратеб, Ян Гуолай, Ге Цзяньле* Анализ пространственных колебаний гаубицы, устанавливаемой на грузовом автомобиле. *Международный журнал моделирования и оптимизации*, том 6, Выпуск 2. 2016.
6. *Виттбротт Эдмунд, Адамец-Войчик Ивона, Войцех Станислав* Динамика гибких многотельных систем: метод жестких конечных элементов. Springer, 2007.

7. *Ragau A. Pateb, Ян Гулай, Ге Цзяньли* Провели модальный анализ сложной конструкции военных грузовиков. Журнал виброинженерии, том 17, выпуск 2, 2015, стр. 3147-3159.
8. *Ши Юэ-Донг, Ван Дэ-ши* Анализ вибрации морского орудия, основанный на теории минимальных ограничений Гаусса. Журнал военно-морского инженерного университета, том 5, 2009.
9. *Чжун С., Чжао Д., Сунь Ю., Вэй К.* Моделирование и модальный анализ шасси грузовых автомобилей на основе МКЭ. Журнал проектирования и производства машин, том 6, 2008.
10. Википедия, свободная энциклопедия, [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_howitzers](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_howitzers), 2015.

**Наим Муханнад** – аспирант в Национальном исследовательском университете «МЭИ», Москва, номер телефона +7 (906) 709 32 65, Энергетическая ул., д. 8к3, Москва, Россия.

**Naim Muhannad Muhammad** is a postgraduate student at the National Research University "MPEI", Moscow, tel. +7 (906) 709 32 65, Energeticheskaya str., 8 k 3, Moscow, Russia.

УДК 004.5

Чикрин Дмитрий Евгеньевич, Смольникова Камилла Рустемовна

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ**

*Коллаборативные роботы (коботы) работают «бок о бок» с операторами в целях повышения эффективности при выполнении совместных задач. Коботы проектируются специально для совместной работы с оператором в соответствии с техническими стандартами. Данная статья посвящена анализу технических стандартов, регулирующих использование коботов в промышленной среде. В статье рассматриваются основные технические стандарты безопасности, регулирующие проектирование, установку и эксплуатацию коботов. В основной части рассматриваются основные положения, касающиеся оценки рисков, ограничения мощности и силы, систем безопасности, мониторинга и обучения операторов. Анализ включает в себя обзор различных методов совместной работы, определенных в стандартах. В заключение статьи представлены рекомендации по дальнейшему развитию и совершенствованию стандартов*



*безопасности для обеспечения эффективного и безопасного взаимодействия оператора и кобота в совместном рабочем пространстве.*

*Коллаборативные роботы, безопасность, взаимодействие человека и робота.*

Chickrin Dmitry Evgenevich, Smolnikova Kamilla Rustemovna

## **TECHNICAL SAFETY STANDARDS FOR COLLABORATIVE ROBOTS**

*Collaborative robots (cobots) work «side-by-side» with operators to improve efficiency when performing joint tasks. Cobots are designed specifically to work together with the operator according to technical standards. This article analyzes the technical standards governing the use of cobots in industrial environments. The article reviews the main technical safety standards governing the design, installation and operation of cobots. The main part reviews the main provisions related to risk assessment, power and force limitation, safety systems, monitoring and operator training. The analysis includes a review of the various collaborative working methods defined in the standards. The paper concludes with recommendations for further development and improvement of safety standards to ensure effective and safe operator-cobot interaction in a collaborative workspace.*

*Collaborative robots, safety, human-robot interaction.*

### **Введение**

Коботы динамично внедряются на промышленных предприятиях, поскольку отличаются легкостью, компактностью, а также низкой стоимостью на фоне стоимости промышленных роботов. Скорость, сила и точность остаются важными функциональными характеристиками кобота, но для наиболее эффективного использования преимуществ совместной работы оператору и коботу необходимо работать в должной согласованности. Одновременно с этим для обеспечения безопасной совместной работы принципиально важно осознание коботами, где находятся операторы, как двигаются, в том числе какую силу прикладывают при намеренном либо непреднамеренном физическом контакте во время совместной работы.

**Совместная работа: стандарты безопасности для роботов, работающих совместно с оператором**

Ключевым фактором при разработке коллаборативных роботов в отличие от промышленных роботов заключается в том, что оператор и робот

делят одно и то же совместное рабочее пространство. При проектировании коботов производителю необходимо учитывать множество факторов, в частности: непредсказуемость движений оператора, безопасное реагирование, не применение чрезмерной силы при намеренном либо непреднамеренном физическом контакте.

В настоящее время коботы проектируются в соответствии с техническим стандартом, в котором подчеркивается важность целостности системы управления, связанной с безопасностью, реализуемая системой управления, особенно в отношении контроля таких параметров технологического режима, как скорость и сила [1]. Также указанный технический стандарт описывает общую информацию, на которую необходимо ориентироваться разработчикам для безопасной организации совместной работы с коботами, например, информацию о необходимости и важности проведения оценки рисков. Необходимо уделять особе внимание не только конструкции кобота, но и окружающей среде, например, если совместное рабочее пространство заблокировано препятствиями, оператор может оказаться в зоне защемления и быть поврежден коботом. Ключевые разделы стандарта описывают требования к организации совместных рабочих пространств, проектированию совместной работы и переходов между коллаборативными и неколлаборативными операциями. В частности, подробно описывается реализация следующих требований к совместной работе:

1. Контролируемая остановка с расчетной безопасностью. Данный метод совместной работы подразумевает предотвращение столкновений путем остановки кобота до того, как оператор окажется в зоне потенциальной опасности. Способы безопасной работы данного метода:

1.1. Определение зон. Совместное рабочее пространство представляет собой пространство, в котором кобот и оператор могут выполнять задачи одновременно [2]. Зона безопасности представляет собой зону внутри или вокруг совместного рабочего пространства, в котором доступ оператору ограничен, пока кобот движется [3].

1.2. Системы безопасности. В целях непрерывного мониторинга местоположения оператора в рабочей зоне кобот оснащается датчиками движения, лазерными сканерами или системами технического зрения [4]. Также система кобота запрограммирована на остановку или переход в безопасный режим, когда оператор входит в зону безопасности.

1.3. Расчетная безопасность. Перед внедрением системы проводится анализ рисков для определения необходимого уровня безопасности.

Система безопасности тестируется и валидируется, чтобы гарантировать, что робот остановится до того, как оператор окажется в опасности [5].

2. Ручное управление – метод коллаборативной работы, при котором оператор напрямую контролирует движения робота. Ручное управление – это метод коллаборативной работы, позволяющий сочетать навыки оператора с силой и точностью робота. Метод ручного управления не требует сложного программирования, оператор обучает робота управляя им по необходимой траектории. Такой сценарий идеально подходит для задач с переменными параметрами, которые требуют высокой гибкости и контроля со стороны оператора [6].

3. Контроль скорости и разделения. Данный метод предусматривает коллаборативную работу, поскольку позволяет оператору и роботу одновременно работать в одной зоне посредством постоянного поддержания защитного расстояния. Робот непрерывно отслеживает местоположение оператора и регулирует скорость. Способы безопасной работы данного метода:

3.1. Вокруг робота создаются динамические зоны безопасности с разными уровнями ограничений. Находясь на дальнем расстоянии от оператора, робот движется с максимальной скоростью. При приближении оператора робот автоматически снижает скорость. Робот останавливается в случае, если оператор продолжает приближаться, при этом время реакции на приближение оператора должно быть минимальным в целях избежания столкновения [7].

3.2. Для определения местоположения оператора и расчета расстояния используются, в частности, лазерные сканеры для создания двумерной карты окружающей среды и обнаружения препятствий, системы технического зрения, датчики приближения.

Данный метод требует более сложных систем восприятия и алгоритмов управления по сравнению с другими методами совместной работы. Также в данном методе возможны потенциальные ложные срабатывания, то есть датчики могут реагировать на посторонние объекты или шумы, вызывая нежелательные остановки робота [4].

4. Ограничение мощности и силы. Данный метод основан на проектировании и контроле робота таким образом, чтобы минимизировать силу удара и давления при столкновении, так как в данном методе возможен физический контакт во время совместной работы.

Ограничение мощности и силы подразумевает, что робот спроектирован и настроен таким образом, чтобы сила и энергия, прилагаемые им при контакте с человеком, оставались ниже опасного для человека уровня [11].

В приложении к техническому стандарту представлены рекомендации по определению пороговых значений таких параметров, как мощность, сила и скорость на основе данных о болевой чувствительности человека [5]. Конструктивные решения по снижению рисков для предотвращения квазистатического и кратковременного контактов:

4.1. Использование приводов с контролируемым крутящим моментом, ограничивающий силу, прилагаемую роботом.

4.2. Внедрение механических ограничителей диапазона движения для предотвращения столкновения с высокой энергией.

4.3. Использование мягких материалов, поглощающих энергию удара.

4.4. Использование пружин или других элементов, смягчающие удар в случае столкновения.

4.5. Использовать конструкцию робота без острых краев и углов с минимальной площадью поверхности, контактирующей с оператором.

Кроме того, необходимо тщательное тестирование робота в различных сценариях для проверки эффективности мер безопасности, а также подтверждение того, что остаточный риск после внедрения мер безопасности является приемлемым.

### **Выводы**

Внедрение роботов на производстве представляет собой значительный шаг вперед в развитии промышленной автоматизации. Однако, успешная интеграция роботов требует комплексного подхода к вопросам безопасности, начиная с этапа проектирования и заканчивая эксплуатацией. Разработчики и производители роботов должны нести ответственность за создание безопасных и надежных систем с учетом соблюдения рекомендаций и стандартов безопасности. Какие риски возникают при взаимодействии оператора и робота, как создать безопасную среду для совместного взаимодействия, как убедиться в безопасности системы робот-оператор? Понимая вышеперечисленных аспектов критически важно для успешного внедрения роботов на производство и создание безопасной и эффективной совместной работы оператора и робота.

В данной статье были рассмотрены ключевые аспекты обеспечения безопасности при совместной работе с роботами, включая: 1)

необходимость в оценке рисков на всех этапах жизненного цикла системы кобота; 2) выбор соответствующего метода взаимодействия с учетом конкретной задачи и окружающей среды; 3) проектирование рабочего пространства с учетом специфики совместной работы оператора и кобота; 4) проектирование интуитивно понятного интерфейса; 5) применение технических средств обеспечения безопасности; 6) внедрение надежных методов валидации и верификации для подтверждения соответствия системы требованиям безопасности; 7) обеспечение надлежащего обучения.

Для максимально эффективного и безопасного внедрения коботов стандарты должны быть гибкими и своевременно адаптироваться к новым технологиям, таким как искусственный интеллект, машинное обучение и тактильные датчики, которые могут значительно повысить безопасность взаимодействия оператора и кобота. Разработка отраслевых стандартов для различных отраслей позволит учесть специфические риски и требования безопасности каждой сферы. Внедрение системы сертификации и квалифицированное обучение операторов повысит доверие к коллаборативной робототехнике.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 60.1.2.3-2021/ISO/TS 15066:2016. Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком // СПС КонсультантПлюс.
2. ГОСТ ИСО 13855-2006. Безопасность оборудования. Расположение защитных устройств с учетом скоростей приближения частей тела человека // СПС КонсультантПлюс.
3. Fast and Safe Trajectory Planning: Solving the Cobot Performance/Safety Trade-Off in Human-Robot Shared Environments // researchgate.net URL: <https://www.researchgate.net/publication/351303372> (дата обращения: 02.05.2024).
4. A review of external sensors for human detection in a human robot collaborative environment // researchgate.net URL: <https://www.researchgate.net/publication/379567349> (дата обращения: 02.05.2024).
5. ГОСТ Р 60.1.2.2- 2016/ИСО 10218-2:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 2 // СПС КонсультантПлюс.

6. Manual Control Approach to the Teaching of a Robot Task // researchgate.net URL: <https://www.researchgate.net/publication/3114436> (дата обращения: 02.05.2024).
7. Optimization of the Speed & Separation Monitoring Protective Separation Distance in Human-Robot Collaboration Safety Systems // researchgate.net URL: <https://www.researchgate.net/publication/369995431> (дата обращения: 02.05.2024).

**Чикрин Дмитрий Евгеньевич**, доктор технических наук, директор, Институт искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, город Казань, ул. С. Сайдашева, зд.12, 420129, телефон: +7 843 233 75 76, email: [dmitry.kfu@ya.ru](mailto:dmitry.kfu@ya.ru).

**Смольникова Камилла Рустемовна**, аспирант, Институт вычислительной математики и информационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, город Казань, ул. Кремлевская 35, 42011, телефон: +7 965 589 99 66, email: [krsmolnikova@mail.ru](mailto:krsmolnikova@mail.ru).

**Chickrin Dmitry Evgenevich**, Doctor of Technical Sciences, Director, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and Systems Engineering, Kazan Federal University, S. Saidasheva, 12, Kazan 420129, Kazan, Russia; [dmitry.kfu@ya.ru](mailto:dmitry.kfu@ya.ru)

**Smolnikova Kamilla Rustemovna**, Post-graduate student, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, Kazan Federal University, 35 Kremlevskaya st., 42011, Kazan, Russia, email: [krsmolnikova@mail.ru](mailto:krsmolnikova@mail.ru).

УДК 621.3

Слюсаренко Михаил Анатольевич, Веревкина Лина Станиславовна

### **КВАДРОКОПТЕР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ОБЪЕКТОВ**

*Использование дистанционного тепловизионного контроля оборудования при решении задач определения температурных режимов работы оборудования, зданий, занимающего большие объемы в пространстве, при ограниченном доступе и необходимости быстрых измерений. Цель - разработка устройства для дистанционного тепловизионного контроля оборудования и зданий на базе*

*квадрокоптера. Задачи разработать квадрокоптер дистанционного тепловизионного контроля, для получения тепловой картины обследуемого объекта, с цветовой шкалой температуры.*

*Дистанционный, тепловизионный контроль, квадрокоптер, тепловизоры, тепловая картина, цветовая шкала температуры.*

Slyusarenko Mikhail Anatolyevich, Verevkin Lina Stanislavovna

## **QUADROPTER FOR REMOTE THERMAL IMAGING CONTROL OF EQUIPMENT AND OBJECTS**

*The use of remote thermal imaging control of equipment in solving problems of determining the temperature conditions of equipment, buildings that occupy large volumes in space, with limited access and the need for rapid measurements. The goal is to develop a device for remote thermal imaging control of equipment and buildings based on a quadcopter. Tasks to develop a remote thermal imaging quadcopter to obtain a thermal picture of the object under examination, with a color temperature scale.*

*Remote, thermal imaging control, quadcopter, thermal imagers, thermal pattern, color temperature scale.*

**Введение.** Использование дистанционного тепловизионного контроля электротехнического оборудования при решении задач определения температурных режимов работы оборудования, после возникновения короткого замыкания, ударов молнии, ремонта оборудования, обследование зданий и объектов, занимающих большие объемы в пространстве, при ограниченном доступе и необходимости быстрых измерений. Поэтому разработка устройства для дистанционного тепловизионного контроля электротехнического оборудования на базе квадрокоптера актуальна для настоящего времени.

**Постановка задачи.** Для дистанционного тепловизионного контроля предлагается использовать квадрокоптер, на который устанавливается тепловизионная камера позволяющая строить тепловизионную картину электротехнического оборудования.

**Разработка устройства.** В РФ разработаны нормативные документы, методика определения тепловыделений от электротехнического оборудования, соответствующих стандартам серий ИЕС 60297 И ИЕС [1, 2], а в условиях севера необходима теплоизоляция электротехнического оборудования и разработаны требования к материалам теплоизоляции [3].

Развитие тепловизионной техники с применением дронов позволяют контролировать состояние электротехнического оборудования. Такой подход незаменим при необходимости быстрого обследования больших размеров, протяженных, громоздких или труднодоступных объектов, а также при наличии вредных или опасных для человека факторов среды.

Для дистанционного тепловизионного контроля электротехнического оборудования на базе квадрокоптера разработана структурная схема, приведенная на рис. 1. Дистанционное управление движением квадрокоптера посредством пульта управления.

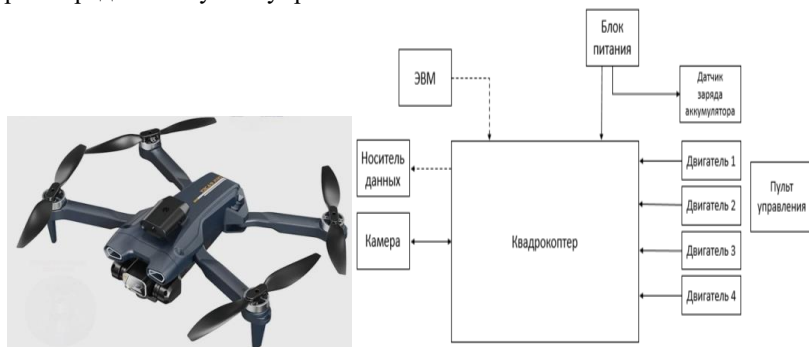


Рис. 1. Структурная схема на базе квадрокоптера A9 PRO для дистанционного тепловизионного контроля электротехнического оборудования

Запись тепловой картины оборудования камерой осуществляется на карты памяти или передается во время обследования. После обследования оборудования, информация с карты памяти загружается в компьютер и строится тепловая картина оборудования в цвете, программное обеспечение позволяет получать цветное изображение в каждой точке картины соответствующее измеренной температуре.

**Реализация структурной схемы.** Выбор дрона для дистанционного тепловизионного контроля электротехнического оборудования выполнен в результате анализа технико-экономических характеристик квадрокоптеров приведенных в табл. 1.

Таблица 1.

Технико-экономические характеристики квадрокоптеров

Наименование, (тип)	Цена, руб	Радиус действия, м	Частоты Wi-Fi	Время работы, мин	Макс. скорость, км/ч	Передача данных



E99PRO AIRCRAFT	2 192	500	2.4 ГГц	60	20	Трансляция
EVOLUCE	2 933	120	2.4/5 ГГц	15	20	Трансляция
A9 PRO	5 057	150	2.4 ГГц	60	100	Трансляция и карта памяти
BROADREAM FPV	11 946	5000	5 ГГц	60	150	Трансляция и карта памяти
DJI Mini 2 SE	44 602	10000	-	31	56	Карта памяти
FIMI X8 SE V2	59 265	10000	-	35	65	Трансляция на пульт

Из табл. 1 выбирается квадрокоптер A9 PRO (рис. 1), недорогой с временем полета 60 минут и скоростью полета 100км/час, с возможностью трансляции и записи тепловой картины на карту памяти.

В результате анализа технико-экономических характеристик, приведенных в таблице 2 тепловизоров (рис.2), выбран современный тепловизор Fawoonu TI (Fawoonu Termal Imager) для контроля температуры оборудования.



Рис. 2. Вид тепловизоров

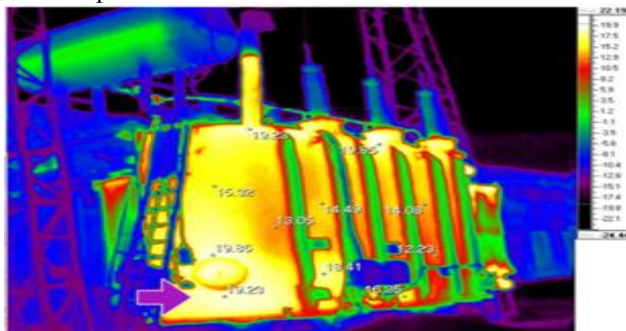
Таблица 2.

#### Характеристики современных тепловизоров TI (Termal Imager)

Наименование	Цена, руб	Дальность, м	Диапа-зон, °С	Погрешность °С	Разрешение	Вес, г
1 Fawoonu TI	5 564	-	-20 до 80	3	32*32	11
2 Guide MobiR Air	16 802	200	-20 до 120	5	120*90	18,2
3 P2 PRO	27 506	200	-20 до 600	3	260*195	9
4 T2 PRO	36 278	720	0 до 80	3	256*192	25
5 T3 PRO	78 564	3 200	-20 до 400	2	384*288	40

Устанавливаем тепловизионную камеру Fawoonu TI на квадрокоптер типа A9 PRO, который необходимо модифицировать. Модификация заключается в интеграции тепловизионного оборудования в систему квадрокоптера A9 PRO и разработки программного обеспечения (ПО). Для компьютера ПО с учетом конкретной задачи, например, для тепловизионного обследования

ЛЭП или трансформаторных подстанций на предмет дефектов и указания повреждений GPS-маркерами для ремонтной бригады. Управление квадрокоптера A9 PRO осуществляется посредством пульта управления. Примеры полученных результатов компьютерного моделирования тепловых картин электротехнического оборудования в цветах соответствующих шкале температур приведены на рис 3.



*Рис. 3. Тепловая картина электротехнического оборудования в цветах со шкалой температуры*

**Результаты.** В статье определена структура квадрокоптера дистанционного тепловизионного контроля оборудования, предложена ее реализация на базе недорогого квадрокоптера A9 PRO и современного тепловизора типа Fawoonu T1.

**Выводы.** В статье рассмотрен инновационный подход контроля и диагностики состояния и исследования температуры электротехнического оборудования в цветах, соответствующих шкале температур, посредством современных средств тепловизора типа Fawoonu Terna Imager установленного на недорогой высокотехнический квадрокоптер A9 PRO. Предложенная разработка позволяет быстро и качественно определять температуру оборудования и объектов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 31913-2022 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения»
2. ГОСТ Р 56972-2016/IEC/TS 62610-2:2011. Управление температурными режимами шкафов, соответствующих стандартам серий IEC 60297 И IEC 60917

3. РД 22.18-355-89 Методика определения тепловыделений от электротехнического оборудования

**Слюсаренко Михаил Анатольевич**, студент группы РТб04-40, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, 864022, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, e-mail: [Msljusarenko@sfedu.ru](mailto:Msljusarenko@sfedu.ru).

**Веревкина Лина Станиславовна**, к.т.н., доцент кафедры электротехники и мехатроники, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, 864022, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, e-mail: [lverevkina@sfedu.ru](mailto:lverevkina@sfedu.ru).

**Slyusarenko Mikhail Anatolyevich**, student of the RTb04-40 group, Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 864022, Taganrog, st. Shevchenko, 2, e-mail: [Msljusarenko@sfedu.ru](mailto:Msljusarenko@sfedu.ru).

**Verevkina Lina Stanislavovna**, Ph.D., Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 864022, Taganrog, st. Shevchenko, 2.

УДК 621.548:621.31:004.94

Светличный Никита Игоревич

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРЯНОГО КОЛЕСА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ**

*В работе осуществлено численное моделирование характеристик ветряного колеса горизонтально-осевой ветроэнергетической установки малой мощности. Дано обоснование актуальности исследования и разработки ветроэнергетических систем, приведена разработанная схема модели ветряного колеса ветроэнергетической установки в программной среде визуального моделирования Engae с использованием блоков базовой библиотеки, описаны ее основные элементы, исходные и получаемые в результате моделирования характеристики.*

*Модель ветрогенератора, визуальное моделирование, ветряная турбина, ветряное колесо, механическая мощность.*

Svetlichnyi Nikita Igorevich

## NUMERICAL SIMULATION OF WIND WHEEL CHARACTERISTICS OF A WIND-DRIVEN GENERATOR WITH A HORIZONTAL AXIS

*The paper presents a numerical simulation of the characteristics of a wind wheel of a low-power horizontal-axial wind-driven generator. The relevance of the research and development of wind energy systems is substantiated, the developed diagram of the wind wheel model of a wind energy generator in the Engee visual modeling software using blocks of the basic library is presented, its main elements, initial and resulting characteristics are described*

*Wind generator model, visual modeling, wind turbine, wind wheel, mechanical power.*

### **Введение**

Необходимость экономии запасов невозобновляемого ископаемого топлива, снижения объемов выбросов вредных веществ в атмосферу и диверсификации источников энергии обуславливает актуальность развития возобновляемой энергетики, представленной, в основном, различными электрогенерирующими системами, использующими энергию солнца и ветра. Лидерами в области возобновляемой энергетики являются, как правило, промышленно-развитые страны, имеющие доступ к самым современным технологиям в энергетике.

При этом доля возобновляемых источников, таких как ветрогенераторы, в структуре общей генерации непрерывно растет, повышается спрос на разработку и проектирование различных конструкций ветроэнергетических установок. Однако не все регионы обладают значительным потенциалом для использования энергии ветра, поэтому актуальной является задача повышения эффективности преобразования энергии ветра, расчета необходимых характеристик ветряная турбины под конкретные условия и построения наглядных моделей, позволяющих исследовать этот вопрос [1] – [2].

### **Основная часть**

Принцип работы ветряного колеса электрогенератора заключается в следующем. Кинетическая энергия воздушного потока воздействует на ветроколесо, которое осуществляет преобразование этой энергии в механическую и передает ее вал установки [3] – [4].

Кинетическая энергия воздушного потока прямо пропорциональна массе  $m$  (кг) квадрату скорости  $V$  (м/с) и характеризуется известной формулой:

$$E = \frac{m \cdot V^2}{2}, \text{ Дж.}$$

Преобразуем эту формулу, заменив массу воздуха на массовый расход через площадь сечения потока  $F$  со скоростью  $V$  и плотностью  $\rho$  :

$$M = \rho \cdot V \cdot F, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Получим выражение для мощности потока воздуха, выразив его с помощью двух предыдущих соотношений:

$$P = \frac{\rho \cdot V^3 \cdot F}{2}, \text{ Вт.}$$

При воздействии потока воздуха на лопасти ветроколесу сообщается только часть энергии. Учтем эту разницу с помощью коэффициента мощности  $C_p$ :

$$P = C_p \frac{\rho \cdot V^3 \cdot F}{2}, \text{ Вт.}$$

Применим формулу для нахождения площади сечения  $F$  через радиус ветряного колеса  $R$

$$P = C_p \frac{\rho \cdot \pi \cdot V^3 \cdot R^2}{2}, \text{ Вт.}$$

Коэффициент мощности  $C_p$  можно охарактеризовать следующим соотношением:

$$C_p = 4 \cdot a(1 - a^2).$$

Здесь через  $a$  обозначен коэффициент торможения потока, определяемый выражениями

$$a = \frac{V - V'}{V} = \frac{V - V''}{2V},$$

где  $V$  – невозмущенная скорость потока,  $V'$ ,  $V''$  – скорости потока воздуха в плоскости лопастей и за ветроколесом соответственно, м/с. Численно реальные значения коэффициента мощности  $C_p$  лежат в диапазоне 0,4–0,5 [4] – [5].

Отношение скорости точки на самом конце лопасти ветроколеса к скорости ветра, который воздействует на установку, называется быстроходностью  $Z$  [4]:

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V},$$

где  $\omega$  – угловая скорость, рад/с.

Оптимальная быстроходность и количество лопастей  $N$  связаны формулой:

$$Z_{\text{опт}} = \frac{4 \cdot \pi}{N}.$$

Считается, что 3-х лопастные турбины обладают оптимальными характеристиками, поэтому ими оснащены  $\frac{3}{4}$  всех используемых ветроустановок.

Отношение мощности ветроколеса к угловой скорости характеризует крутящий момент на валу, который можно определить с помощью соотношения:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{C_p \cdot F \cdot \rho \cdot V^3 \cdot R}{2ZV}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$$

Обозначим отношение коэффициента мощности  $C_p$  и быстроходности  $Z$  через  $C_m$  – коэффициент крутящего момента

$$C_m = \frac{C_p}{Z}$$

Тогда выражение для крутящего момента на валу примет вид:

$$M = C_m \frac{\pi \cdot \rho \cdot V^2 \cdot R^3}{2}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$$

По приведенным соотношениям построена модель ветроколеса в программном комплексе Engee [6]. Это российская платформа для модельно-ориентированного проектирования, позволяющая моделировать и исследовать сложные технические системы и алгоритмы работы. Система представляет собой среду для инженерных исследований, сочетающую инструменты для программирования расчетов и алгоритмов и программную оболочку для динамического моделирования с помощью блок-схем. На рис. 1 приведена общая схема модели, включающая подсистему, в которой реализован основной алгоритм расчета, блоки, задающие исходные параметры, такие как скорость ветра и радиус ветроколеса, и блоки, логирующие результаты моделирования.

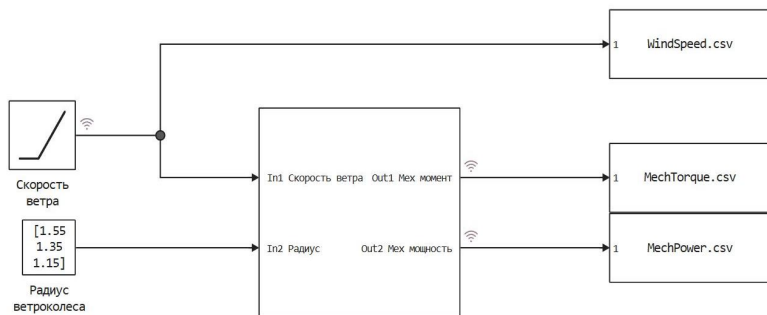


Рис.1. Общая схема модели ветроколеса ветроэнергетической установки

На рис. 2 приведена схема подсистемы, построенная на основе приведенных соотношений, осуществляющая расчет механической мощности и момента ветроколеса ветроэнергетической установки. Здесь же задаются дополнительные параметры, необходимые для расчетов [5].

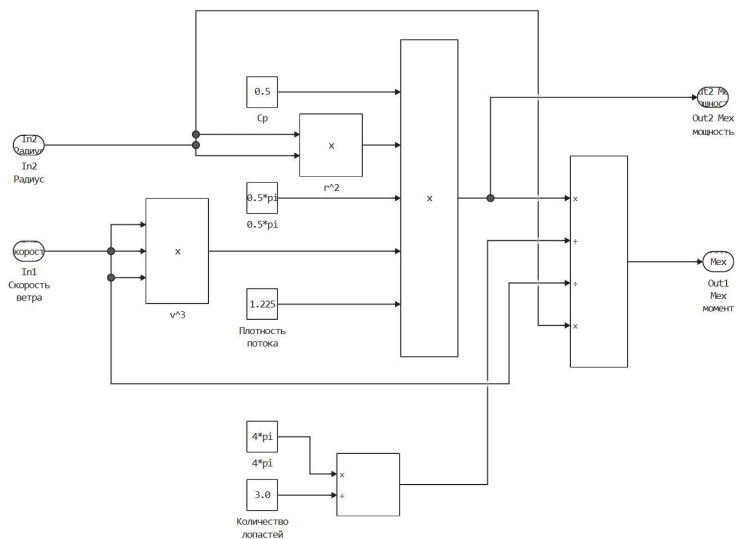


Рис.2. Схема подсистемы модели, реализующая зависимости мощности и момента ветроколеса

Результаты моделирования в виде графиков приведены на рис. 3, описывающие зависимость механической мощности и момента ветроколеса от скорости ветра при различных диаметрах ветроколеса (1.55, 1.35 и 1.15 метра). Графики демонстрируют нелинейную зависимость конструктивных и мощностных параметров ветроколеса. Вопросы моделирования и проектирования электрических схем, исследования электроэнергетических характеристик систем подробнее рассмотрены в работах [7] – [12].

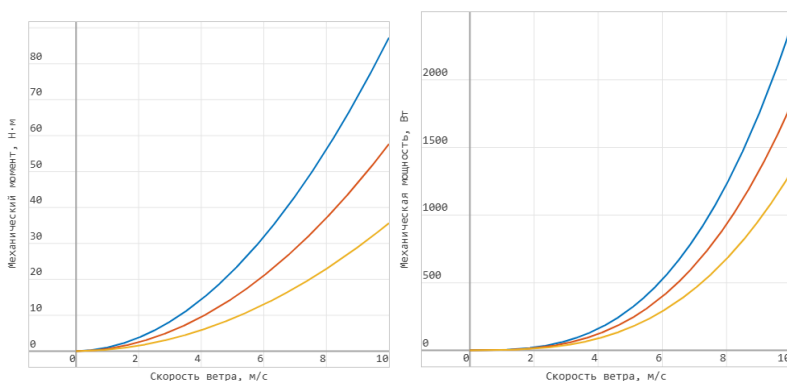


Рис.3. Графики, демонстрирующие зависимость механической мощности и момента ветроколеса от скорости ветра при диаметрах ветроколеса равных 1.55, 1.35 и 1.15 метра

## Выводы

В работе осуществлено численное моделирование характеристик ветряного колеса горизонтально-осевой ветроэнергетической установки малой мощности. Дано обоснование актуальности исследования и разработки ветроэнергетических систем, приведена разработанная схема модели ветряного колеса ветроэнергетической установки в программной среде визуального моделирования Engae. Получены графики, демонстрирующие зависимость механической мощности и момента ветроколеса от скорости ветра при различных диаметрах ветроколеса. Полученную модель можно использовать для построения комплексной модели ветроэнергетической установки, а результаты моделирования – при проектировании конструкции и схемы ветрогенератора.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Елистратов В.В., Кузнецов М.В., Лыков С.Е.* Ветроэнергостановки. Автономные ветроустановки и комплексы: учебное пособие. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", 2008. – 100 с. – EDN RXWBVZ
2. *Гисцов В.Г., Волощенко Ю.П.* Расчет и выбор электрооборудования ветроэнергетической установки малой мощности для электроснабжения жилого загородного дома // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2021): материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Таганрог: Издательство ЮФУ, 2021. – С. 49-56. – EDN TOAVVU
3. *Канов Л.Н.* Схемное моделирование ветроэлектрических установок в системе распределенного электроснабжения // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международный сборник научных трудов. Том Выпуск 14. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. – С. 117-125. – EDN YWLGUE
4. *Гавриленко В.В.* Выбор проектных параметров ветроколеса ветроэнергетической установки. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 128 с. – EDN QMIPRB
5. *Батагов К.А., Гисцов В.Г., Волощенко Ю.П.* Исследование характеристик модели автономной электрической системы с маломощной ветроэнергетической установкой // Проблемы современной системотехники: сборник научных статей. Том Выпуск XIV. – Таганрог: ИП Ступин С.А, 2020. -вып.XIV. С.63-69. – EDN: KYGEAE
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610334 Российская Федерация. Среда моделирования и технических вычислений ENGEE: № 2021682369 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 11.01.2022 ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "РИТМ". – EDN INVVEG
7. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Основы теории одномерной нелинейной электрической и электронной волновой цепи: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2015. – 100 с. – EDN: VGYXNH
8. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование нелинейных электрических процессов в элементах электронной волновой цепи: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2018. – 116 с. – EDN: YTPREQH

9. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование электронных компонентов интегральных схем методами теории электрических цепей. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2017. – 111 с. – EDN: YHOZPL
10. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование и исследование источника электрической энергии на фотоэлектронных модулях с преобразователем и нагрузкой // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: Материалы XXX научной конференции. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2023. – С. 74-77. – EDN WGUBPS
11. *Волощенко Ю.П., Волощенко П.Ю.* Нелинейные электрические колебания в электронной цепи учебное пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2020. 106 с. – EDN: WKEECE
12. *Бурьков Д.В., Волощенко Ю.П.* Математическое и имитационное моделирование электротехнических и робототехнических систем: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2020. – 159 с. – EDN: EGHJRJ

**Светличный Никита Игоревич**, студент гр. РТб03-31, кафедра электротехники и мехатроники, Южный федеральный университет, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; e-mail: svetlichnyi@sfedu.ru.

**Svetlichnyi Nikita Igorevich**, student gr. RTb03-31, Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; e-mail: svetlichnyi@sfedu.ru.

УДК 621.311.24

Мильчуков Иван Андреевич

## **РАСЧЕТ И ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА**

*Работа посвящена вопросам расчета и выбора электрооборудования для автономной системы энергоснабжения жилого коттеджа на основе ветроэлектрической установки малой мощности. Расчет проведен на основе данных по электроприемникам коттеджа. Учтены имеющиеся условия по скорости ветра в месте размещения установки. Выбрано защитное и преобразовательное*

*электрооборудование. Предусмотрена возможность для накопления электроэнергии и источник дополнительной мощности.*

*Ветроэлектрическая установка, система энергоснабжения, выпрямитель напряжения, инвертор напряжения, аккумуляторная батарея, дизельный генератор.*

Milchukov Ivan Andreevich

## **CALCULATION AND SELECTION OF ELECTRICAL EQUIPMENT FOR AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM BASED ON A WIND GENERATOR**

*The work is devoted to the calculation and selection of electrical equipment for an autonomous power supply system for a residential cottage based on a low-power wind turbine. The calculation was carried out on the basis of data on the cottage's electrical receivers. The existing wind speed conditions at the installation location are taken into account. Protective and converter electrical equipment has been selected. There is an opportunity for the accumulation of electricity and a source of additional power.*

*Wind turbine, power supply system, voltage rectifier, voltage inverter, battery, diesel generator.*

### **Введение**

Развитие современных технологий в электроэнергетике позволяет осваивать, делать доступными и эффективными новые источники электроэнергии. Например, известно, что доля ветряной генерации в странах Евросоюза общемировая тенденция провоцирует повышенный спрос не только на значительно выросла за последние годы и составила 18% от общего объема производимой электроэнергии. Активно ветроэнергетика развивается в Китае и Индии, есть некоторые успехи в этой области и в нашей стране. Такая мощные ветроэлектрические установки, но и на ветрогенераторы малой мощности, которые можно использовать для электроснабжения как городских домов, так и удаленных коттеджей сельской местности [1], [2].

### **Основная часть**

Принцип работы системы энергоснабжения на основе ветроэлектрической установки состоит в следующем. Вал генератора установки вращается за счет воздействия ветра на лопасти ветроколеса. При этом в обмотках

генератора индуцируется электрический ток варьируемой переменной частоты и амплитуды. Перед подачей потребителям напряжение и ток от ветрогенератора требуется сначала преобразовать в постоянный, запитать им блоки аккумуляторов (АБ) и передать далее в инвертор для преобразования опять в переменный, но уже управляемой требуемой частоты и амплитуды [3].

В дополнение к ветроэлектрической установке (ВЭУ) оправданным является использование дизельной энергии: обеспечивается дополнительная мощность; энергия ветра непостоянна; технология изготовления дизельных установок хорошо освоена, что обуславливает их более низкую стоимость. Дизельная электростанция (ДЭС) предназначена для энергоснабжения объекта во время отсутствия питания от ветроэлектрической установки.

Таким образом, структурная схема энергоснабжения объекта выглядит следующим образом (рис. 1) [4].

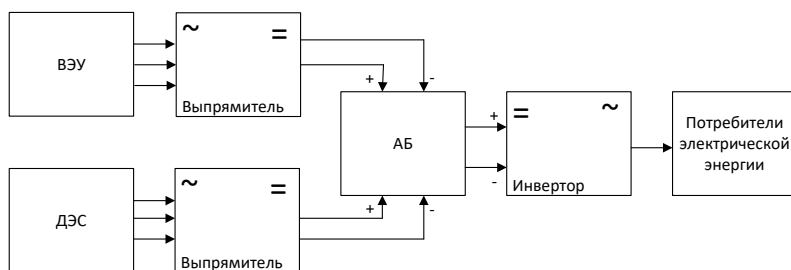


Рис. 1. Структурная схема энергоснабжения объекта

Основными электроприемниками в доме являются: мультимедиа центр, компьютер, посудомоечная и стиральная машины, кухонный комбайн, микроволновая печь, утюг, электроплита, электрочайник, пылесос, фен и освещение. По методике, приведенной в [3], [5] рассчитываем пиковую мощность, потребляемую коттеджем, которая получается равной 8120 Вт. Это означает, что необходимо выбирать инвертор с мощностью  $P_{инв} > 8120$  Вт. Принимаем мощность инвертора для данной энергосистемы равную  $P_{инв}=12000$  Вт. Просуммировав установленную мощность электроприборов и умножив ее на время использования, получим, что коттеджу за сутки необходимо 8460 Вт·час электроэнергии.

Выберем электрооборудование для разрабатываемой энергосистемы коттеджа с ветроэлектрической установкой.

Мгновенная мощность ветроустановки зависит от скорости ветра на местности. Для выбранной местности она равна 5 м/с [1]. Найдем усредненное за час потребление энергии в системе коттеджа из исходных данных [5], [6]. Эта величина определяется путем деления определенного ранее энергопотребления коттеджа за сутки  $E_{\text{кот.сут}}$  на количество часов в сутках.

$$E_{\text{кот.час}} = \frac{E_{\text{кот.сут}}}{24} = \frac{8460}{24} = 352,5 \text{ Вт} \cdot \text{час}$$

Найдем мощность ветроустановки для проектируемой системы электроснабжения. Для этого разделим величину энергопотребления коттеджа  $E_{\text{кот.час}}$  на один час.

$$P_{\text{спец}} = \frac{E_{\text{кот.час}}}{1} = \frac{352,5}{1} = 352,5 \text{ Вт}$$

При этом получится мгновенная мощность, которую ветроустановка отдает в нагрузку в условиях средней скорости ветрового потока.

Мощность ветроустановки  $P_{\text{мгнВЭУ}}$  необходимо выбирать по средней скорости ветрового потока таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$P_{\text{мгнВЭУ}} \geq P_{\text{спец}}, \text{ Вт.}$$

Если средняя скорость ветра в данном регионе недостаточна для запуска и получения требуемой мощности от определенного типа ветрогенератора, можно вместо одного мощного ветрогенератора установить два меньшей мощности. При этом потребуются меньшая скорость ветра для обеспечения условий запуска ветроустановки. Определенная для данного региона средняя скорость ветра равна 5 м/с [1], что недостаточно, согласно таблице 1, для обеспечения питания нагрузки. Применим две ветроустановки ВЭУ-3. Проверяем выполнение неравенства для  $P_{\text{мгнВЭУ}}$  и  $P_{\text{спец}}$ :

$$P_{\text{мгнВЭУ}} \geq P_{\text{спец}} \text{ или } 2 \cdot 400 \geq 352,5$$

Зависимость отдаваемой мощности турбины ВЭУ-3 от скорости ветра приведена табл.1.

Таблица 1

Мощность и выработка энергии ВЭУ-3

Скорость ветра v, м/сек	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Мгновенная мощность $P_{\text{мгнВЭУ}}$ , Вт	60	200	400	700	1100	1700	2500	2900	3300	3400
Суточная выработка $E_{\text{сутВЭУ}}$ , кВт·час	1,4	4,8	9,6	16,8	26,4	40,8	60,0	69,6	79,2	81,6

За сутки ветроустановка ВЭУ-3 генерирует

$$E_{\text{сутВЭУ}} = 9,6 \text{ кВт} \cdot \text{час}$$

Для двух выбранных ветроустановок объем полученной электроэнергии составит:

$$E_{\text{сут}2\text{ВЭУ}} = 9,6 \cdot 2 = 19,2 \text{ кВт} \cdot \text{час} = 19200 \text{ Вт} \cdot \text{час}$$

Получается, что две выбранные ветроустановки ВЭУ-3 способны перекрыть суточные потребности коттеджа в электроэнергии

$$E_{\text{сут}2\text{ВЭУ}} \geq E_{\text{сут}} \text{ или } 19200 \text{ Вт} \cdot \text{час} \geq 8460 \text{ Вт} \cdot \text{час}$$

Таким образом, выбор двух ветроустановок ВЭУ-3 в процессе проектирования как источников в системе электроснабжения коттеджа является оправданным. Внешний вид мачты и ветроколеса ВЭУ-3 приведен на рисунке 2. Согласно паспортным данным, номинальная мощность каждой установки равна 3 кВт. ВЭУ-3 включает следующие компоненты: мачта 12 м, ступица, лопасти (3 шт.), крепежи.



*Рис. 2. Ветроэлектрическая установка ВЭУ-3*

В качестве выпрямителя выбирается тиристорный выпрямитель напряжения трехфазный ТВН-3.

При проектировании инверторов для системы электроснабжения необходимо принимать во внимание их стоимость в зависимости от типа. Квазисинусоидальный инвертор, как правило, дешевле синусоидального в 2 и более раз, поэтому рационально применить инверторы обоих типов. Однако это потребует предусмотреть в проекте две отдельные линии от разных типов инверторов для питания соответствующих типов нагрузок и обеспечения небольшого запаса по мощности [6]. Образуют две группы из электроприборов, составляющих нагрузку. С учетом мощности электроприборов во

время вечернего пика потребления, которые требуют питания от синусоидального инвертора, выбираем инвертор МАП Pro мощностью 4,5 кВт и квазисинусоидальный инвертор МАП Pro мощностью 7 кВт.

Используя данные, полученные при расчете энергии, потребляемой коттеджем, выберем тип и количество аккумуляторных батарей. В данном случае подходят аккумуляторные батареи Delta GX 12 гелевые (16 штук), емкостью 80 А·ч, обеспечивающие суммарную ёмкость АБ 320 А·ч [7].

В качестве дополнительного источника питания выбирается дизельный генератор АД 12-Т400 мощностью 12 кВт. Выбранный дизель генератор обладает мощностью в 12 кВт и представляет собой рядный двухцилиндровый дизельный двигатель объемом 1,81 литра с водовоздушным охлаждением. Кроме этого, в конструкции имеется система охлаждения со стандартным радиатором и панель управления с использованием контроллера HGM6120.

Вопросы моделирования и проектирования электрических схем, исследования электроэнергетических характеристик систем подробнее рассмотрены в работах [7] – [11]. Схема и математическая модель выбранной ветроэнергетической установки приведены в [12].

### **Выводы**

В работе осуществлен расчет и выбор электрооборудования для автономной системы энергоснабжения жилого коттеджа на основе двух ветроэлектрических установок мощностью 3 кВт каждая. Расчет проведен на основе данных по электроприемникам коттеджа. Учтены имеющиеся условия по скорости ветра в месте размещения установки. Выбрано защитное и преобразовательное электрооборудование. Предусмотрена возможность для накопления электроэнергии и источник дополнительной мощности в виде дизель-генератора. Данную систему на основе ветрогенераторов можно использовать как для электроснабжения в городских условиях, так и в удаленной местности.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Николаев Ю.Е., Игнатов В.Ю.* Области эффективного применения автономных энергокомплексов на базе ГТУ и ВЭУ в Российской Федерации / Ю. Е. Николаев, // Энергетик. – 2023. – № 2. – С. 32-34. – EDN JGBXAS.
2. *Гиляхов А.А., Волощенко Ю.П.* Ветроэнергетические установки и последние разработки в этой области // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2016): сборник трудов XIV

- Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, – Таганрог: Издательство ЮФУ, 2016. – С. 16-18. – EDN XRISXZ.
3. *Елистратов В.В., Кузнецов М.В., Лыков С.Е.* Ветроэнергостановки. Автономные ветроустановки и комплексы: учебное пособие. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", 2008. – 100 с. – EDN RXWBVZ.
  4. *Канов Л.Н.* Схемное моделирование ветроэлектрических установок в системе распределенного электроснабжения // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международный сборник научных трудов. Том Выпуск 14. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. – С. 117-125. – EDN YWLKUE.
  5. *Гисцов В.Г., Волощенко Ю.П.* Расчёт и выбор электрооборудования ветроэнергетической установки малой мощности для электроснабжения жилого загородного дома // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2021»: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: ЮФУ, 2021. с. 49-56. – EDN: TOAVVU.
  6. *Батагов К.А., Гисцов В.Г., Волощенко Ю.П.* Исследование характеристик модели автономной электрической системы с маломощной: сборник научных статей. – Таганрог: Изд-ль ИП Ступин С.А, 2020. -выпветроэнергетической установкой // Всероссийская научная конференция «Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем» («Системотехника-2020»). Проблемы современной системотехники. XIV. С.63-69. – EDN: KYGEAE
  7. *Воротынцев В.С. Волощенко Ю.П.* Системы накопления электроэнергии и выбор накопителя для жилого дома // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2021»: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. – С. 106-113. – EDN KDDTBQ.
  8. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Основы теории одномерной нелинейной электрической и электронной волновой цепи: учебное пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2015. – 100 с. – EDN: VGYNH
  9. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование нелинейных электрических процессов в элементах электронной волновой цепи: учебное



пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2018. – 116 с. – EDN: УТРЕQH.

10. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование электронных компонентов интегральных схем методами теории электрических цепей. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2017. – 111 с. – EDN: УНОЗPL.
11. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование и исследование источника электрической энергии на фотоэлектронных модулях с преобразователем и нагрузкой // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: Материалы XXX научной конференции, – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2023. – С. 74-77. – EDN WGUBPS.
12. *Пронин Н.В., Мартыанов А.С.* Модель ветрогенератора ВЭУ-3 в пакете MATLAB // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 37(296). – С. 143-145. – EDN PIMBEJ.

**Мильчуков Иван Андреевич**, студент гр. РТбз5-39, кафедра электротехники и мехатроники, Южный федеральный университет, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; e-mail: milchukov@sfnedu.ru

**Milchukov Ivan Andreevich**, student gr. RTbz5-39, Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; e-mail: milchukov@sfnedu.ru

УДК 621.396

Власов Владимир Михайлович

## **АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ШЕСТИКОЛЁСНОЙ МЕКАНУМ-ПЛАТФОРМЫ**

*В представленной работе рассматривается движение платформы на шести роликовых колёсах. Проведён анализ её кинематики и динамики. Получены кинематические уравнения, которые связывают обобщённые скорости платформы с угловыми скоростями роликовых колёс. Рассмотрены простейшие движения платформы, такие как поступательное движение вперёд, влево, вдоль биссектрисы первого координатного угла подвижной системы координат и движение по окружности с поворотом платформы. Получены уравнения динамики в форме уравнений Лагранжа для поступательного движения и Аппеля в произвольном движении. Проведено моделирование траекторного движения*

*платформы по окружности и по квадрату. В случае движения платформы по окружности значения управляющих моментов определены с помощью метода неопределённых множителей Лагранжа. Основные вычисления были проведены с помощью системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.*

*Платформа, роликовые колеса, меканум-колесо, всенаправленное движение.*

Vlasov Vladimir Mikhailovich

## **ANALYZING THE DYNAMICS OF A SIX-WHEELED MECANUM PLATFORM**

*In the presented work, the movement of the platform on six roller wheels is considered. The analysis of its kinematics and dynamics is carried out. Kinematic equations are obtained that relate generalized platform velocities to angular velocities of roller wheels. The simplest movements of the platform are considered, such as translational movement forward, to the left, along the bisector of the first coordinate angle of the movable coordinate system and movement along a circle with the rotation of the platform. The equations of dynamics in the form of Lagrange equations for translational motion and Appel in arbitrary motion are obtained. The modeling of the trajectory movement of the platform along the circle and along the square is carried out. In the case of a platform moving around a circle, the values of the control moments are determined using the method of indeterminate Lagrange multipliers. The main calculations were carried out using the Wolfram Mathematica computer algebra system.*

*Platform, roller wheels, mecanum wheel, omnidirectional movement.*

### **Введение**

В настоящее время мобильные роботы получают всё большее распространение. С развитием механизмов транспортировки появилась необходимость создания платформ, которые способны двигаться не только в направлении перпендикулярно оси вращения колеса, но и по направлению оси колеса. Такое движение стало доступно благодаря изобретению колеса с роликками, такое колесо называется роликонесущим.

Первые конструкция роликонесущего колеса была запатентована в 1919 году в США [1]. В данной работе было представлено омни-колесо с восемью роликками в форме цилиндров, закреплённых по краям колеса. Первый вариант меканум-колеса был изобретён инженером шведской компании Mecanum в 1972 году [2]. Его звали Bengt Ilon, поэтому такое колесо получило ещё одно название - колесо Илона. В работах [3,4] рассматривается

математическое и компьютерное моделирования робота на четырёх меканум-колёсах. Приведены уравнения движения меканум-платформы, представлены результаты натурального эксперимента. Движение трехколёсной платформы на омни-колёсах рассматривается в работе [5]. В то же время платформа на шести меканум-колёсах представляет не меньший интерес, так как позволяет перевозить грузы большей массы.

Представленная работа посвящена исследованию движения платформы с шестью роликонесущими колёсами, а именно рассмотрению кинематики и динамики данной системы.

Объектом исследования является платформа с шестью меканум-колёсами, перемещающаяся по горизонтальной плоскости.

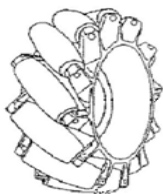
Целью работы является проведение анализа кинематики, динамики и простейших движений платформы на меканум-колёсах.

Актуальность работы обусловлена тем, что платформы, оснащённые роликонесущими колёсами, пользуются большим распространением в области исследований и использования для мобильных роботов за счёт своих преимуществ. Мобильные роботы на меканум-платформах обладают большей мобильностью за счёт возможности всенаправленного движения, что играет важную роль в функционировании робота.

### **Основная часть**

Работа посвящена исследованию движения платформы с шестью роликонесущими формы (рис. 2). Проведён анализ кинематики и динамики шестиколёсной меканум-платформы. Получены уравнения, связывающие колёсами. На их периферии расположены пассивные ролики, оси которых составляют угол  $45^\circ$  с осями вращения колес (рис. 1). Рассматривается случай симметричного расположения колёс по двум сторонам корпуса прямоугольной обобщённые скорости платформы с угловыми скоростями роликонесущих колёс. Скорость вращения  $i$ -го колеса:

$$\dot{\varphi}_i = \frac{1}{R} [V_L + V_T \operatorname{tg} \delta_i + \Omega (h_i \operatorname{tg} \delta_i - l_i)].$$



*Рис. 1. Роликонесущее колесо (меканум)*

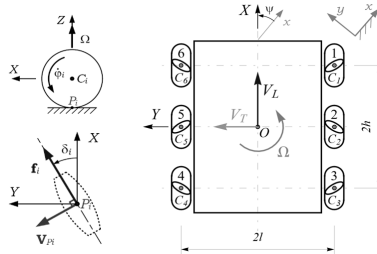


Рис. 2. Кинематическая схема шестиколёсной механум-платформы и колеса

Решены задачи кинематики для простейших движений платформы (рис. 3): поступательного движения вперёд ( $\dot{\phi}_i = \frac{V_L}{R}, i = 1 \dots 6$ ), влево ( $\dot{\phi}_{1,3,5} = -\frac{V_T}{R}, \dot{\phi}_{2,4,6} = \frac{V_T}{R}$ ) и вдоль биссектрисы первого координатного угла подвижной системы координат, связанной с платформой, ( $\dot{\phi}_{1,3,5} = 0, \dot{\phi}_{2,4,6} = 2\frac{V}{R}$ ) рассмотрено вращательное движение вокруг геометрического центра платформы  $O$  ( $\dot{\phi}_1 = -\dot{\phi}_6 = \frac{l-h}{R}\Omega, \dot{\phi}_2 = -\dot{\phi}_5 = \frac{l}{R}\Omega, \dot{\phi}_3 = -\dot{\phi}_4 = \frac{l+h}{R}\Omega$ ) и точки  $P$  ( $(OP = l+h): \dot{\phi}_1 = -\dot{\phi}_6 = -\frac{2h}{R}\Omega, \dot{\phi}_2 = -\dot{\phi}_5 = \frac{2l+h}{R}\Omega, \dot{\phi}_3 = \dot{\phi}_4 = 0$ ).

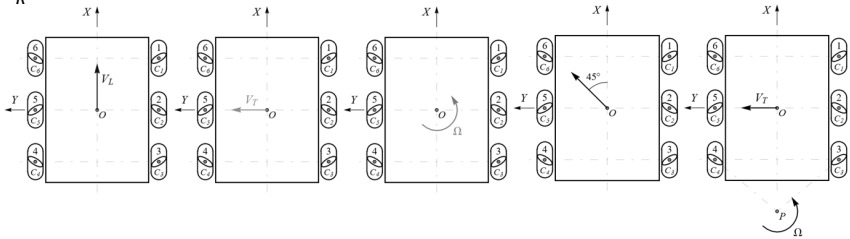


Рис. 3. Схемы простейших движений платформы

В случае поступательного движения платформы [8] её положение характеризуется двумя обобщёнными координатами  $x_0, y_0$ , а  $\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_L \\ V_T \end{bmatrix}$ , тогда движение может быть описано двумя уравнениями Лагранжа:

$$m_a \dot{V}_L = F_L - \frac{6\mu_1 V_L}{R^2} - \frac{M_k}{R} \sum \text{sign } \phi_i,$$

$$m_a \dot{V}_T = F_T - \frac{6\mu_1 V_T}{R^2} - \frac{12\mu_2 V_T}{r^2} - \frac{M_k}{R} (-\text{sign } \phi_1 + \text{sign } \phi_2 - \text{sign } \phi_3 + \text{sign } \phi_4 - \text{sign } \phi_5 + \text{sign } \phi_6) - \frac{6\sqrt{2}}{r} M_r \text{sign } V_T.$$

$$F_L = \frac{1}{R}(M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6), \quad F_T = \frac{1}{R}(-M_1 + M_2 - M_3 + M_4 - M_5 + M_6).$$

Воспользуемся формализмом Аппеля при произвольном движении платформы [3]. С учётом трения в оси колеса ( $M_i^{\text{тр.к}} = \mu_1 \dot{\phi}_i + M_k \text{sign } \dot{\phi}_i$ ) и в оси ролика ( $M_i^{\text{тр.р}} = \mu_2 \dot{\gamma}_i + M_r \text{sign } \dot{\gamma}_i$ ) получим следующие уравнения движения:

$$\begin{aligned} m_a \dot{V}_L - m_{\text{рб}} \Omega V_T &= \frac{1}{R} [M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 - M_1^{\text{тр.к}} - M_2^{\text{тр.к}} - \\ &M_3^{\text{тр.к}} - M_4^{\text{тр.к}} - M_5^{\text{тр.к}} - M_6^{\text{тр.к}}], \\ m_a \dot{V}_T + m_{\text{рб}} \Omega V_L - \frac{2l}{R^2} I_{kY} \dot{\Omega} &= \frac{1}{R} [-M_1 + M_2 - M_3 + M_4 - M_5 + M_6 + \\ &M_1^{\text{тр.к}} - M_2^{\text{тр.к}} + M_3^{\text{тр.к}} - M_4^{\text{тр.к}} + M_5^{\text{тр.к}} - M_6^{\text{тр.к}}] + \frac{\sqrt{2}}{r} [M_1^{\text{тр.р}} + M_2^{\text{тр.р}} + M_3^{\text{тр.р}} + \\ &M_4^{\text{тр.р}} + M_5^{\text{тр.р}} + M_6^{\text{тр.р}}], \\ \left( I_{\text{рб}} + 6I_{kY} \frac{\rho_k}{R^2} \right) \dot{\Omega} - \frac{2l}{R^2} I_{kY} \dot{V}_T &= \frac{h}{R} [-M_1 + M_3 - M_4 + M_6 + M_1^{\text{тр.к}} - \\ &M_3^{\text{тр.к}} + M_4^{\text{тр.к}} - M_6^{\text{тр.к}}] + \frac{l}{R} [M_1 + M_2 + M_3 - M_4 - M_5 - M_6 - M_1^{\text{тр.к}} - \\ &M_2^{\text{тр.к}} - M_3^{\text{тр.к}} + M_4^{\text{тр.к}} + M_5^{\text{тр.к}} + M_6^{\text{тр.к}}] + \frac{\sqrt{2}h}{r} [M_1^{\text{тр.р}} - M_3^{\text{тр.р}} - M_4^{\text{тр.р}} + \\ &M_6^{\text{тр.р}}]. \end{aligned}$$

Получено решение прямой задачи динамики для случая, когда траектория движения геометрического центра платформы представляет собой окружность, а вектор скорости центра направлен по оси симметрии платформы. Моменты двигателей, обеспечивающее заданное движение и удовлетворяющие требованию минимума суммы квадратов моментов, определены с помощью метода множителей Лагранжа. При заданных значениях параметров платформы  $l = 0,15$  м,  $h = 0,235$  м;  $R = 0,05$  м;  $m_p = 30$  кг;  $m_k = 1,4$  кг;  $\mu_1 = 0,3$  Н · м · с/рад;  $L = 0,46$  м;  $\Omega = 0,3$  рад/с получим следующие значения для моментов:

$$M_1 = 0,66 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_2 = 1,114 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_3 = 1,512 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_4 = 0,144 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_5 = 0,542 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_6 = 0,996 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При моделировании поступательного движения ( $\Omega = 0$ ) геометрического центра платформы по квадратной траектории моменты каждого колеса вычислялись с помощью обратной связи. При заданных значениях параметров платформы в результате моделирования была получена траектория движения (рис. 4) и построены графики зависимости скоростей движения платформы  $V_x, V_y$  от времени (рис. 4) при идеальном управлении (выделены красным цветом) и при моделировании управления с обратной связью (чёрным цветом).

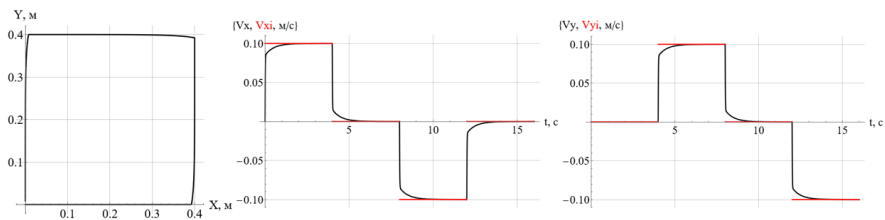


Рис. 4. Траектория движения и графики зависимости скоростей движения платформы  $V_x, V_y$  от времени

Также были построены графики зависимости скоростей вращения колёс  $\dot{\varphi}_1 \dots \dot{\varphi}_6$  от времени при идеальном управлении (выделены красным цветом) и при моделировании управления с обратной связью (чёрным цветом) и графики зависимости управляющих моментов колёс от времени. На рис. 5 представлены графики для первого и второго колеса, поскольку из-за симметричного расположения колес на платформе графики одинаковы для 1, 3, 5 и 2, 4, 6 колес соответственно.

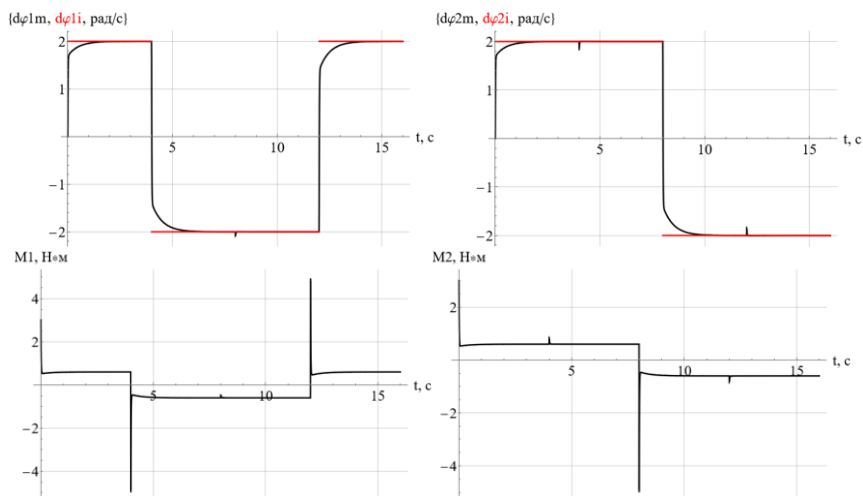


Рис. 5. Графики зависимости скоростей вращения колес и управляющих моментов от времени

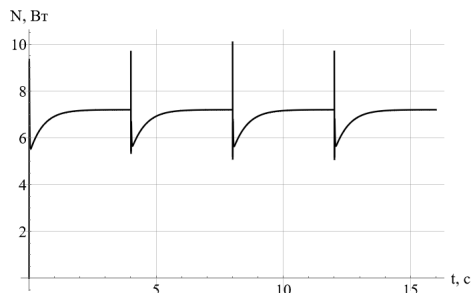


Рис. 6. График зависимости суммарной мощности от времени

Построен график зависимости суммарной мощности управляющих моментов колёс от времени. Заметим на рис. 6 резкие всплески значений моментов и мощностей при  $t = 4, 8, 12$  с. Они обусловлены резким изменением значений угловых скоростей колёс необходимых для смены направления движения платформы.

### **Выводы**

В данной работе выполнено исследование движения платформы на шести роликовых колёсах. Проведён анализ её кинематики и динамики. Получены кинематические уравнения, которые связывают обобщённые скорости платформы с угловыми скоростями роликовых колёс. Рассмотрены простейшие движения платформы: поступательное движение вперёд, влево, вдоль биссектрисы первого координатного угла подвижной системы координат и вращательное движение вокруг геометрического центра платформы и относительно некоторой точки на оси. Получены уравнения динамики в форме уравнений Лагранжа для поступательного движения и Аппеля в произвольном движении. Проведено моделирование траекторного движения платформы по окружности и по квадрату. В случае движения платформы по окружности значения управляющих моментов определены с помощью метода неопределённых множителей Лагранжа. Основные вычисления и построения уравнений были проведены с помощью системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. U.S. Patent 1305535A, CPC B60B 19/003, Y10T16/184. Vehicle wheel / Grabowiecki J. – Filed: May. 11, 1918. – Issued: June. 3, 1919.
2. U.S. Patent 3876255A, IPC B60B 19/00, B60B 019/12. Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some

- other base / Пон В.Е. – Appl. No.: 305887. – Filed: Nov. 13, 1972. – Issued: Apr. 8, 1975.
3. *Адамов Б.И., Капустина О.М., Меркурьев И.В., Панкратьева Г.В.* Кинематика, динамика и управление движением мобильного робота-манипулятора youbot. — М.: Изд-во МЭИ Москва, 2018.
  4. *Адамов Б.И.* Идентификация параметров математической модели мобильной роботизированной платформы всенаправленного движения КУКА YUBOT// статья в сборнике трудов конференции «Навигация и управление движением». – с. 158-160, 2017.
  5. *Мартыненко Ю.Г.* Устойчивость стационарных движений мобильного робота с роликонесущими колесами и смещенным центром масс // Прикладная математика и механика. — 2010. — Т. 74, № 4.
  6. *Lin L.C., Shih H.Y.* Modeling and adaptive control of an Omni-mecanum-wheeled robot // Intelligent Control and Automation. - 2013. Т. 4. № 02.
  7. *Мартыненко Ю.Г.* Управление движением мобильных колёсных роботов. Фундамент. и прикл. Матем., 2005, том 11, выпуск 8.
  8. *Зацепин М.Ф., Мартыненко Ю.Г., Тиньков Д.В.* Уравнение Лагранжа, Воронца, Чаплыгина в задачах динамики мобильных роботов: методическое пособие - М.: Изд-во МЭИ Москва, 2005.
  9. *Кобрин А.И., Мартыненко Ю.Г.*, «Мобильные роботы и мехатронные системы: Неголономная механика мобильных роботов и её моделирование в реальном времени». РАН 1999г.
  10. *Килин А.А., Бобыкин А.Д.* Управление тележкой с омниколесами на плоскости// Нелинейная динамика. – 2014, том 10, № 4, с. 473-481.

**Власов Владимир Михайлович**, магистрант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, 111250, телефон: +7 (926) 599-91-93, email: vlasov2000vladimir@yandex.ru.

**Vlasov Vladimir Mikhailovich**, Candidate National Research University «Moscow Power Engineering Institute», 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14, p. 1, phone: +7 (926) 599-91-93, email: vlasov2000vladimir@yandex.ru.



УДК 621.01

Русских Мария Дмитриевна, Сафина Лилия Наилевна,  
Тимершин Булат Айратович, Пашин Дмитрий Михайлович  
Чикрин Дмитрий Евгеньевич

## **РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ШАХМАТНОГО МАНИПУЛЯТОРА**

*В данном исследовании рассматривается процесс разработки и функционирования шахматного робота-манипулятора. В докладе детально излагаются все этапы создания робота, от проектного решения до реализации, включая аспекты кинематики, электронной схемы и конструкции. На основе проектной документации был разработан цифровой двойник в симуляционной среде Gazebo, что позволило провести всесторонний анализ и оптимизацию работы манипулятора до начала его физического производства.*

*Шахматный робот, робот-манипулятор, цифровой двойник.*

Russkikh Maria Dmitrievna, Safina Lilia Nailevna,  
Timershin Bulat Airatovich, Pashin Dmitry Mikhailovich,  
Chikrin Dmitry Evgen'evich

## **DEVELOPMENT OF A DIGITAL CHESS DOUBLE MANIPULATOR**

*This study examines the process of developing and functioning a chess robot manipulator. The report describes in detail all the stages of creating a robot, from design to implementation, including aspects of kinematics, electronic circuit and design. Based on the design documentation, a digital twin was developed in the Gazebo simulation environment, which allowed for a comprehensive analysis and optimization of the manipulator's operation before its physical production began.*

*Chess robot, manipulator robot, digital double.*

### **Введение**

Шахматы, сочетающие искусство и науку, продолжают привлекать внимание благодаря технологическому прогрессу. На данный момент у шахматных программ появились различные аппаратные решения, включая электронные доски и наборы. Интерактивные шахматные доски, оснащенные специальными чипами и системами считывания, автоматизируют процесс

фиксации ходов и их преобразование в цифровой формат, что позволяет игрокам анализировать партии и вести игру в режиме онлайн. Роботизированные манипуляторы, такие как российская Chesska и немецкая Kuka Monster, интегрируют шахматные алгоритмы для анализа партий и манипулирования фигурами, расширяя возможности взаимодействия с игрой.

Но в связи с тем, что робот Chesska построен на базе промышленного манипулятора, он обладает определёнными ограничениями. Это послужило стимулом для разработки собственного робота с нуля, чтобы преодолеть эти ограничения и расширить функциональные возможности.

### **Основная часть**

#### **(1) Моделирование**

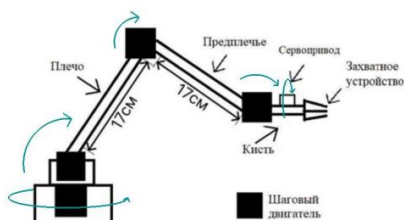
На сегодняшний день существует множество конструкторских решений [1,2] созданных для манипуляторов. В данной работе была разработана конструкция манипулятора исходя из структурного аналога, созданного под определенные размеры для того, чтобы этот робот мог играть в шахматы при этом дотягиваясь до любой фигуры на доске. Для понимания работы шахматного манипулятора составим кинематическую схему передвижения манипулятора.

##### **1.1. Кинематическая схема.**

При разработке решено было взять структурный аналог с пятью степенями свободы [3], позволяющий с лёгкостью достать до любой точки шахматной доски. Задача шахматного манипулятора будет по очереди поднимать плечи в зависимости от половины шахматной доски.

Четыре степени свободы состоят из шаговых двигателей и будут отвечать за положение робота, пятая степень свободы отвечает за захват манипулятора и состоит из серводвигателя (рис.1).

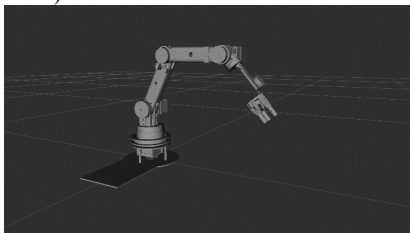
Кинематическая схема позволяет понять каким образом шахматный манипулятор будет двигаться и захватывать фигуру, что позволит создать оптимальную конструкцию с учетом оборудования



*Рис.1. Кинематическая схема*

## 1.2. Конструкция робота

Исходя из кинематики передвижения и комплектующих робота была разработана следующая конструкция манипулятора, в который есть несколько основных частей: крепление к столу, подвижное основание, предплечье, плечо, кисть (Рис. 1).



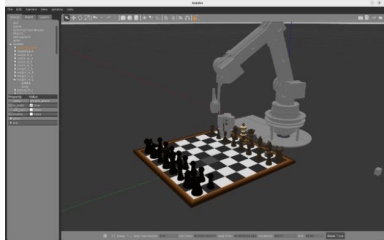
*Рис.2. 3D модель манипулятора*

## 1.3. Создание цифрового двойника и сборка робота

Перед началом сборки манипулятора было принято решение разработать его цифровой аналог [4,5] для оценки функциональности и последующей корректировки проекта.

### 1.3.1. Создание цифрового двойник

Было принято решение моделировать цифрового двойника с использованием Gazebo и ROS2 [6,7]. Конструкция робота была сделана с использованием программного обеспечения RViz, что дало возможность наблюдать за его движениями в реальном времени. Разработка проходила в два этапа: первый заключался в создании базового каркаса с использованием геометрических форм и определении всех сочленений, второй этап включал в себя применение готовых трехмерных моделей компонентов робота к ранее созданному каркасу и последующую работу в программе Gazebo (рис. 3).



*Рис.3. Цифровой двойник манипулятора в программе Gazebo*

### 1.3.2. Сборка робота манипулятора и тестирование управляющей программы

Перед тем как приступить к реальным испытаниям все спроектированные детали манипулятора были напечатаны на 3D принтере Picasso из PETG пластика. Затем была проведена сборка всей конструкции.

После подключения и проверки всей электроники была написана управляющая программа, которая реализовывалась с помощью платы Arduino UNO. Программа получала пакет данных о положениях углов энкодеров для определенной клетки. Чтобы манипулятор встал в нужную клетку нам понадобилось откалибровать положение робота для каждой клетки и в итоге мы получили матрицу координат клетки. Так же когда фигура съездалась она выкладывалась за пределы поля в определенную точку.

Для удобства игры был создан сайт, на котором можно было сыграть шахматную партию между двумя игроками. Такой манипулятор позволил перемещать и позиционировать руку над определенной точкой.

## 4. Испытание

Испытания шахматного робота манипулятора и его цифрового двойника проводились в разное время, но используя один сценарии функционирования.

### 4.1. Виртуальное испытание в Gazebo

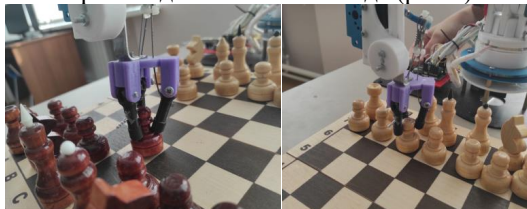
В ходе испытания цифрового двойника робототехнической системы был разработан сценарий, имитирующий выполнение роботом-манипулятором определенной последовательности действий. Положительные результаты испытаний цифрового двойника подтвердили, что сценарий и параметры, заданные для симуляции, соответствуют требованиям и могут быть использованы для испытаний физического робота-манипулятора.

В процессе испытания, робот-манипулятор демонстрировал выполнение серии из четырех шагов, моделируя игровой процесс за обе стороны на шахматной доске.

В ходе проведения испытаний цифрового двойника было установлено, что он с высокой точностью отработал предусмотренный сценарий. На основе полученных данных была выполнена тщательная калибровка шаговых двигателей реального робота-манипулятора, что позволило приступить к испытаниям робота-манипулятора.

### 4.2. Реальное испытание

Реальное испытание манипулятором проводилось с подключенным работающим сайтом, на котором два игрока в реальном времени проводили партию. Тестовое испытание было решено проводить на примере распространенной шахматной партии – детский мат в 4 хода (рис.4).



*Рис.4. Испытание шахматного манипулятора*

В ходе испытания было принято решение добавить магнитные для точного позиционирования шахматных фигур, что позволило ставить ее по центру клетки и не ронять при небольшом задевании манипулятором фигуру. В дальнейшем можно усовершенствовать разработанный манипулятор путем добавления нового оборудования – видеокамеры [8], датчиков давления [9], более мощных двигателей, датчиков расстояния [10] и прочего, для расширения области его использования.

### **Выводы**

В рамках проведения двух экспериментов, включающих цифровой двойник и физический манипулятор, была проведена тщательная проверка параметров работы систем. Результаты показали, что отклонения от заданных характеристик отсутствуют, что свидетельствует о корректной работе обоих компонентов.

В процессе разработки цифрового двойника были применены виртуальные методики проведения симуляции, что позволило достичь высокой точности воспроизведения работы физического манипулятора. Эффективность применения цифрового двойника подтверждена его положительным влиянием на функционирование манипулятора, что обеспечило его работу.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Md. Hazrat Ali, Yernar Kuralbay, Aidos Aitmaganbet, M.A.S. Kamal*, Design of a 6-DOF robot manipulator for 3D printed construction, *Materials Today: Proceedings*, Volume 49, Part 5, 2022, Pages 1462-1468, ISSN 2214-7853, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321050872> (дата обращения: 28.01.2024).

2. *P. Franceschi, S. Mutti, N. Pedrocchi*, Optimal design of robotic work-cell through hierarchical manipulability maximization, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 78, 2022, 102401, ISSN 0736-5845, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584522000886> (дата обращения: 28.01.2024).
3. *V.N. Iliukhin, K.B. Mitkovskii, D.A. Bizyanova, A.A. Akopyan*, The Modeling of Inverse Kinematics for 5 DOF Manipulator, *Procedia Engineering*, Volume 176, 2017, Pages 498-505, ISSN 1877-7058, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817308652> (дата обращения: 28.01.2024).
4. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi [et al.] // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2020. – Vol. 28.
5. Digital Twin as Industrial Robots Manipulation Validation Tool / V. Kuts, J. A. Marvel, M. Aksu [et al.] // *Robotics*. – 2022. – Vol. 11, No. 5. – P. 113.
6. *J. Chen, H. Deng, W. Chai, J. Xiong and Z. Xia*, "Manipulation Task Simulation of a Soft Pneumatic Gripper Using ROS and Gazebo," 2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), Kandima, Maldives, 2018, pp. 378-383.
7. *F. Tao, H. Zhang, A. Liu and A. Y. C. Nee*, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415, April 2019.
8. *Long Luo*, Research and analysis of manipulator control method based on deep learning, *Journal of Engineering Research*, 2023, ISSN 2307-1877, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2307187723003061>) (дата обращения: 30.01.2024).
9. *Levente Sajó, Zsófia Ruttkay, Attila Fazekas*, Turk-2, a multi-modal chess player, *International Journal of Human-Computer Studies*, Volume 69, Issues 7–8, 2011, Pages 483-495, ISSN 1071-5819 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581911000474>) (дата обращения: 30.01.2024).
10. Freyja Yeatman Ómarsdóttir, Róbert Bjarnar Ólafsson, Joseph Timothy Foley, The Axiomatic Design of Chessmate: A Chess-playing Robot, *Procedia CIRP*, Volume 53, 2016, Pages 231-236, ISSN 2212-8271, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116307235>) (дата обращения: 30.01.2024).

**Русских Мария Дмитриевна**, студентка КФУ ИВМиИТ, Казань. Email: 5021702001@mail.ru

**Сафина Лилия Наилевна**, студентка КФУ ИИРСИ, Казань. Email: [safinalilia406@gmail.com](mailto:safinalilia406@gmail.com)

**Тимершин Булат Айратович**, без степени, аспирант ИВМиИТ, КФУ, Казань. Email: [btimershin99@gmail.com](mailto:btimershin99@gmail.com)

**Пашин Дмитрий Михайлович**, доктор технических наук, проректор по цифровой трансформации и инновационной деятельности, КФУ, Казань, ул. Кремлевская д.18. Email: [dmitry.m.pashin@gmail.com](mailto:dmitry.m.pashin@gmail.com)

**Чикрин Дмитрий Евгеньевич**, доктор технических наук, директор института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии, КФУ, Казань, ул. Сайлиха Сайдашева д.12 к.3, Email: [dmitry.kfu@ya.ru](mailto:dmitry.kfu@ya.ru).

**Russkikh Maria Dmitrievna**, a student of KFU ICMaIT, Kazan. Email: 5021702001@mail.ru

**Safina Lilia Nailevna**, a student of KFU AIRSI, Kazan. Email: [safinalilia406@gmail.com](mailto:safinalilia406@gmail.com)

**Timershin Bulat Airatovich**, no degree, graduate student, Institute of Computational Mathematics and IT, KFU, Kazan. Email: [btimershin99@gmail.com](mailto:btimershin99@gmail.com)

**Pashin Dmitry Mikhailovich**, Doctor of technical sciences, Vice-Rector for Digital Transformation and Innovation, KFU, Kazan, Kremlevskaya st. 18. Email: [dmitry.kfu@ya.ru](mailto:dmitry.kfu@ya.ru).

**Chikrin Dmitry Evgen'evich**, Doctor of technical sciences, Director of Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering, KFU, Kazan, Salikha Saidasheva st. 12, 3 enc. Email: [dmitry.m.pashin@gmail.com](mailto:dmitry.m.pashin@gmail.com).

УДК 621.396

Фархуд Азхар Кадим, Абу Хамдан Низар

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ В ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ**

*В докладе рассматривается проблема планирования движения в двумерной среде на базе нейронной сети глубокого обучения. Исследуется две формы представления карты среды – растровая и векторная. Для каждой формы создана обучающая выборка, на основе которой обучены нейронные сети различной структуры. Показано, что точность обучения слабо зависит от формы представления информации. Однако векторное представление карты среды,*

*включающее информацию о положении робота, цели, препятствий и ближайшую область вокруг робота, позволяет сократить время обучения. Данный эффект достигается за счет снижения объема обрабатываемой нейронной сетью информации. Предложенные решения подтверждаются результатами численного моделирования*

*Планирование траектории, глубокое обучение, векторная карта, обучение с учителем.*

Farhood Azhar kadhim, Nizar Ahmad Abou Hamdan

## **STUDY OF NEURAL NETWORK METHODS FOR PLANNING MOTION TRAJECTORIES IN A TWO-DIMENSIONAL MEDIUM**

*The report discusses the problem of motion planning in a two-dimensional environment based on a deep learning neural network. Two forms of representation of the environmental map are investigated - raster and vector. For each form, a training sample was created, on the basis of which neural networks of various structures were trained. It is shown that the accuracy of training is weakly dependent on the form of information presentation. However, a vector representation of the environment map, including information about the robot's position, target, obstacles, and the nearest area.*

*Trajectory planning, deep learning, vector mapping, supervised learning.*

### **Введение**

Объем Планирование движения с использованием машинного обучения развивается в связи с успехами глубоких нейронных сетей [1]. При этом, возможно обучение с учителем [2], с подкреплением [3] и гибридные схемы [4]. Обучение с учителем использует имеющийся опыт, например, повторяя удачные действия водителя. Обучение с подкреплением позволяет обучаться путем взаимодействия со средой. Такой подход применяется в ситуациях, когда нет супервизора, способного решить задачу.

Усилия исследователей в области планирования траекторий направлены на снижение времени планирования и учет различных ограничений [5]. С целью минимизации вычислительных требований существуют исследования, направленные на оптимизацию структуры нейронных сетей и содержания обучающей выборки [6, 7], а также формы представления данных для обучения нейронной сети [8].

В данном докладе исследуются 4 нейронные сети различной структуры. Одна из нейронных сетей взята из работы [9], в которой ставится задача выработки управляющего сигнала, подаваемого на систему управления углом



поворота мобильного робота. Нейронная сеть обучается на основе данных с трех видеокамер. В качестве учителя использовался сигнал положения руля автомобиля, который формировался водителем. Обучаемая нейронная сеть включала 5 сверточных слоев и 3 полносвязных слоя. В ходе тестирования для коррекции управляющих действий нейронной сети допускалось вмешательство водителя. При этом был достигнут уровень автономности 90 %. Проведен эксперимент, в ходе которого нейронная сеть осуществляла управление направлением движения автомобиля в течение 10 миль. При этом вмешательства водителя не потребовалось. Работа [9] демонстрирует достаточно работоспособное решение, хотя и недостаточно надежное для автономного вождения.

Еще одна исследуемая нейронная сеть взята для исследования из статьи [10], в которой предложено вместе с изображением подавать на нейронную сеть результаты измерения текущей скорости автомобиля и вектор целевой точки. Предложена структура нейронной сети и проведено обучение на основе симулятора и экспериментального образца робота. Полученные результаты показали, что введение дополнительной информации в нейронную сеть позволяет многократно снизить частоту вмешательства и в действия сети и повысить процент успешного достижения цели в городских условиях.

Третья нейронная сеть сконструирована на основе работ [7, 11], в которых используется специальная процедура создания обучающей выборки, позволяющая повысить точность функционирования работы обученной сети.

Также для сравнения используется нейронная сеть, использующая только полносвязные слои и не использующая сверточные слои.

Во многих работах используются специальные формы представления информации о среде. В статье [11] вместо полной карты на вход нейронной сети подается локальный участок карты и глобальный путь на этом участке. В работе [12] на нейронную сеть также подается локальный участок среды, непосредственно примыкающий к роботу. Это позволяет более эффективно функционировать нейросетевому планировщику в непосредственной близости от препятствий.

В данном докладе исследуются две формы представления карты среды. Одна форма – растровая карта, а вторая – комбинированная, в которой присутствует информация о положении робота, цели и препятствий, и растровая карта ближнего окружения робота.

### **Формулировка задачи**

Рассматривается прямоугольная среда, представленная на рис. 1. Среда имеет размеры  $N_x=65 \times N_y=65$  ячеек. Каждое препятствие описывается координатами левого нижнего угла, высотой и шириной, т.е. вектором, содержащим 4 параметра:

$$p_{obs} = [x_{obs}, y_{obs}, r_{obs}, b_{obs}] \quad (1)$$

где  $x_{obs}, y_{obs}$  – координаты левого нижнего угла препятствия;  $r_{obs}$  – высота препятствия;  $b_{obs}$  – ширина препятствия.

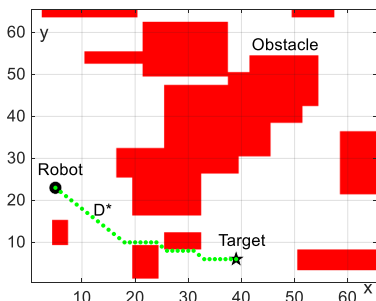


Рис. 1. Среда функционирования робота

Положение робота и целевой точки описывается векторами

$$.p_r = [x_r, y_r] \quad (2)$$

$$.p_t = [x_t, y_t] \quad (3)$$

Задача указанной нейронной сети выбрать одно из восьми направлений движения, представленные на рис. 2.

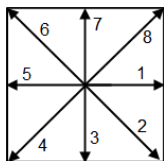


Рис. 2. Направления движения робота

Таким образом, ставится задача обучить нейронную сеть классифицировать среду, представленную на рис. 1, на 8 классов, имитируя алгоритм планирования учителя.

### Результаты решения задачи

Кроме растрового изображения, представленного на рис. 1, в данной работе используется описание среды, представленное в виде матрицы, содержащей вектора (1) – (3). Такая матрица имеет вид:

$$M_{env} = \begin{bmatrix} x_{obs1} & y_{obs1} & r_{obs1} & b_{obs1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{obs,Nobs} & y_{obs,Nobs} & r_{obs,Nobs} & b_{obs,Nobs} \\ x_r & y_r & x_r & y_r \\ x_t & y_t & x_t & y_t \\ p_{xr-1,yr+1} & p_{xr,yr+1} & p_{xr+1,yr+1} & 0 \\ p_{xr-1,yr} & 65 & p_{xr+1,yr} & 0 \\ p_{xr-1,yr-1} & p_{xr,yr-1} & p_{xr+1,yr-1} & 0 \\ q_{xt-1,yt+1} & q_{xt,yt+1} & q_{xt+1,yt+1} & 0 \\ q_{xt-1,yt} & 65 & q_{xt+1,yt} & 0 \\ q_{xt-1,yt-1} & q_{xt,yt-1} & q_{xt+1,yt-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где  $p_{i,j}$ ,  $i=x_r-1, x_r, x_r+1, j=y_r-1, y_r, y_r+1$ , равняется 65, если ячейка возле робота занята препятствием. Иначе ячейка  $p_{i,j}$  равна 0. Строки матрицы  $M_{env}$  (7) с номерами  $Nobs + 2, Nobs + 3, Nobs + 4$  содержат карту ближайшей к роботу области, 8 соседних ячеек. Последние три строки матрицы  $M_{env}$  (7) содержат ближайшие 8 ячеек к целевой точке. При этом  $q_{i,j}$ ,  $i=x_t-1, x_t, x_t+1, j=y_t-1, y_t, y_t+1$  равняется 65, если соответствующая ячейка занята роботом или препятствием. В противном случае ячейка  $q_{i,j}$  равна 0.

Таким образом, матрица  $M_{env}$  (4) содержит 4 столбца и  $Nobs + 7$  строк.

Вектор параметров препятствий  $p_{obs}$  (1) задается в соответствии с выражениями:

$$, y_{obs} = rand(1, 65), x_{obs} = rand(1, 65) \quad (5)$$

$$, b_{obs} = rand(1, 20), r_{obs} = rand(1, 20) \quad (6)$$

где  $rand(c_1, c_2)$  – генератор равномерно распределенного случайного числа в диапазоне  $[c_1, c_2]$ .

Начальное положение робота и положение целевой точки также задаются случайным образом в диапазоне  $[1, 65]$ .

Матрица (4) преобразуется в картинку в виде оттенков серого с разрешением 16 бит. Внешний вид картинка, которая подается на вход нейронной сети, представлен на рис.3.



Рис. 3. Матрица признаков в виде изображения, подаваемого на вход нейронной сети

В ходе исследования рассмотрены 4 нейронных сети. Сеть NN1 включает входной слой, 9 сверточных слоев, 4 полносвязных слоя и выходной слой. Каждый сверточный слой включает 128 фильтров размером 3×3. Число нейронов в полносвязных слоях 512, 128, 32 и 8. Сеть NN2 взята из работы [10], а сеть NN3 из работы [9]. Сеть NN4 содержит 9 полносвязных слоев с числом нейронов 1024, 1024, 512, 512, 256, 128, 64, 32, 8.

Вначале рассмотрена задача обучения сетей на основе растровой карты. Созданы 3 обучающие выборки объемом 240 000, 400 000 и 560 000 изображений. Качество обучения контролируется частотой успешного достижения цели  $\omega_s$ . Данный параметр вычисляется в процессе моделирования в соответствии с выражением:

$$\omega_s = N_s / N_m \quad (7)$$

где  $N_s$  – число экспериментов, в которых успешно достигнута цель;  $N_m$  – общее число экспериментов.

Результаты обучения рассмотренных нейронных сетей представлены в табл. 1. Частота успешного достижения цели в табл. 1 получена при  $N_m = 300$ .

Таблица 1

Оценки точности для растровой картинки

Объем вы- борки	240 000	400 000	560 000
Сеть NN1	71,4	73,2	74,0
Сеть NN2	63,4	79,2	80,0
Сеть NN3	56,2	65,0	67,6
Сеть NN4	46,0	45,7	48,3

Аналогичные результаты для обучения нейронных сетей на основе входной матрицы, представленной на рис. 3, показаны на рис. 4.

Таблица 2

Оценки точности для векторного представления

Объем вы- борки	240 000	400 000	560 000
Сеть NN1	79,33	80,67	80,5
Сеть NN2	76,25	78,04	78,32

<b>Сеть NN3</b>	68,46	72,65	73,25
<b>Сеть NN4</b>	72,67	73,33	75,0

### Заключение

Анализ результатов, представленных в табл. 1 и табл. 2 позволяет сделать следующие выводы:

- векторное представление информации для нейронной сети дает повышение точности работы нейронной сети на 6 – 7 %;
- ни одна из проанализированных нейронных сетей не обеспечивает достаточно надежного решения, позволяющего ей самостоятельно решать задачу автовождения.

Кроме того, следует отметить, что использование векторного представления за счет уменьшения объема входных данных, позволяет снизить время обучения в 10 – 15 раз.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *LeCun Y., Bengio Y., Hinton G.* Deep learning // *Nature*. 2015. V. 521. P. 436–444.
2. *Hawke J., Shen R., Gurau C., Sharma S., Reda D., Nikolov N., Mazur P., Micklethwaite S., Griffiths N., Shah A., and Kendall A.* Urban driving with conditional imitation learning // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2020. P. 251– 257.
3. *Kickia P., Gawrona T., Ćwiana K., Ozay M, and Skrzypczyńska P.* Learning from experience for rapid generation of local car maneuvers // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2021. V. 105.
4. *Chiang H.-T.L., Hsu J., Fiser M., Tapia L., and Faust A.* RL-rrt: Kinodynamic motion planning via learning reachability estimators from RL policies // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. V. 4, N 4. P. 4298–4305.
5. *Пишихонов В.Х., Медведев М.Ю., Костюков В.А., Хуссейн Ф., Кадим А.* Алгоритмы планирования траекторий в двумерной среде с препятствиями // *Информатика и автоматизация*. 2022. Т. 21, № 3, С. 459-492.
6. *Wang B., Liu Z., Li Q., Prorok A. Wang J., Perez L.* The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning // *ArXiv*. 2017.
7. *Гайдук А.П., Мартьянов О.В., Медведев М.Ю., Пишихонов В.Х., Хамдан Н., Фархурд А.* Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 21 № 8. С. 470-479.

8. *Berner C., Brockman G., et. al.* Dota 2 with Large Scale Deep Reinforcement Learning // ArXiv. 2019.
9. *M. Bojarski, D.D. Testa, D. Dworakowski, B. Firner, B. Flepp, P. Goyal, L. D. Jackel, M. Monfort, U. Muller, J. Zhang, X. Zhang, J. Zhao, and K. Zieba.* End to end learning for self-driving cars. ArXiv, 2016.
10. *Codevilla F., Mueller M., López Аю, Koltun V., Dosovitskiy A.* End-to-end driving via conditional imitation learning // In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2018. P. 4693–4700.
11. *Medvedev M., Kadhim A., Brosalin D.* Development of the Neural-Based Navigation System for a Ground-Based Mobile Robot // 2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering Mobile Robot Path Planning in Dynamic Environments Through Globally Guided Reinforcement Learning // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. V. 5, N. 4. P. 6932-6939.
12. *Liangheng L.H., Zhang S.J.; Ding D.R.; Wang Y.X.* Path Planning via an Improved DQN-Based Learning Policy // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 67319–67330.

**Фархуд Азхар Кадим**, кандидат технических наук, преподаватель Южного технического университета, 64001, Ирак, город Насирия, улица Багдад, телефон: +7 (9613) 17-65-39, email: [azhar.kadhumi@stu.edu.iq](mailto:azhar.kadhumi@stu.edu.iq).

**Абу Хамдан Низар Nizar**, аспирант, кафедра Электротехники и мехатроники Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко, 2, 347900, телефон: +7 (9508) 68-90-86, email: [dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com](mailto:dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com).

**Azhar kadhimi Farhood**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) of Engineering, lecturer at Southern Technical University, 64001, Iraq, Nasiriyah, Baghdad street, phone: +7 (9613) 17-65-39, email: [azhar.kadhumi@stu.edu.iq](mailto:azhar.kadhumi@stu.edu.iq).

**Ahmad Abou Hamdan**, Postgraduate student, Department of electrical Engineering and mechatronics/ Southern Federal University, 347900, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (9508) 68-90-86, email: [dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com](mailto:dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com).

УДК 621.396

Шкаруппа Валерий Евгеньевич, Шпаковская Оксана Юрьевна,  
Леонова Антонина Валерьевна

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МЭМС-ТЕХНОЛОГИЙ ПОРТАТИВНОГО КАРДИОАНАЛИЗАТОРА ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

*Статья посвящена описанию разработки блока оценки положения позвоночника человека в пространстве, используемого в кардиоанализаторе движений. Блок оценки положения позвоночника в пространстве выполнен на основе инерциальных МЭМС-датчиков MPU6050. Данная разработка войдет в аппаратно-программный комплекс кардиоанализатор физической активности и поможет определить степень физической активности человека, благодаря выделению шагов человека на основе колебательных движений корпуса. Анализ углов отклонения корпуса человека от состояния условной нормы, поможет определить движется человек по ровной или наклонной плоскости. В статье рассмотрена проблема зашумленности сигнала, поступающего с датчика и возможности сглаживания помех.*

*МЭМС-датчик MPU6050, наклон корпуса, гироскоп, акселерометр, ком-  
ментарный фильтр, артефакт.*

Shkaruppa Valery Evgenievich, Spakovskaya Oksana Yuryevna  
Leonova Antonina Valeryevna

## **THE POSSIBILITY OF IMPLEMENTING A PORTABLE CARDIOANALYZER OF HUMAN PHYSICAL ACTIVITY BASED ON MEMS TECHNOLOGIES IS BEING INVESTIGATED**

*The article describes the development of a unit for assessing the position of the human spine in space, used in a cardioanalyzer of movements. The unit for assessing the position of the spine in space is based on the MPU6050 inertial MEMS sensors. This development will be included in the hardware and software complex cardioanalyzer of physical activity and will help determine the degree of physical activity of a person, thanks to the allocation of human steps based on the oscillatory movements of the body. The analysis of the angles of deviation of the human body from the condition of the conditional norm will help to determine whether a person is moving along a flat or inclined plane. The article considers the problem of the noise level of the signal coming from the sensor and the possibility of smoothing interference.*

*MPU6050 MEMS sensor, body tilt, gyroscope, accelerometer, complementary filter, artifact.*

Согласно статистике ВОЗ болезни сердечно-сосудистой системы занимают первое место среди болезней, приводящих к летальному исходу. Людям страдающим нарушением ритма сердца врачи рекомендуют умеренные физические нагрузки, которые позволят тренировать устойчивость сердечно-сосудистой системы к физическим нагрузкам. Человеку, которому рекомендовали врачи умеренные физические нагрузки трудно определить предел индивидуальной допустимой нагрузки и вовремя принять меры в случае ухудшения состояния. Решить проблему с определением оптимального уровня нагрузки возможно с помощью разрабатываемого аппаратно-программного комплекса, состоящего из двух модулей: 1) модуль сбора параметров движения; 2) модуль сбора показателей сердечно-сосудистой системы. Разрабатываемый АПК способен анализировать параметры движения человека (отклонение положения позвоночника в пространстве по трем осям от положения условной нормы; подсчет шагов) и следить за изменениями сердечно-сосудистой системы (ЧСС). Система не позволит превысить пользователю допустимый предел нагрузки, подав предупреждающий вибросигнал, о том, что необходимо сменить режим тренировки и сделать отдых.



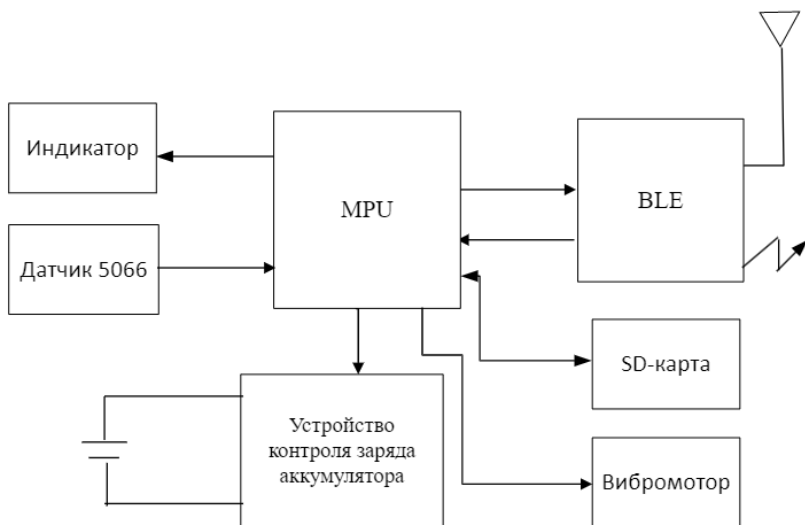


Рис. 2. Структурная схема модуля сбора параметров движения человека на основе МЭМС-датчиков MPU6050

Принцип работы модуля сбора и обработки движений человека, организован следующим образом: датчик МЭМС MPU6050 фиксирует угол наклона корпуса, затем данные передаются на микроконтроллер. Микроконтроллер запускает вибромотор в случае, если угол наклона достигает недопустимых значений; одновременно микроконтроллер отправляет сигнал на смартфон человека, давая инструкцию о необходимости сменить режим тренировки. Запись показателей отклонения корпуса сохраняется на SD-карту, пользователь имеет возможность просматривать результат своей физической активности в пост реальном времени.

Рассмотрение работы инерциального датчика МЭМС на основе платы MPU-6050. Датчик позволяет измерить угловое ускорение и угловую скорость относительно осей X, Y, Z. В состав микросхемы MPU-6050 входят три измерителя ускорения – акселерометра, каждый из них расположен на своей оси X, Y, Z. Если наклонить датчик и взять  $\arctg \frac{ax}{az}$ , то получим угол поворота относительно оси Y; если взять  $\arctg \frac{ay}{az}$ , то получим угол наклона по оси X. Недостатком измерений с помощью акселерометра является то, что данный тип измерения сопровождается шумами и помехами. Достоинством

измерений, выполненных с помощью акселерометра, является независимость от времени.

Микросхема MPU-6050 позволяет также измерить угловую скорость  $\omega$ . Если интегрировать скорость, возможно получить углы. Данные углы не подвержены шумам. Но у данного вида измерений есть недостаток: если в начале измерения есть ошибки, то они «дрейфуют» во времени и усиливаются. Для того чтобы правильно измерить углы отклонения корпуса всадника необходимо объединить оба представленных метода измерения с помощью комплементарного фильтра или фильтра Калмана. Недостатком фильтра Калмана является его сложность настройки и длительное вычислительное время. Комплементарный фильтр использует выходы двух или нескольких датчиков. Комплементарный фильтр представляет собой упрощенную модель фильтра Калмана для одномерного случая, в котором звено интерполяции представляет первое слагаемое. Поскольку угловая оценка с использованием одного датчика акселерометра или гироскопа имеет недостаточную точность, основная идея комплементарного фильтра заключается в объединении выходов гироскопа и акселерометра [3]. Оценка угла составляет полученные данные из суммы их измерений. Интегрирование выхода сигнала гироскопа подается в фильтр высоких частот и выходной сигнал подается в фильтр низких частот. Функция фильтра нижних частот состоит в том, чтобы изменения происходили, отфильтровывая краткосрочные колебания [1].

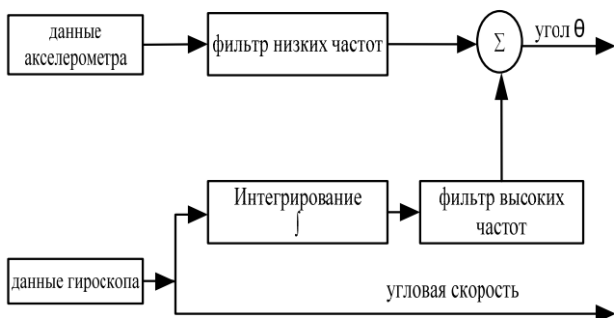


Рис.3. Структурная схема цифрового комплементарного фильтра для МЭМС гироскопа и акселерометра [1]

Математическая модель комплементарного фильтра может быть представлена, как:

$$\theta_{\text{угол}} = \alpha * (\theta_{\text{угол}} + \omega_{\text{гироскоп}} * dt) + (1 - \alpha_{\text{аксел}}), \quad (1)$$

$\theta_{\text{угол}}$  - угол наклона (тангаж или крен),  $\omega$  - фильтр коэффициент,  $\omega_{\text{гироскоп}}$  представляет угловую скорость от гироскопа, и  $\alpha_{\text{аксел}}$  - угол, полученный с помощью данных от акселерометра [1].

Данные от гироскопа и акселерометра должны быть обнулены и масштабированы перед использованием уравнения (1) для вычисления угла. Коэффициент фильтра  $\alpha$  определяется уравнением (2).

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau + dt} \quad (2)$$

где  $\tau$  - постоянное время фильтра [1].

На рис.3 представлены сигналы, записанные во время движения человека.

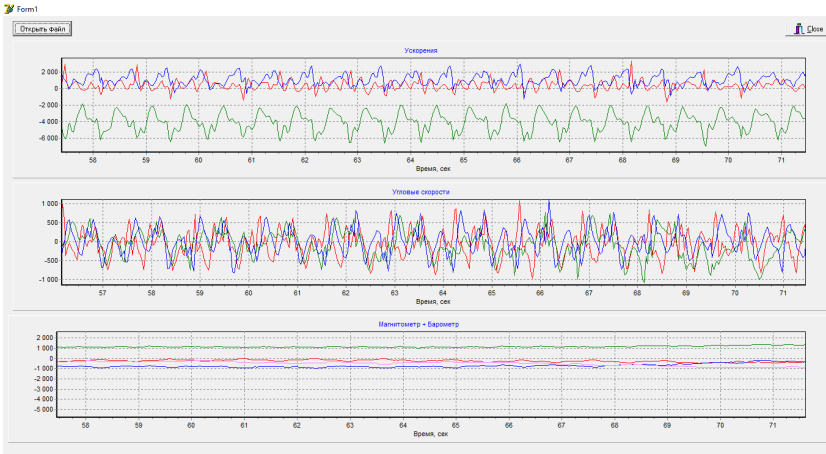


Рис. 4. Сигналы, записанные монитором без обработки

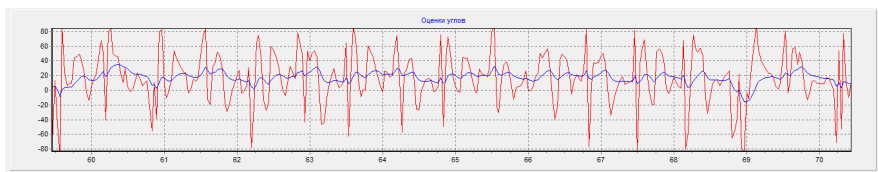
Оценка углов красная линия – по акселерометру, зеленая линия – интеграл от показаний датчика угловой скорости.

На рис.5 видно, что сигнал с акселерометров сильно зашумлен.



Рис.5. Оценка углов

Сигнал от ДУС более гладкий, но имеется дрейф (уход линии вниз).



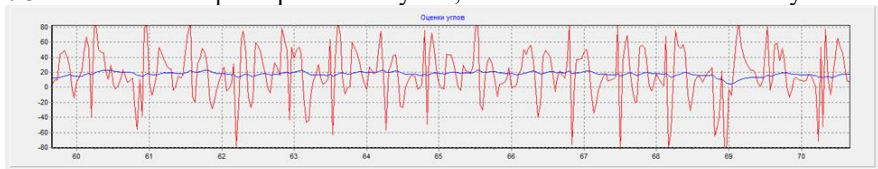
*Рис. 6. Оценка углов с помощью комплементарного фильтра*

Красной линией обозначена оценка углов по акселерометру, синяя линия – сигнал после комплементарного фильтра с параметром сглаживания 0.1.



*Рис. 7. Оценка углов с помощью комплементарного фильтра*

Красной линией обозначена оценка углов по акселерометру, синяя линия – сигнал после комплементарного фильтра с параметром сглаживания 0.3. Сигнал после фильтра более шумен, но более точно отслеживает угол.



*Рис. 8. Оценка углов с помощью комплементарного фильтра*

Красной линией обозначена оценка углов по акселерометру, синяя линия – сигнал после комплементарного фильтра с параметром сглаживания 0.03. Сигнал после фильтра сильно сглажен, динамики изменения на шаге почти не видно.

В результате подбора параметра сглаживания комплементарного фильтра, очевидно, что наиболее гладкий не зашумлённый сигнал, который наиболее четко показал угол изменения динамики в шаге, проявляется при коэффициенте сглаживания 0.1 ([см рис. 5](#)).

Таким образом, комплементарный фильтр позволил избавиться от шума и дрейфа и осуществлять регулируемую фильтрацию оценки угла от помех. Комплементарный фильтр может быть использован для определения фактического угла, сглаживая помех, возникающих при работе акселерометра и гироскопа; позволяет точно определить фактический угол наклона всадника.

Использование блока для оценки параметров движения в комплексе кардиорегистратора физической активности, позволит получить мониторинг ЧСС непосредственно в движении человека, и определить какие именно движения совершал человек в момент изменения ЧСС на основе оценки отклонения корпуса человека в трех плоскостях и оценке колебательных движений на основе которых планируется сделать выделение количества шагов и анализ шагов человека.

### БИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зо Мьо Наин, Щагин А.В., Ле Винь Тханг, Хтин Линн У.* Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микроэлектромеханической системы гироскопа и акселерометра. // Инженерный вестник Дона, №3 (2020) [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6380](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6380).

2. Дистанционное холтеровское мониторирование как одно из перспективных направлений в развитии телемедицины / Ю. Н. Горожанцев, С. Г. Сергиенко, Е. А. Воротынцева, Ю. В. Емельяненко // Российский кардиологический журнал. – 2019. – Т. 24, № S2. – С. 39a-39b. – EDN ZDVIVN.

3. *Euston M, Coote P, Mahony R, Kim J, Hamel.* A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed wing UAV. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, France, September, 22-26, 2008, pp.340- 345.

4. *Князюк О.О., Лукьянова М.В.* Возможность оценки толерантности к физической нагрузке во время холтеровского мониторирования ЭКГ // CardioСоматика. 2013. №S1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnost-otsenki-tolerantnosti-k-fizicheskoy-nagruzke-vo-vremya-holterovskogo-monitorirovaniya-ekg> (дата обращения: 26.05.2024).

**Шпаковская Оксана Юрьевна**, аспирант, Россия, город Таганрог, Институт радиотехнических систем и управления, телефон: +7 961 292-85-15, почта: [oshpakovskaya@sfedu.ru](mailto:oshpakovskaya@sfedu.ru).

**Леонова Антонина Валерьевна**, доцент, Россия, город Таганрог, Институт радиотехнических систем и управления, почта: [leonova@sfedu.ru](mailto:leonova@sfedu.ru).

**Шкаруппа Валерий Евгеньевич**, студент, Россия, город Таганрог, Институт радиотехнических систем и управления, телефон: +7 908 170-60-96, почта: shkaruppa@sfedu.ru.

**Spakovskaya Oksana Yuryevna**, graduate student, Russia, city Taganrog, Institute of Radio Engineering Systems and Management, phone: +7 961 292-85-15, email: oshpakovskaya@sfedu.ru.

**Leonova Antonina Valeryevna**, docent, Russia, city Taganrog, Institute of Radio Engineering Systems and Management, email: leonova@sfedu.ru.

**Shkaruppa Valery Evgenievich**, student, Russia, city Taganrog, Institute of Radio Engineering Systems and Management, phone: +7 908 170-60-96, email: shkaruppa@sfedu.ru.

УДК 612.769

Емелина Елизавета Александровна, Овсянникова Жанна Андреевна,  
Шпаковская Альбина Васильевна

### **ИСПЫТАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ТРЕНИНГА ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ**

*В настоящее время много внимания уделяется изучению функции дыхания и ее влиянию на общее состояние организма. Один из аспектов, которые вызывают особый интерес, - это зависимость скорости и объема воздушного потока от различных факторов. В этой статье будет представлено исследование, проведенное с использованием аппаратно-программного комплекса для диагностики и тренинга внешнего дыхания, с целью выявления связи между скоростью и объемом воздушного потока при дыхании. Знание этих зависимостей может иметь практическую значимость для оптимизации тренировок по улучшению функции дыхания и повышения общей физической подготовки.*

Emelina Elizaveta Alexandrovna, Ovsyannikova Zhanna Andreevna,  
Shpakovskaya Albina Vasilyevna

## **TESTS OF FUNCTIONAL AND MEASURING PROPERTIES OF A HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR ASSESSMENT AND TRAINING OF EXTERNAL RESPIRATION**

*Currently, much attention is paid to the study of respiratory function and its effect on the general condition of the body. One of the aspects that are of particular interest is the dependence of the speed and volume of the air flow on various factors. This article will present a study conducted using a hardware and software complex for the diagnosis and training of external respiration, in order to identify the relationship between the speed and volume of air flow during breathing. Knowledge of these dependencies may be of practical importance for optimizing training to improve.*

**Введение.** Исследование зависимости скорости и объема воздушного потока является важным аспектом диагностики и тренинга внешнего дыхания. Воздушный поток играет ключевую роль в процессе дыхания, обеспечивая поступление кислорода в организм и удаление углекислого газа. Оптимальная скорость и объем воздушного потока существенно влияют на эффективность дыхания и здоровье.

Для изучения этой зависимости разработан аппаратно-программный комплекс, способный измерять скорость и объем воздушного потока при внешнем дыхании. Этот комплекс представляет собой совокупность датчиков и программного обеспечения, которые обеспечивают точные и надежные измерения.

Аппаратно-программный комплекс состоит из специального датчика, размещаемого непосредственно у рта пациента, и программы, что позволяет получить данные о скорости и объеме воздушного потока. Датчик оснащен высокочувствительными сенсорами, которые регистрируют даже мельчайшие изменения в потоке воздуха.

Программа анализирует данные, собранные датчиком, и предоставляет информацию о скорости и объеме воздушного потока. Это позволяет производить диагностику и тренировку внешнего дыхания на основе реальных измерений.

Использование аппаратно-программного комплекса для диагностики и тренинга внешнего дыхания имеет широкий спектр применения, включая спортивную медицину, реабилитацию, пульмонологию и другие области

**Актуальность разработки новых диагностических приборов.** Актуальность разработки новых диагностических приборов особенно важна в области изучения скорости и объема воздушного потока при внешнем дыхании. Измерение и анализ данных параметров имеют большое значение для диагностики и тренировки дыхательной системы, а также для определения эффективности различных дыхательных методик и терапевтических воздействий.

Аппаратно-программный комплекс для диагностики и тренировки внешнего дыхания представляет собой современное устройство, позволяющее проводить точные измерения скорости и объема воздушного потока при дыхании. АПК сконструирован по принципу трубки Пито, внутри которой находится датчик, который регистрирует изменения давления и скорости воздушного потока при выдохе. Аппаратная часть связана с программной частью, которое обрабатывает полученные данные и передает их на смартфон пользователя по радиоканалу.

Использование аппаратно-программного комплекса позволяет проводить исследования на основе полученных численных показателей, что позволяет следить за изменениями показателей дыхательной системы.

Такой аппаратно-программный комплекс имеет широкий спектр применения. Врачи и медицинские специалисты могут использовать его для диагностики и мониторинга заболеваний дыхательной системы, таких как астма, хроническая обструктивная болезнь легких и другие.

Также этот комплекс может использоваться в спортивной медицине и физической реабилитации для тренировки внешнего дыхания, улучшения его эффективности и повышения выносливости.

**Новые возможности обработки данных.** Современные аппаратно-программные комплексы для диагностики и тренинга внешнего дыхания предоставляют уникальные возможности обработки данных, что позволяет более детально изучить зависимость скорости и объема воздушного потока. В результате этого исследования получены новые важные данные о процессе дыхания, которые ранее были недоступны.

Одна из новых возможностей обработки данных заключается в анализе динамики изменений скорости и объема воздушного потока в режиме реального времени. С помощью специальных алгоритмов можно определить особенности дыхательного цикла и выявить его возможные нарушения. Это позволяет проводить более точную диагностику и назначать эффективное лечение пациентам с заболеваниями органов дыхания.



Другая новая возможность - анализ данных в разных фазах дыхательного цикла. Используя специальный алгоритм, можно изучить изменения объема и скорости воздушного потока вдоль всего цикла дыхания. Это помогает выявить нарушения в определенных фазах дыхания, такие как затруднения при вдохе или выдохе, и разработать индивидуальные тренировочные программы для восстановления нормального дыхания.

Использование аппаратно-программного комплекса для диагностики и тренинга внешнего дыхания с новыми возможностями обработки данных значительно расширяет наши познания о процессе дыхания. Это открывает новые возможности в области диагностики и лечения заболеваний органов дыхания и способствует повышению эффективности реабилитации пациентов.

### **Применение передовых технологий сбора и анализа информации.**

Для исследования зависимости скорости и объема воздушного потока с помощью аппаратно-программного комплекса для диагностики и тренинга внешнего дыхания, применяются комфортные неинвазивные технологии сбора и анализа информации.

Таким образом, использование комфортных методов регистрации данных и интеллектуальных систем обработки информации позволяет повысить информативность диагностики скорости и объема воздушного потока с помощью аппаратно-программного комплекса для диагностики и тренинга внешнего дыхания

**Испытание.** Для того чтобы организовать процесс испытания прибора, необходимо разработать аппаратные и программные средства, которые бы поддерживали эти испытания.

Рассмотрим основные задачи, стоящие на этапе испытания:

1. Проверка прибора, как средства измерения.
2. Проверка функционирования всех аппаратно-программных средств прибора.
3. Проверка функционирования средств обработки измерения.

Рассмотрим первую задачу проверки работы прибора.

Пневмотренажер должен измерять поток воздуха, т.е. скорость движения воздуха через фиксированное сечение и косвенно оценивать объем воздуха, проходящего через это сечение путем численного интегрирования потока. Для оценки качества работы пневмотренажера в этих измерительных схемах желательно иметь источник потока воздуха с известными параметрами. Т.е. нужно разработать аппаратное средство, формирующее

положительный или отрицательный поток. Проще всего это сделать, используя систему с изменяющимся воздушным объемом, например цилиндр с поршнем. Пусть цилиндр имеет диаметр  $D$  и ход поршня  $L$ , тогда объем воздуха, вытесняемый из цилиндра

$$V = \pi DL. \quad (1)$$

Если известно время движения поршня  $T$ , то средний поток:

$$F = \frac{V}{T}, \quad (2)$$

$$F = \frac{\pi DL}{T}. \quad (3)$$

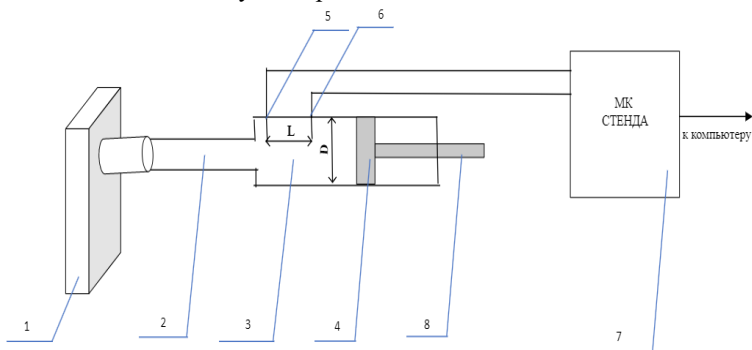
Если мы имеем средство измерения потока  $F$ , а он связан с изменением динамического давления (формула зависимости давления от скорости), то интегрируя поток  $F$ , например методом Эйлера можно определить объем воздуха за время  $T$  и затем сравнить его с объемом цилиндра. Разница будет абсолютной погрешностью измерений. Подытоживая сказанное выше, мы имеем возможность прямым экспериментом определить абсолютную погрешность прибора, работающего в режиме определения объема вдыхаемого или выдыхаемого воздуха.

**Требования к техническим средствам.** Реальная скорость воздуха при вдохе и выдохе может достигать 10 л в секунду. Создание технического средства, которое позволяет оперировать объемом 10 л представляет собой непростую задачу. В основном из-за больших объемов цилиндра. Поэтому для достижения высоких скоростей потока лучше идти по пути увеличения скорости поршня. Если поршень в цилиндре проходит путь  $L$  за 0,1 с это даст скорость 10л/сек . Если в качестве цилиндра использовать отрезок ПВХ трубы диаметром 110мм, то для получения цилиндра объемом в 1 л требуется  $1000 / \pi * 110 = 2,89$  дм =289 см. Для того, чтобы точно измерять время начала и окончания объема нужно установить два датчика положения поршня, которые фиксируют выбранную длину и передают информацию в обрабатывающий компьютер. Требования к этим датчикам: они не должны мешать движению поршня и срабатывать достаточно быстро. Исходя из того, что нам необходимо с помощью датчиков оценивать времена 100мсек, задавшись предельной погрешностью 1%. Получим, что время срабатывания датчика должно быть меньше 0,5с (поскольку датчиков 2 шт).

Очень важный вопрос каким способом приводить поршень в движение. Могут быть использованы различные варианты (пневматический, гидравлический и ручной привод). Гидравлический и пневматический приводы обеспечивают большие скорости движения поршня, но требуют достаточно громоздкого оборудования (электро-, гидро-клапаны, компрессоры,

аккумуляторы давления, фильтры). Электропривод напротив, достаточно компактен и просто сопрягается с микроконтроллером, однако он плохо приспособлен к созданию быстрого движения поршня. При расстояниях 3 дм можно обеспечить 2-3 сек, но не 0,1 сек. Поэтому наиболее простым решением является применение ручного привода. Усилие рук человека позволяет при силе сопротивления 2-3 кг на расстоянии 3 дм обеспечить скорость движения 0,1 -0,2 сек.

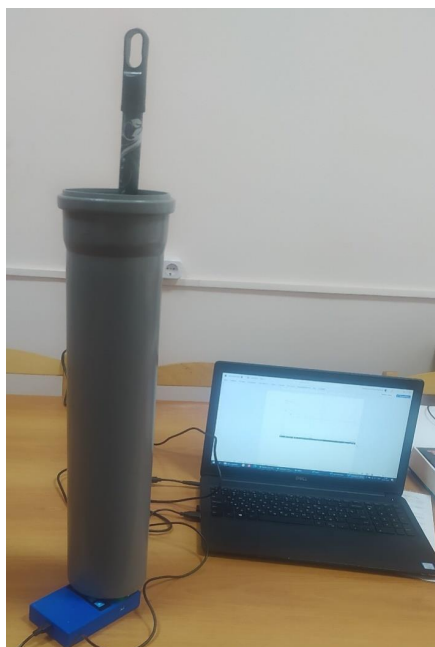
**Методика проверки метрологических свойств.** Выход цилиндра необходимо соединить с трубой пневмотренажера, запустить программу интегрирования потока и сделать несколько энергичных движений поршнем, чтобы амплитуда этих движений была не меньше  $L$ . При этом микроконтроллер стенда фиксирует в виде графика значение объема и одновременно моменты срабатывания первого и второго датчика срабатывания первого и второго датчиков движения поршня. При обработке результатов на графике вычитается значение объема, соответствующее временам срабатывания датчиков. Разность объемов должна соответствовать объему цилиндра. Т.е. отличие измеренного объема от известного объема цилиндра представляет собой абсолютную погрешность объема.



*Рис. 1. Структурная схема испытательного стенда прибора (1 – пневмотренажер; 2 - патрубок; 3 – цилиндр; 4 – поршень; 5,6- датчики положения поршня; 7 - микроконтроллер стенда; 8 - ручной шток поршня)*



*Рис. 2. Тренд данных с АЦП (по оси ОХ – номер посылки, по оси ОУ – кванты АЦП)*



*Рис. 3. Тестовая модель актов вдоха и выдоха с помощью калибрующего устройства*

Результатом испытаний является определение коэффициента пропорциональности между принимаемыми цифровыми значениями и объемом

воздуха. Зная данный коэффициент, можно по результатам данных с АЦП определить объем воздуха в мл. Коэффициент пропорциональности определяется следующим образом: зная  $R$  – радиус цилиндра,  $h$ –высоту цилиндра был рассчитан объем цилиндра, изображенного на рисунке 2.3.  $V=\pi*R^2*h=3,14*25*40=3140$  мл= 3,14 л. Поскольку максимальной амплитуды график, достигает на отметке 800 и -800 квантов АЦП, возможно определить цену деления:  $= 3140/800 =3,925$ см/квант  $=3,925$  мл. Значит на 1 квант приходится 3,925 объема воздуха. Коэффициент пропорциональности надо учитывать при использовании прибора.

Таким образом, для обеспечения требуемой точности и достоверности диагностических данных, получаемых с помощью разработанного комплекса, необходимо постоянно контролировать и учитывать коэффициент пропорциональности при калибровке и настройке прибора.

**Заключение.** В статье было проведено испытание прибора с помощью разработанных для задач проекта методик проверки метрологических свойств прибора. Данный прибор при его более глубокой апробации может занять достойное место в линейке приборов, необходимых людям для восстановления здоровья.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Студенческая библиотека//Дыхательный акт и вентиляция легкихStudents-library.com [Электронный ресурс] URL:<https://students-library.com/library/read/33306-dyhatelnyj-akt-i-ventilacia-legkih>(дата обращения: 23.12.2021).

2. *Леонова А.В., Синютин С.А., Шпаковская О.Ю.* Разработка портативного пневмотренажера для тренировки дыхательной системы в борьбе с последствиями от перенесенного COVID-19//Инженерный вестник Дона, №4 (2022).URL:[ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7575](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7575) (дата обращения 5.05.2022).

3. *Фурманова Е.А.* Spirografia и spirometriya: Официальный сайтFoodandHealth. [Электронный ресурс]URL:<https://foodandhealth.ru/diagnostika/spirografiya-i-spirometriya>(дата обращения: 12.01.2022).

4. *Студми.* Учебные материалы для студентов//Биотехнические системы медицинского назначения//Принципы проектирования БТС для spirometrii. [Электронный

ресурс]URL:[https://studme.org/189443/tehnika/printsipy\\_proektirovaniya\\_spirometrii](https://studme.org/189443/tehnika/printsipy_proektirovaniya_spirometrii) (дата обращения: 25.03.2022).

5. *Синьков А.В., Синькова Г.М.* Исследование функции внешнего дыхания. Иркутск: ИГМУ, 2015. 15 с.

6. *Группи М.А.* Патофизиология легких. М.: Восточная книжная компания, 1997. 344с.

7. *Квашин С.Е., Морозов А.А.* Автоматизированная обработка спирограмм на ЭВМ. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 11 с

8. *Шурыгин И.А.* Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия. -СПб. БИНОМ, 2000. 301 с.

9. *Моисеев А.В., Соколенко А.В., Ульянычева В.Ф.* Анализ, разработка и исследование оптимального метода измерения скорости воздушного потока в процессе дыхания //Научный журнал "Информатика и системы управления"//ISSN 1814-2400.URL:<https://ics.pnu.edu.ru>. (дата обращения 13.05.2022).

10. Принципы работы устройств. [Электронный ресурс]URL:<https://principraboty.ru>(дата обращения: 2.06.2022)

11. Проконтроллер ATmega2560[Электронный ресурс]URL:<https://future2day.ru/pro-kontroller-atmega2560>(дата обращения 12.05.2022).

12. Российское ардуино-сообщество «Android приложения для Arduino» [Электронный ресурс]URL:<https://arduinomaster.ru/projects/android-arduino-prilozheniya>(дата обращения 17.04.2022).

**Емелина Елизавета Александровна** – студент, кафедра встраиваемых радиосистем и управления Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; 347928; e-mail: [emelina@sfedu.ru](mailto:emelina@sfedu.ru).

**Овсянникова Жанна Андреевна** – студент, кафедра встраиваемых радиосистем и управления Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; 347928; e-mail: [ovsianniko@sfedu.ru](mailto:ovsianniko@sfedu.ru).

**Шпаковская Альбина Васильевна**– учащаяся 11 класса «В» МАОУ лицея №28, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Трудовых Резервов, д. 1; e-mail: [ryzikcizik995@gmail.com](mailto:ryzikcizik995@gmail.com).

**Emelina Elizaveta Alexandrovna** – student, department of embedded radio systems and control Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education

“Southern Federal University”; 347928, Russia, Taganrog, 44, Nekrasovskiy; e-mail: [emelina@sfedu.ru](mailto:emelina@sfedu.ru);

**Ovsyannikova Zhanna Andreevna** – student, department of embedded radio systems and control Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”; 347928, Russia, Taganrog, 44, Nekrasovskiy; e-mail: [ovsianniko@sfedu.ru](mailto:ovsianniko@sfedu.ru);

**Shpakovskaya Albina Vasilyevna** – student of 11th grade “B” of MAOU Lyceum No. 28, Rostov region, Taganrog, lane. Trudovykh Reservov, 1; e-mail: [ryziczik995@gmail.com](mailto:ryziczik995@gmail.com).

*Научное издание*

**Компьютерные и информационные технологии в науке,  
инженерии и управлении**

**«КомТех-2024»**

**Том 2**

Материалы Всероссийской научно-технической конференции  
с международным участием

*Отв. за выпуск* Клевцов С.И.

*Оригинал-макет подготовила* Замай Н.А.

Подписано в печать 30.09.2024 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Усл. печ. лист. 21,39.

Уч.-изд. л. 15,49. Тираж 20 экз. Заказ № 9658.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции  
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.  
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.