

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ

Том 31, № 3, 2025

Научный журнал издается с 1995 года

Учредитель

Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Журнал включен в базы данных:

DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЕ

Лопатова Н. Г. Управление экономическими рисками цифрового преобразования организаций.....	5
Климченя Л. С. Зарубежный опыт цифровой трансформации розничной торговли	14
Лукашевич М. М. Разработка модели машинного обучения для системы «умный дом».....	22
Цедрик А. В. Перспективные направления развития электроэнергетики в условиях цифровой трансформации в Республике Беларусь	33

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ким Т. Ю., Прокопович Г. А. Технология создания цифровых двойников для оптимизации конструктивных параметров роботов и их систем управления.....	43
Барановский И. В., Тимошкевич И. В. Анализ мирового опыта внедрения BIM-технологий и их интеграция с телекоммуникационными системами: перспективы для Республики Беларусь	54
Курочка К. С., Башаримов Ю. С. Нейросетевая модель автогенерации тестов для студентов в системе Moodle на основе анализа методических материалов	66
Шан Вэньли, Козлова Е. И. Развитие виртуальных анатомических лабораторий на примере практики в медицинском образовании.....	76

Главный редактор Вадим Анатольевич Богуш,
д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)

Редакционная коллегия

Листопад Н. И., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь – заместитель главного редактора

Беляцкая Т. Н., д. э. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь – заместитель главного редактора

Певнева Н. А., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь – ответственный секретарь редакционной коллегии

Сафонов В. Г., д. ф.-м. н., профессор, Институт математики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Байнев В. Ф., д. э. н., к. т. н., профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Ковалёв М. М., Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д. ф.-м. н., профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Курбацкий А. Н., Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Хацкевич Г. А., д. э. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Голенков В. В., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Быков А. А., д. э. н., профессор, Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Сирота А. А., чл.-корр. Международной академии информатизации, д. т. н., профессор, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация

Малинецкий Г. Г., д. ф.-м. н., профессор, Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Глухов В. В., д. э. н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Плотников В. А., д. э. н., профессор, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Касумов В. А., д. т. н., профессор, Бакинский инженерный университет, г. Хырдалан, Азербайджанская Республика

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Издание перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 10 июня 2022 г.
Регистрационный номер 662

Подписано в печать 15.09.2025. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 8,7. Тираж 52 экз. Заказ 166.

Адрес редакции: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-41.
dig.tr@bsuir.by; <http://dt.bsuir.by>

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 24.12.2020.
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»,
оригинал-макет, оформление, 2025

DIGITAL TRANSFORMATION

V. 31, No 3, 2025

The scientific journal is being published since 1995

Founder

Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”

The Journal is included in the following databases:
DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, RISC

CONTENTS

ECONOMIC SCIENCES, EDUCATION

Lopatova N. G. Managing the Economic Risks of Digital Transformation of Organizations	5
Klimchenia L. S. Foreign Experience of Retail Digital Transformation.....	14
Lukashevich M. M. Developing a Machine Learning Model for a Smart Home System	22
Tsedrik A. V. Promising Directions of Development of Electric Power Industry in the Context of Digital Transformation in the Republic of Belarus	33

TECHNICAL SCIENCES

Kim T. Yu., Prakapovich R. A. Technology for Creating Digital Twins to Optimize the Design Parameters of Robots and Their Control Systems	43
Baranovsky I. V., Tsimashkevich I. V. Analysis of Global Experience in Implementing BIM Technologies and Their Integration with Telecommunication Systems: Prospects for the Republic of Belarus.....	54
Kurochka K. S., Basharymau Y. S. Neural Network Model for Automated Test Generation for Students in the Moodle System Based on the Analysis of Methodological Materials.....	66
Shang Wenli, Kozlova E. I. Development of Virtual Anatomy Laboratories in Practice in Medical Education	76

Editor-in-Chief Vadim A. Bogush, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor,
Rector of the Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Editorial Board

Nikolai I. Listopad, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Deputy Chief Editor
Tatiana N. Belyatskaya, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Deputy Chief Editor
Natalia A. Pevneva, Cand. Sci., (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Executive Secretary of the Editorial Board
Vasily G. Safonov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Valery F. Baynev, Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus
Mikhail M. Kovalev, Honored Scientist the Republic of Belarus, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus
Alexander N. Kurbatski, Honored Scientist of the Republic of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus
Gennady A. Khatskevich, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir V. Golenkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus
Aleksei A. Bykov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Belarus State Economic University, Minsk, Republic of Belarus
Alexander A. Sirota, Corresponding Member of International Informatization Academy, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation
Georgiy G. Malinetskiy, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Vladimir V. Glukhov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation
Vladimir A. Plotnikov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russian Federation
Vagif A. Gasimov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Baku Engineering University, Khirdalan, Republic of Azerbaijan

Responsible Secretary T. Mironenka

Publication is re-registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2022, June, 10th
Reg. No 662

Signed for printing 15.09.2025. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. I. 10,0. Ed.-ed. I. 8,7. Edition 52 copies. Order 166.

ADDRESS

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6, P. Brovki St., 220013, Minsk
Tel.: +375 17 293-88-41
dig.tr@bsuir.by; <http://dt.bsuir.by>

Printed in BSUIR. License LP No 02330/264 from 24.12.2020.
6, P. Brovki St., 220013, Minsk



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-5-13>

УДК 338.2

УПРАВЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИМИ РИСКАМИ ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ

Н. Г. ЛОПАТОВА

Институт экономики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Цифровая трансформация организации связана со значительной неопределенностью, которая особенно высока в экономическом измерении. Выявление потенциальных угроз и разработка необходимых мер по упреждению негативного воздействия факторов внешней и внутренней среды становятся ключевыми задачами управления рисками. В статье отражена значимость превентивного управления рисками, в основе которого лежит комплексный проактивный подход. Представлен комплекс мер по упреждению рисков в рамках стратегического управления, управления проектами, управления стоимостью. Исследование показало, что цифровые инициативы часто выходят за рамки типичных способов принятия инвестиционных решений в организации. Определены аспекты формирования инвестиционных корзин в зависимости от дифференциации цифровых проектов по типу и масштабу. Обосновывается долгосрочный подход к инвестициям в новые технологии, базирующийся на портфельном подходе. Выявлена взаимосвязь инвестиционных целей и цифровых технологий. Раскрыто содержание альтернативных методов измерения эффективности при оценке цифровых проектов, определены преимущества и ограничения использования. Установлено, что данные методы в большей степени отражают специфику принятия инвестиционных решений в контексте характерных особенностей цифровой трансформации. Предложена концептуальная модель управления экономическими рисками цифрового преобразования организации, обусловленная взаимным влиянием стратегических, проектных и финансовых процессов.

Ключевые слова: цифровая трансформация, цифровые технологии, экономические риски, модель управления, эффективность цифровых инвестиций.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лопатова, Н. Г. Управление экономическими рисками цифрового преобразования организаций / Н. Г. Лопатова // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-5-13>.

MANAGING THE ECONOMIC RISKS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF ORGANIZATIONS

NATALIA G. LOPATOVA

The Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Digital transformation of an organization is associated with significant uncertainty, which is especially high in the economic dimension. Identifying potential threats and developing the necessary measures to prevent the negative impact of external and internal environmental factors are becoming key tasks of risk management. The article reflects the importance of preventive risk management, which is based on a comprehensive proactive approach. A set of measures to prevent risks in the framework of strategic management, project management, and cost management is presented. The study showed that digital initiatives often go beyond the typical ways of making investment decisions in an organization. The aspects of forming investment baskets depending on the differentiation of digital projects by type and scale are determined. A long-term approach to investing in new technologies based on a portfolio approach is substantiated. The relationship between investment goals and digital technologies is revealed. The content of alternative methods for measuring efficiency in assessing digital projects is disclosed, the advantages and limitations of their use are determined. It has been established

that these methods to a greater extent reflect the specifics of making investment decisions in the context of the characteristic features of digital transformation. A conceptual model for managing economic risks of digital transformation of an organization is proposed, caused by the mutual influence of strategic, project and financial processes.

Keywords: digital transformation, digital technologies, economic risks, management model, efficiency of digital investments.

Conflict of interests. The author declares that there is no conflict of interest.

For citation. Lopatova N. G. (2025) Managing the Economic Risks of Digital Transformation of Organizations. *Digital Transformation*. 31 (3), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-5-13> (in Russian).

Введение

Цифровое преобразование является центральной задачей для большинства организаций, открывая возможности для дальнейшего роста и становясь источником конкурентного преимущества. Каждая компания трансформирует свою деятельность исходя из собственных целей и задач, определяя принципы, приоритеты и подходы к управлению в контексте собственного стратегического видения, сопоставляя влияние рисков с возможностями для роста. Выявление потенциальных угроз и разработка необходимых мер с целью их упреждения рассматриваются как ключевые задачи управления рисками.

Оценка в белорусских организациях рисков, препятствующих цифровому преобразованию, проведенная в соответствии с [1] на основании данных [2, с. 388–392], показала, что значительную угрозу для большинства из них представляют экономические риски, связанные с инвестиционными возможностями, а именно – с высокой стоимостью проектов и недостатком собственных финансовых ресурсов для реализации цифровых инициатив, а также с длительными сроками окупаемости вложений в цифровые технологии. Такие инновационно-инвестиционные аспекты, как сложность оценки экономических эффектов от внедрения инициатив цифрового преобразования, часто обусловленная неопределенностью сроков реализации и масштабирования пилотных проектов, в том числе в связи с техническими трудностями внедрения и интеграции цифровых инноваций, наряду с отсутствием четкого экономического обоснования, оправдывающего целесообразность инвестиций, также связаны с высокой степенью риска. По мере увеличения организациями инвестиций в цифровое преобразование влияние рисков будет только усиливаться. Возникает необходимость совершенствования подходов к реализации цифровых инициатив, направленных на упреждение неблагоприятного воздействия факторов внешней и внутренней среды.

Управление внутренними и внешними рисками цифрового преобразования

Проблематика управления внутренними и внешними рисками в рамках цифрового преобразования организации рассматривается в ряде исследовательских работ зарубежных и отечественных ученых, среди которых: С. Намбисан, К. Лийтинен, А. Майхжак, М. Сонг [3], А. Л. Куренков [4], Д. С. Пашенко, Н. М. Комаров [5], Т. А. Головина, И. Л. Авдеева, Д. А. Суханов [6], В. Б. Криштаносов [7]. Ключевые концепции рассматривают управление рисками как отдельную область, включающую в себя процессы, связанные с планированием, выявлением, анализом и оценкой (качественной/количественной), реагированием (планирование, осуществление) и непрерывным мониторингом угроз и уязвимостей. Вместе с тем осуществление цифровой трансформации (ЦТ) в условиях растущей неопределенности, возникающей на фоне все более сложной и меняющейся деловой среды, обусловленной экономической нестабильностью, быстрым изменением технологического ландшафта, предопределяет значимость превентивного управления рисками, в основе которого лежит комплексный проактивный подход.

В контексте построения гибкой интегрированной системы, способной выявлять и минимизировать влияние наиболее значимых угроз экономического характера при реализации цифровых инициатив, управление рисками, связанное, в частности, с формированием бизнес-кейсов, со степенью зрелости технологий, с определением масштабов цифровых проектов, становится неотъемлемой частью других функциональных направлений, в том числе стратегического управления, управления стоимостью, управления проектами (рис. 1).



Рис. 1. Концептуальная модель управления экономическими рисками цифрового преобразования организации (источник: разработка автора)

Fig. 1. A conceptual model for managing economic risks of digital transformation of an organization (source: author's development)

Формирование комплекса мер по упреждению рисков в данных областях управления, обеспечивающих структурированный подход к планированию, согласованию и внедрению цифровых инициатив в контексте максимизации стоимости, играет ключевую роль в достижении долгосрочных целей компании. Стратегические пути ЦТ могут быть сведены к трем основным направлениям: первое фокусируется на ценностных предложениях для клиентов, второе – на преобразовании операционной модели, третье объединяет эти два подхода¹. Определение концептуальных подходов к ЦТ и соответствующих цифровых технологий/решений для конкретной компании зависит от ее стратегических целей, отраслевого контекста, конкурентного давления и ожиданий клиентов.

Наиболее подходящей стратегией ЦТ в отраслях, где продукт представляет собой, как правило, физический актив, может стать изменение методов работы организации (изменение операционной модели). Усилия будут направлены на внедрение технологий с целью автоматизации/цифровизации и интеграции операций и процессов, что будет способствовать снижению затрат, а также концентрировать внимание на задачах, обеспечивающих большую добавленную стоимость. В других сферах, таких как финансы и розничная торговля, где услуги все чаще предоставляются онлайн, часто с помощью мобильных устройств, целесообразно вначале сосредоточиться на повышении ценности предложения для клиентов с помощью создания цифрового контента и увеличения вовлеченности с последующей интеграцией цифровых операций.

Вместе с тем компаниям некоторых отраслей, например, автомобильной, для успешной ЦТ необходим одновременный пересмотр как ценностного предложения для клиентов, так и операционной модели. Так, транспортные средства больше не рассматриваются как изолированные материальные товары, которые обеспечивают ценность, основанную на использовании, а все чаще как объекты, объединяющие различные заинтересованные стороны, устройства, функции и данные в согласованные системы совместного создания стоимости, что позволяет форми-

¹ Berman, S. J. Digital Transformation: Creating New Business Models Where Digital Meets Physical / S. J. Berman, R. Bell // Executive Report, IBM Global Business Service. New York, 2011

ровать дополнительные преимущества, такие как интеллектуальная мобильность, повышенная безопасность или индивидуальный комфорт [8].

Общая концепция учета экономических эффектов от трансформации на всем этапе цифрового преобразования организации и цепочки создания стоимости должна оценивать возможности и эффекты. Финансовые вложения в цифровые технологии/решения обусловлены целями компании и направлены на повышение эффективности, включая улучшение бизнес-процессов, оптимизацию активов и ресурсов, повышение качества обслуживания клиентов и построение новых бизнес-моделей².

При планировании эффектов от инвестиций в цифровое преобразование принимаемые решения следует рассматривать в первую очередь через призму видения и бизнес-стратегии организации, целей приобретения технологии, с учетом развертывания соответствующей инфраструктуры данных, а не возможностей приложения. Для получения максимального эффекта от внедрения и интегрирования различных цифровых технологий компаниям необходимо обеспечение долгосрочного подхода к инвестициям в новые технологии (табл. 1).

Таблица 1. Соответствие инвестиционных целей и цифровых технологий
Table 1. Alignment of investment goals and digital technologies

Цель инвестиций	Ключевые цифровые технологии и решения
Операционные процессы (новые возможности повышения эффективности)	Интернет вещей Робототехника Аналитика больших данных Инструменты искусственного интеллекта Цифровой двойник Аддитивные технологии и др.
Опыт и результаты взаимодействия с клиентами (повышение ценности предложения для клиента)	Аналитика больших данных Облачные технологии Социальные сети и мобильные технологии Цифровые платформы Аддитивные технологии и др.
Новая модель бизнеса	Аналитика больших данных Инструменты искусственного интеллекта Социальные сети и мобильные технологии Бизнес-платформы/экосистемы Блокчейн и др.
<i>Примечание – Разработка автора.</i>	

Прежде чем рассматривать ту или иную технологию, следует провести ее оценку с позиций средне- и долгосрочной перспектив с учетом возможностей повышения эффективности за счет новых комбинаций использования или внутреннего масштабирования, специфики технического обслуживания (виды, периодичность, интенсивность) и обновлений программного обеспечения (ПО), а также готовности технической инфраструктуры, в том числе сетевой. При определении приоритетов внедрения тех или иных цифровых разработок нужно проанализировать затраты и выгоды по каждому альтернативному варианту с учетом конкретных требований к системе, а также убедиться в наличии организационных структур, навыков и экспертных знаний, необходимых для использования, обновления и адаптации решения.

При бюджетировании капиталовложений в новые технологии/решения целесообразно провести стадию пилотирования с целью оценки локального эффекта от внедряемого продукта. Чтобы снизить неопределенность, пилотный проект должен быть разделен на этапы с четким определением объема работ, сроков выполнения, метрик и инструментов для контроля результата. Также на начальном этапе крайне важно определить «точки невозврата», при достижении которых необходимо принятие решения о приостановке или об отказе от реализации проекта в целях минимизации финансовых рисков в связи с неприменимостью тестируемого цифрового решения для бизнес-процесса. При выборе цифровых решений можно рассматривать апробиро-

² Digital Transformation Initiative: Maximizing the Return on Digital Investments [Electronic Resource] // World Economic Forum. Mode of access: http://www3.weforum.org/docs/DTI_Maximizing_Return_Digital_WP.pdf. Date of access: 09.09.2024.

ванные коробочные решения или масштабировать общедоступные успешные пилотные проекты с учетом отраслевой специфики.

На выбор подходящих технологий также влияют сроки реализации, которые будут варьироваться в зависимости от необходимости разрабатывать технологическое решение собственными силами, интегрировать с существующими аппаратно-программными блоками или вводить готовый внешний продукт. Разделение задач в проектах ЦТ, а также передача некоторых из них на аутсорсинг позволяют ускорить цикл разработки и не тратить время на поиск и развитие экспертных компетенций внутри команды. В этой связи важным является разработка стратегии выбора поставщика технологического решения и партнерства с ним. Исследование, проведенное Boston Consulting Group³, показало, что большинство компаний, добившихся успеха в ЦТ, использовали консалтинговые фирмы и сочетание инсорсинга и аутсорсинга для реализации своих программ. Соединение экспертных знаний является оптимальным, когда стратегия поставщика разрабатывается в начале инициативы.

С целью снижения потенциальных рисков при выборе поставщика решений первостепенное значение имеет ценовая модель, которая должна быть прозрачной и конкурентоспособной, включать подробную разбивку затрат, учитывать дополнительные расходы, связанные с проектом. В зависимости от размера и сложности проекта пристального внимания заслуживают такие критерии, как компетентность поставщика (наличие необходимых технических знаний и навыков, опыта для успешного завершения проекта), анализ подходов к разработке ПО, защита пользовательских данных и др. Немаловажными являются понимание им отраслевой специфики, бизнес-процессов и нормативно-правовой среды, использование гибких методов, позволяющих адаптировать проект к меняющимся бизнес-требованиям, ресурсам и возможностям масштабирования решения по мере необходимости, а также осуществление последующей поддержки и технического обслуживания.

Изменения, вызванные внедрением цифровых инициатив, особенно масштабные, часто выходят за рамки типичных способов принятия инвестиционных решений в организации. Формирование инвестиционных корзин зависит от дифференциации цифровых проектов по типу и масштабу. Для инвестиций, связанных с поддержкой или незначительными функциональными улучшениями действующих решений, имеет смысл использовать такие ключевые показатели, как соответствие графику, бюджету, а также достижение необходимого качества и производительности. Осуществление инициатив, направленных в том числе на внедрение платформенных решений, формирование цифрового клиентского опыта, предполагает разработку комплексных бизнес-кейсов, более крупные бюджеты, мониторинг рентабельности инвестиций (ROI) с целью оценки влияния изменений на достижение бизнес-целей. При реализации стратегических целей, направленных на разработку на базе цифровых технологий инновационных товаров и услуг, новых каналов продаж, целесообразно использовать венчурные инвестиции, а также установить соответствующие количественные и качественные показатели в контексте расширения экосистемы взаимодействия различных участников цепочки создания стоимости.

Определиться с инвестициями в некоторые цифровые технологии достаточно трудно в силу различных причин: степени зрелости – многие из них все еще находятся на стадии исследования (например, ИИ, блокчейн), сложности интеграции с существующим корпоративным ИТ-стеком и т. д. Мобильная связь, включая устройства, ПО, инфраструктуру, социальные сети, а также робототехника обладают более высокой степенью зрелости по сравнению с другими, так как имеют большое число конкретных вариантов использования и ясную ожидаемую доходность инвестиций. В этой связи внедрение цифровых технологий может рассматриваться как инвестиции с «фиксированной» технологической границей, при которой все технологии известны как ранее использованный капитал, или как инвестиции, связанные с новыми для компании технологиями, многие из которых не внедряются отдельно, а интегрируются с другими зрелыми технологиями. Выбор стратегии «сейчас или позже» обусловлен, с одной стороны, желанием получить конкурентные преимущества от раннего внедрения цифровых инноваций, с другой – необходимостью формирования инвестиционного портфеля на основании оценки стадии зрелости и барьеров

³ Himmelreich, H. Your Digital Transformation Needs a Smart Vendor Strategy [Electronic Resource] / H. Himmelreich, I. Oshri // Boston Consulting Group. Mode of access: https://web-assets.bcg.com/img-src/BCG-Your-Digital-Transformation-Needs-a-Smart-Vendor-Strategy-Feb-2020_tcm9-238747.pdf. Date of access: 23.06.2024.

для внедрения конкретных технологий с учетом приемлемого срока окупаемости и анализа сопутствующих рисков.

Оценка эффективности инвестиций имеет важное значение для любой организации, являясь обязательным условием при выборе инвестиционного портфеля, основанного на ряде критериев. Финансовые показатели, обычно измеряемые с помощью таких параметров, как рост выручки, прибыльность, снижение затрат, являются важнейшими критериями успешной реализации бизнес-стратегии. Вместе с тем на сегодняшний день нет единой методологии измерения отдачи от внедрения цифровых инноваций на уровне компаний. Традиционные показатели эффективности, такие как свободные денежные потоки (FCF), чистая приведенная стоимость (NPV) и другие, являясь базой инвестиционного анализа, имеют ограниченное использование при оценке цифровых инвестиций, так как предполагают длительные сроки окупаемости и не позволяют оценить нематериальные выгоды и долгосрочные стратегические последствия, в том числе повышение удовлетворенности клиентов и ценности бренда, расширение возможностей внедрения инноваций и др. [9].

При реализации цифровых инициатив необходимо использовать комплексный подход, включающий измерение эффектов от цифровых инвестиций в таких областях, как клиенты, сотрудники, производство и др. Каждая область связана с конкретными метриками и ключевыми показателями эффективности, которые позволяют компаниям более точно отслеживать и оценивать влияние своих цифровых инициатив и при необходимости управлять процессом внедрения, например, достижение максимальной загрузки мощностей производства, поддержка заданного уровня качества продукции, снижение себестоимости выпускаемой продукции, сокращение сроков вывода продуктов на рынок, эффективное взаимодействие с клиентами и др.

Традиционные методы бюджетирования капиталовложений в основном базируются на прямых финансовых показателях, поддающихся количественной оценке. К их недостаткам можно отнести отсутствие гибкости управления для изменения денежных потоков в ходе расширения, сокращения или отмену проекта на основе полученной новой информации.

Все чаще для измерения эффективности цифровых инвестиций используют альтернативные методы, основанные на портфельном подходе, расширении классических моделей дисконтированных денежных потоков, на сравнении различных альтернатив с использованием оценки стоимости жизненного цикла, современной инвестиционной аналитики, в основе которой – анализ огромных потоков данных при помощи цифровых интеллектуальных технологий [10–13] (табл. 2). Данные методы в той или иной степени отражают специфику принятия инвестиционных решений в контексте характерных особенностей ЦТ, а именно:

- сетевые капиталовложения, в частности, в телекоммуникационную инфраструктуру, как правило, имеют ограниченные альтернативные применения, что обуславливает восприятие данных инвестиций как необратимых;

- высокую степень неопределенности сроков реализации и масштабирования проектов в условиях постоянных изменений, вызванных ускоренными темпами технологического развития, меняющимися потребностями клиентов и переменчивостью рынка;

- расширение спектра рисков в рамках внешней и внутренней среды.

Использование данных методов бюджетирования капиталовложений, наряду с традиционными, может обеспечить положительную доходность и отдачу от инвестиций в цифровое преобразование, способствуя достижению стратегических целей. В конечном итоге, принятие решения об инвестировании связано с балансом затрат и выгод для конкретного проекта и обуславливает индивидуализированный, а не универсальный подход к реализации цифровых инициатив, учитывающий специфику деятельности и уровень цифровой зрелости организации.

Заключение

1. Проекты по внедрению цифровых инноваций подвержены значительной неопределенности, что определяет значимость новых подходов к управлению различными процессами в организации. Трансформация организации, связанная с внедрением цифровых технологий, перестает носить фрагментированный характер на уровне отдельного проекта. Все чаще изменения рассматриваются в контексте портфеля интегрированных цифровых инициатив с различными профилями риска и доходности, которые реализуются параллельно и дополняют друг друга.

Таблица 2. Сравнительный анализ альтернативных методов измерения эффективности цифровых инвестиций в соответствии с функциональными направлениями
Table 2. Comparative analysis of alternative methods for measuring the effectiveness of digital investments in accordance with functional areas

Метод	Функциональное направление	Преимущество	Недостаток/ограничение
Анализ затрат на жизненный цикл (LCCA) – метод экономической оценки, в рамках которого учитываются все затраты и выгоды, связанные с проектом на протяжении всего срока его действия, что обеспечивает большую финансовую устойчивость	Управление рисками. Управление проектом. Управление инвестиционным портфелем	Позволяет проводить комплексную оценку, учитывая не только первоначальные инвестиции. Согласует инвестиции с долгосрочными финансовыми целями и стратегиями компании. Акцент на устойчивости	LCCA преимущественно фокусируется на количественных затратах и выгодах. Не учитывает такие нематериальные факторы, как удовлетворенность клиентов, лояльность к бренду и др.
Современная инвестиционная аналитика (прогнозная аналитика, интеллектуальный анализ) – метод оценки, использующий инструменты аналитики больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта	Управление рисками. Управление проектами. Управление инвестиционным портфелем	Повышает эффективность управления инвестиционным портфелем за счет генерирования более точных прогнозов затрат, оптимизации распределения активов. Реализует управление проектами на основе проактивного планирования и принятия стратегических решений. Значительно улучшает управление инвестиционными рисками путем выявления потенциальных угроз на ранних этапах жизненного цикла проекта и разработки мер по их упреждению	Необходимость обеспечения достаточного объема и качества анализируемых данных (корректность, полнота)
Сбалансированная система показателей (BSC) – инструмент стратегического управления результативностью, включающий систему измеримых показателей эффективности в четырех областях: бизнес-процессы, клиенты, финансы, обучение и рост	Стратегическое управление	Улучшает стратегическое планирование и мониторинг эффективности по ключевым параметрам. Обеспечивает соответствие организационных мероприятий общим стратегическим целям. Улучшает коммуникации. Обеспечивает принятие решений и совершенствование стратегического управления на основе данных	Сложности при разработке системы показателей (большое количество, неправильные метрики и т. д.), а также с дальнейшим сбором качественных данных для всех метрик. Недостаточное внимание к внешним факторам, отсутствие анализа рисков
Анализ реальных опционов (ROA) – метод оценки инвестиций, обеспечивающий более динамичную и всестороннюю оценку в проектах с высокой неопределенностью	Управление рисками. Управление инвестиционным портфелем	Обеспечивает структурированную основу для оценки различных стратегических вариантов, поддерживая гибкость в принятии решений. Способствует управлению рисками, связанными с инвестициями в цифровые технологии. Является основой для оптимизации портфеля реальных опционов в условиях бюджетных ограничений, позволяя выявлять взаимозависимость цифровых проектов при оценке и принятии решения о расстановке приоритетов	Требует специализированных знаний в таких областях, как финансовое моделирование, теория вероятностей и анализ решений. Может иметь ограниченную применимость в силу необходимости учета крайне сложных и взаимозависимых факторов (политических, правовых, экологических и др.)
Примечание – Разработка автора.			

Это подчеркивает важность изменения традиционных методов формирования бюджета капитальных вложений в контексте управления капиталом, основанного на оценке риска.

2. Предложенная концептуальная модель управления экономическими рисками цифрового преобразования организации, обусловленная взаимным влиянием стратегических, проектных и финансовых процессов, может быть использована в практике цифровой трансформации организаций Республики Беларусь.

Список литературы

1. Лопатова, Н. Г. Риски цифрового преобразования компании / Н. Г. Лопатова // Экономическая наука сегодня: сб. науч. ст. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2021. Вып. 13. С. 112–118. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2021-13-112-118>.
2. Муха, Д. В. Механизмы инновационного развития экономики Республики Беларусь / Д. В. Муха. Минск: Беларус. навука, 2022.
3. Digital Innovation Management: Reinventing Innovation Management Research in a Digital World / S. Nambisan [et al.] // MIS Quarterly. 2017. Vol. 41, No 1. P. 223–238. <https://doi.org/10.25300/misq/2017/41:1.03>.
4. Куренков, А. Л. Управление проектами цифровой трансформации: современные тенденции и особенности / А. Л. Куренков // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2024. № 5. С. 5–18. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2024-5-5-18>.
5. Пашенко, Д. С. Риск-менеджмент – ключевой элемент в цифровой трансформации промышленного предприятия / Д. С. Пашенко, Н. М. Комаров // Мир новой экономики. 2021. Т. 15, № 1. С. 14–27. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2021-15-1-14-27>.
6. Головина, Т. А. Управление рисками организаций в условиях цифровой экономики / Т. А. Головина, И. Л. Авдеева, Д. А. Суханов // Вестник Академии знаний. 2022. № 1. С. 55–61.
7. Криштаносов, В. Б. Методология оценки и управления цифровыми рисками / В. Б. Криштаносов // Труды БГТУ. Серия 5. Экономика и управление. 2021. № 2. С. 15–36.
8. Heinrichs, M. Mobiles Internet: Auswirkung auf Geschäftsmodelle und Wertkette der Automobilindustrie, am Beispiel MINI Connected / M. Heinrichs, R. Hoffmann, F. Reuter // Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: Betriebswirtschaftliche und Technische Aspekte. 2012. P. 611–628. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-7117-3_48.
9. Pshichenko, D. Developing Methods for Assessing the Impact of Digital Innovations on the Economic Efficiency of Enterprises: Methodology for Measuring ROI of Digital Projects / D. Pshichenko // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10, № 10. С. 244–251. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/107/29>.
10. Schneider, R. Valuing Investments in the Digital Transformation of Business Models / R. Schneider, J. Imai // International Journal of Real Options and Strategy. 2019. Vol. 7. P. 1–26. <https://doi.org/10.12949/ijros.7.1>.
11. Economic Indicators for Life Cycle Sustainability Assessment: Going Beyond Life Cycle Costing / V. Arulnathan [et al.] // Sustainability. 2022. Vol. 15, No 1. <https://doi.org/10.3390/su15010013>.
12. Shoushtari, F. Application of Artificial Intelligence in Project Management / F. Shoushtari, A. Daghighi, E. Ghafourian // International Journal of Industrial Engineering and Operational Research. 2024. Vol. 6, No 2. P. 49–63.
13. Bernstein, J. I. Irreversible Investment, Capital Costs and Productivity Growth: Implications for Telecommunications / J. I. Bernstein, T. P. Mamuneas // Review of Network Economics. 2007. Vol. 6, No 3. P. 299–320. <https://doi.org/10.2202/1446-9022.1122>.

Поступила 21.04.2025

Принята в печать 16.05.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

References

1. Lopatova N. G. (2021) Risks of Digital Transformation of a Company. *Economic Science Today*. (13). Minsk, Belarusian National Technical University. 112–118. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2021-13-112-118> (in Russian).
2. Mukha D. V. (ed.) (2022) *Mechanisms of Innovative Development of the Economy of the Republic of Belarus*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. (in Russian).
3. Nambisan S., Lyytinen K., Majchrzak A., Song M. (2017) Digital Innovation Management: Reinventing Innovation Management Research in a Digital World. *MIS Quarterly*. 41 (1), 223–238. <https://doi.org/10.25300/misq/2017/41:1.03>.
4. Kurenkov A. L. (2024) Digital Transformation Project Management: Current Trends and Features. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. (5), 5–18. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2024-5-5-18> (in Russian).

5. Pashchenko D. S., Komarov N. M. (2021) Risk Management is a Key Element in the Digital Transformation of an Industrial Enterprise. *The World of the New Economy*. 15 (1), 14–27. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2021-15-1-14-27> (in Russian).
6. Golovina T. A., Avdeeva I. L., Sukhanov D. A. (2022) Risk Management of Organizations in the Digital Economy. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. (1), 55–61 (in Russian).
7. Krishtanosov V. B. (2021) Methodology of Assessment and Management of Digital Risks. *Proceedings of BSTU. Series 5. Economics and Management*. (2), 15–36 (in Russian).
8. Heinrichs M., Hoffmann R., Reuter F. (2012) Mobiles Internet: Auswirkung auf Geschäftsmodelle und Wertkette der Automobilindustrie, am Beispiel MINI Connected. *Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: Betriebswirtschaftliche und Technische Aspekte*. 611–628. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-7117-3_48.
9. Pshichenko D. (2024) Developing Methods for Assessing the Impact of Digital Innovations on the Economic Efficiency of Enterprises: Methodology for Measuring ROI of Digital Projects. *Bulletin of Science and Practice*. 10 (10), 244–251. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/107/29>.
10. Schneider R., Imai J. (2019) Valuing Investments in the Digital Transformation of Business Models. *International Journal of Real Options and Strategy*. (7), 1–26. <https://doi.org/10.12949/ijros.7.1>.
11. Arulnathan V., Heidari M. D., Doyon M., Li E. P. H., Pelletier N. (2023) Economic Indicators for Life Cycle Sustainability Assessment: Going Beyond Life Cycle Costing. *Sustainability*. 15 (1). <https://doi.org/10.3390/su15010013>.
12. Shoushtari F., Daghighi A., Ghafourian E. (2024) Application of Artificial Intelligence in Project Management. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*. 6 (2), 49–63.
13. Bernstein J. I., Mamuneas Th. P. (2007) Irreversible Investment, Capital Costs and Productivity Growth: Implications for Telecommunications. *Review of Network Economics*. 6 (3), 299–320. <https://doi.org/10.2202/1446-9022.1122>.

Received: 21 April 2025

Accepted: 16 May 2025

Available on the website: 10 October 2025

Сведения об авторе

Лопатова Н. Г., зав. сектором цифровой трансформации экономики, Институт экономики Национальной академии наук Беларуси

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
Минск, ул. Сурганова, 1, корп. 2
Институт экономики
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 17 270-24-43
E-mail: lopatova@economics.basnet.by
Лопатова Наталья Геннадьевна

Information about the author

Lopatova N. G., Head of the Sector of Digital Transformation of the Economy, The Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Surganova St., 1, build. 2
The Institute of Economics
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 17 270-24-43
E-mail: lopatova@economics.basnet.by
Lopatova Natalia Gennadievna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-14-21>

УДК 339.37:004(1-87)

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ

Л. С. КЛИМЧЕНЯ

Белорусский государственный экономический университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Розничная торговля выступает важным сектором национальной экономики страны, поскольку обеспечивает выполнение как социальных, так и экономических функций. Цифровая трансформация розничной торговли преобразует торговое обслуживание населения, предлагая новые торговые объекты и формы торговли. Важным аспектом исследования результатов цифровой трансформации розничной торговли разных стран становится разработка показателей, обеспечивающих объективность данных результатов. Для достижения этой цели в исследовании обобщены мировые тенденции развития розничной торговли в условиях цифровизации экономики, проведено сравнительное исследование развития розничной торговли Китая, США и Великобритании, предложены новые показатели для оценки результатов цифровой трансформации отрасли. В ходе исследования использованы данные международных консалтинговых компаний, национальной статистики исследуемых стран, позволившие рассчитать ряд относительных показателей, характеризующих цифровую трансформацию розничной торговли. Эффективным инструментом обеспечения объективных результатов исследования розничной торговли являются относительные показатели, учитывающие важный для развития торговли фактор – численность населения страны.

Ключевые слова: розничная торговля, торговое обслуживание, цифровая трансформация, электронная торговля, оборот электронной торговли, интернет-магазин, обеспеченность торговыми объектами.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Климченя, Л. С. Зарубежный опыт цифровой трансформации розничной торговли / Л. С. Климченя // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 14–21. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-14-21>.

FOREIGN EXPERIENCE OF RETAIL DIGITAL TRANSFORMATION

LIUDMILA S. KLIMCHENIA

Belarus State Economic University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Retail trade is an important sector of the national economy, as it ensures the fulfillment of both social and economic functions. The retail digital transformation is transforming the retail service of the population, offering new retail facilities and forms of trade. An important aspect of the research of the results of the retail trade digital transformation in different countries is the development of indicators that ensure the objectivity of these results. To achieve this goal, the research summarizes global trends in the development of retail trade in the context of the economy digitalization, conducted a comparative study of the development of retail trade in China, the United States and the United Kingdom, and proposed new indicators to assess the results of the sector digital transformation. The research used data from international consulting companies and national statistics from the countries studied, which allowed us to calculate a number of relative indicators characterizing the retail trade digital transformation. An effective tool for ensuring objective results of retail trade research is relative indicators that take into account an important factor for the development of trade – the size of the country's population.

Keywords: retail trade, trade services, digital transformation, e-trade, e-trade turnover, online store, provision of retail facilities.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Klimchenia L. S. (2025) Foreign Experience of Retail Digital Transformation. *Digital Transformation*. 31 (3), 14–21. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-14-21> (in Russian).

Введение

Макроэкономическое развитие стран связано с реализацией цифровых повесток государств, в которых определены направления применения цифровых и информационных технологий в разных отраслях экономики в целях повышения качества жизни населения. Розничная торговля как отрасль экономики является вторичным сектором внедрения цифровых технологий, уступая первенство промышленности. Цифровая трансформация розничной торговли (ЦТРТ) представляет собой количественно-качественные преобразования деятельности субъектов торговли, которые позволяют адаптироваться последним к изменяющимся условиям потребительского рынка. Актуальность исследования ЦТРТ обусловлена вниманием к данному вопросу со стороны многих исследователей [1–5]. Исходя из того, что цифровая трансформация национальной экономики направлена на повышение качества жизни населения, следует отметить, что ЦТРТ направлена на повышение качества торгового обслуживания. Цифровая трансформация обеспечивает сохранение социальной функции розничной торговли как посредника, способствующего удовлетворению спроса населения на товары с минимальными затратами времени на их покупку, реализацию экономической функции посредством повышения производительности труда персонала и рентабельности продаж. Началом ЦТРТ принято считать появление электронных витрин и интернет-магазинов (1992 г.), когда в отрасли стала доминировать концепция розничной торговли 3.0. Дальнейший процесс связан с внедрением платформенных решений в торговле и переходом к концепции розничной торговли 4.0 [4, с. 127].

Цифровая трансформация розничной торговли обеспечивает наличие двух секторов торгового обслуживания: цифрового и реального. При этом удельный вес каждого сектора в розничном товарообороте страны формируется с учетом национальных особенностей поведения потребителей на потребительском рынке и под воздействием трендов цифровой трансформации, складывающихся в национальной экономике. Для определения приоритетов развития национальной розничной торговли важно исследовать тенденции развития розничной торговли на зарубежных потребительских рынках, сравнить достигнутые результаты отраслевого развития и обосновать ближайшие изменения в торговом обслуживании.

Мировые тренды розничной торговли

Базовым результирующим показателем розничной торговли является розничный товарооборот. В его росте отражается удовлетворение спроса населения на товары, а в структуре – расходы населения. Учитывая, что цифровая трансформация активно начала проявляться в розничной торговле в рамках ее концепции 4.0, исследования проводились за период 2011–2024 гг.

К первой тенденции развития розничной торговли отнесем постоянное увеличение розничного товарооборота (с учетом влияния инфляционных процессов). С 2011 по 2024 г. мировой розничный товарооборот увеличился в 1,6 раза, достигнув 31,3 трлн долл.^{1,2}. Ежегодно в исследуемом периоде обеспечивался рост розничного товарооборота в среднем на 104,1 %. Исключением стал 2020 г., на который пришлось начало пандемии COVID-19 (розничный товарооборот составил 94,8 % к обороту предыдущего года). Прогнозируется дальнейший рост розничного товарооборота до 42,8 трлн долл. в 2028 г.².

Вторая тенденция развития розничной торговли – замедление темпов роста розничного товарооборота (до 2023 г.). В 2011-м темп прироста розничного товарооборота составлял 7,4 %, к 2015 г. снизился до 5,6 %, а в 2022-м – до 5,0 %. По данным международной маркетинговой компании Business Research Insights, годовой темп прироста розничного товарооборота до 2032 г. будет составлять около 7,65 %³.

Следующая тенденция развития розничной торговли – увеличение удельного веса электронной торговли в розничном товарообороте. Электронная торговля на протяжении трех десятилетий привлекает к себе внимание как ученых, что находит отражение в научных публикациях [6–9],

¹ *Global Retail Market Size from 2011 to 2021*. Available: <https://www.statista.com/statistics/914324/global-retail-market-size/> (Accessed 27 February 2025).

² *Retail Global Market Report 2024*. Available: <https://www.researchandmarkets.com/report/retail> (Accessed 27 February 2025).

³ *Retail E-Commerce Sales Worldwide from 2014 to 2027*. Available: <https://www.researchgate.net/figure/Retail-e-commerce-sales-worldwide-from-2014-to-2027> (Accessed 27 February 2025).

так и потребителей, что обеспечивает рост ее оборота и увеличение удельного веса в розничном товарообороте. Согласно данным информационного ресурса STATISTA, доля электронной торговли в совокупном мировом розничном товарообороте в 2019 г. достигла 13,4 %, в 2024-м – 20,22 %. Прогнозируется, что к 2027-му ее доля составит четверть мировых розничных продаж³.

Рост розничного товарооборота сопровождается более быстрым ростом оборота электронной торговли. В исследуемом периоде мировой розничный товарооборот за 14 лет увеличился на 12,5 трлн долл., или на 166,5 %, а электронная торговля увеличилась на 5,4 трлн долл., или в семь раз. Доля электронной торговли в мировом розничном товарообороте увеличилась с 4,7 % в 2011 г. до 20,2 % в 2024-м, что отражено на рис. 1^{3,4}. До 2016-го среднегодовой темп роста доли электронной торговли в мировом розничном товарообороте составлял 115,7 %, в период 2017–2020 гг. – 123,4 %. Выделенные тенденции развития мировой розничной торговли на рынках конкретных стран имеют разную степень проявления.



Рис. 1. Динамика структуры мирового товарооборота по форме торговли

Fig. 1. Dynamics of the structure of global trade turnover by form of trade

Цифровая трансформация розничной торговли отдельных стран

Мировой рейтинг по обороту электронной торговли возглавляет Китай. В тройку стран-лидеров по данному показателю с учетом географической локации страны (азиатский, американский и европейский рынки) входят также США и Великобритания (рис. 2^{5,6}).

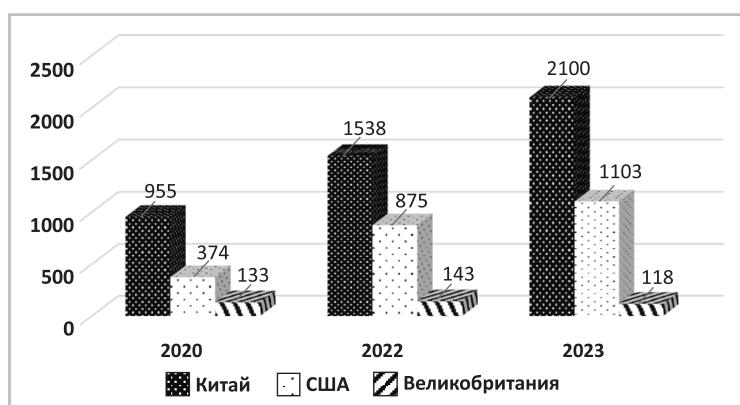


Рис. 2. Мировой рейтинг по обороту электронной торговли среди стран-лидеров, трлн долл.

Fig. 2. World ranking by e-commerce turnover among leading countries, trillion dollars

⁴ *E-Commerce as Share of Total Retail Sales Worldwide 2015–2027*. Available: <https://www.statista.com/statistics/534123/e-commerce-share-of-retail-sales-worldwide> (Accessed 9 November 2024).

⁵ *Top Ecommerce Market*. Available: <https://www.oberlo.com/statistics/ecommerce-sales-by-country> (Accessed 11 March 2025).

⁶ *Top 10 Countries with the Largest E-Commerce Industry*. Available: <https://www.ecommerce-nation.com/top-10-countries-with-the-largest-e-commerce-industry/> (Accessed 11 March 2025).

Оборот электронной торговли товарами в Китае с 2020 по 2023 г. увеличился в 2,2 раза, в США – в 2,9 раза, в Великобритании отмечены незначительный рост в 2022-м (107,5 %) и снижение в 2023-м. За счет каких факторов обеспечены представленные результаты? За 2011–2020 гг. объем электронной торговли на китайском национальном рынке увеличился в 5,8 раза (с 6,43 до 37,21 трлн юаней) [10, с. 56]. Авторами данного исследования отмечено замедление темпов роста электронной торговли к предыдущему году с 53,7 % в 2011 г. до 10,9 % в 2020-м. Доля электронной торговли в розничном товарообороте Китая увеличилась с 10,6 % в 2014 г. до 27,6 % в 2023-м, т. е. в 2,5 раза за десять лет. В 2024 г. отмечено уменьшение удельного веса электронной торговли товарами в общем розничном товарообороте до 26,8 %⁷. В 2024 г. покупки в цифровых торговых объектах (интернет-магазинах, на цифровых торговых платформах) делали 974 млн чел. (69 % населения Китая). Уровень проникновения электронной торговли среди китайских пользователей интернета достиг 87,9 % (в 2023 г. составлял 83,8 %). В среднем в 2023-м каждый покупатель в Китае потратил на покупку товаров в интернете 2156 долл. За покупателя на китайском потребительском рынке в настоящее время конкурируют 398,3 тыс. магазинов и около 2 млн сайтов электронной торговли⁸. Сектор цифрового торгового обслуживания в пять раз превосходит сектор обслуживания в торговых объектах. Приведенные данные позволяют сделать вывод, что китайский рынок электронной торговли развивается за счет увеличения количества цифровых торговых объектов, расширения аудитории покупателей в интернете и увеличения потребительских расходов на онлайн-покупки.

По объему электронной торговли вторым в мире является рынок США. По данным Министерства торговли США, доля электронной торговли в розничном товарообороте страны достигла 22,7 % в 2024 г.⁹. С 2011-го по 2024-й оборот электронной торговли США увеличился с 220,4 до 1192,6 млрд долл., т. е. в 5,4 раза. Удельный вес электронной торговли в исследуемом периоде увеличился с 7,2 до 22,7 %, или в 3,2 раза. Максимальный показатель прироста (42 %) был достигнут в 2020 г., минимальный (6,5 %) – в 2022-м⁹. Росту электронной торговли способствует уровень проникновения интернета: в 2023 г. – 91,8 %, в 2024-м – 97,3 %. Уровень проникновения электронной торговли в 2024 г. в стране составил 82,6 % от числа интернет-пользователей США (в 2023-м – 80,7 %). В среднем в США каждый покупатель потратил на покупку товаров в интернете в 2024 г. 4360 долл., в 2023-м – 4260 долл. Прогнозируется, что к 2027-му объем электронной торговли достигнет 1,4 трлн долл.¹⁰. Торговое обслуживание населения США в 2023 г. осуществляли 1,07 млн реальных магазинов и 2,8 млн интернет-магазинов¹¹. Сеть интернет-магазинов по количеству в 2,5 раза превосходит сеть реальных магазинов.

Лидером по росту электронной торговли в Европе является Великобритания. С 2011 г. в стране отмечался постоянный прирост оборота электронной торговли. Исключением стал 2022-й, когда продажи в интернете уменьшились на 9,8 % – до 106,01 млрд фунтов стерлингов (131,8 млрд долл.). Среднегодовой темп прироста оборота электронной торговли за 2011–2023 гг. составил 17,1 % (без учета снижения в 2022 г.). Доля электронной торговли в розничном товарообороте Великобритании увеличилась с 8,3 % в 2011 г. до 27,2 % в 2024-м¹². Максимальный удельный вес электронной торговли в розничном товарообороте 30,7 % был достигнут в 2021 г., минимальный 8,3 % – в 2011-м. По данным отчета European E-Commerce 2024, уровень проникновения интернета среди населения Великобритании в 2022 г. достиг 98 % и остается пока без изменений. Уровень проникновения электронной торговли в 2024-м составил 91 %, увеличившись за пять

⁷ *E-Commerce Share of Total Retail Sales in Consumer Goods in China from 2014 to 2024*. Available: <https://www.statista.com/statistics/1129915/china-ecommerce-share-of-retail-sales/> (Accessed 6 March 2025).

⁸ *How Many Ecommerce Sites Are There in the World? Statistics & Facts* (2025). Available: <https://seo.ai/blog/how-many-ecommerce-sites-are-there-in-the-world> (Accessed 12 March 2025).

⁹ Haleem A. (2025) *US Ecommerce Sales in 2024 More Than Double Those of 2019*. Available: <https://www.digitalcommerce360.com/article/us-ecommerce-sales/> (Accessed 7 March 2025).

¹⁰ *Revenue of the E-Commerce Industry in the US 2017–2027*. Available: <https://www.statista.com/statistics/257532/us-food-and-beverage-e-commerce-revenue/> (Accessed 11 March 2025).

¹¹ *Number of Retail Establishments in the United States from 2015 to 2023*. Available: <https://www.statista.com/statistics/1079239/brick-and-mortar-retail-store-count-us/> (Available 10 November 2024).

¹² *Online Sales as a Percentage of Total Retail Sales UK*. Available: <https://www.ons.gov.uk/businessindustryandtrade/retailindustry/timeseries/j4mc/drsi> (Accessed 12 March 2025).

лет на 4 % (с 87 % в 2019 г.)¹³. В среднем в Великобритании каждый покупатель потратил на покупку товаров в интернете в 2023 г. 1910 фунтов стерлингов (2377 долл.).

Торговое обслуживание населения Великобритании на начало 2024 г. осуществляли 580 тыс. интернет-магазинов и 325 тыс. розничных торговых объектов¹⁴. Следовательно, сеть интернет-магазинов по количеству превосходит сеть торговых объектов в 1,8 раза. Развитие сети интернет-магазинов определило сокращение количества реальных магазинов. По данным Центра исследований розничной торговли Великобритании, с 2007 г. происходит банкротство компаний, приводящее к закрытию магазинов и увольнению персонала. С 2007 по 2024 г. сеть торговых объектов сократилась на 49 915 единиц¹⁴, в 2020-м – на 5214 объектов, а в 2024-м – на 7537 объектов. На указанные два года пришлось 25,5 % всех закрытых торговых объектов в Великобритании. Основные причины их закрытия – увеличение доли электронной торговли в розничном товарообороте, изменение предпочтений покупателей в торговом обслуживании в сторону его скорости, гибкости и инновационности, которые обеспечиваются цифровыми торговыми объектами.

Проведенное исследование ЦТРТ Китая, США и Великобритании позволяет сделать вывод, что результатом цифровой трансформации стал новый сектор торгового обслуживания – цифровой, обеспечивающий розничную продажу товаров посредством интернет-магазинов и цифровых торговых платформ. Предпочтения потребителей смещаются в сторону цифрового сектора торгового обслуживания, что обеспечивает увеличение расходов на покупку в интернете, рост оборота электронной торговли, увеличение ее удельного веса в розничном товарообороте страны. Рост электронной торговли оказывает влияние на розничную сеть торговых объектов, выражающееся в их сокращении. Как результат – количество цифровых торговых объектов продолжает увеличиваться и превосходит сеть реальных торговых объектов: в Китае – в 5 раз, в США – в 2,5 раза, в Великобритании – в 1,8 раза. Прогнозируется дальнейший рост как оборота электронной торговли, так и ее доли в розничном товарообороте, которые будут сопровождаться сокращением сети торговых объектов.

Результаты исследований и их обсуждение

Цифровая трансформация обусловила появление как нового сегмента торгового обслуживания, так и новых торговых объектов – цифровых, которые нашли положительный отклик среди покупателей в разных странах. По абсолютным значениям представленных в исследовании показателей развития электронной торговли Китай превосходит другие страны – по обороту электронной торговли и ее удельному весу в розничном товарообороте страны. Однако одним из факторов, способствующих достижению данных результатов, является численность населения, по которой Китай превосходит США в 4,25 раза, а Великобританию – в 21,27 раза. Для объективности сравнения результатов цифровизации розничной торговли в этих трех странах целесообразно использовать представленные в табл. 1 относительные показатели, рассчитанные с учетом численности населения (в представленном исследовании использованы данные за 2023 г.).

Таблица 1. Показатели цифровой трансформации розничной торговли Китая, США, Великобритании
Table 1. The digital transformation indicators of retail trade in China, the USA, the United Kingdom

Показатель	Китай	США	Великобритания
Уровень проникновения интернета, %	77,0	91,8	98,0
Розничный товарооборот на одного жителя, долл.	3998	21612	9851
Доля электронной торговли в розничном товарообороте страны, %	27,6	22,7	26,7
Оборот электронной торговли на одного жителя, долл.	1473	3295	2925
Количество сайтов электронной торговли на 1 млн чел., ед.	1403	7561	8657
Количество реальных магазинов на 1 млн чел., ед.	280	3194	4850
Удельный вес онлайн-покупателей в численности населения, %	64	77	86
Средние расходы покупателя на покупку в интернете, долл.	2156	4260	2377

¹³ *European E-Commerce Report 2024*. Available: https://ecommerce-europe.eu/wp-content/uploads/2024/10/CEI2024_Complete_light_v1.pdf (Accessed 12 March 2025).

¹⁴ *Retail Sector in the UK*. Available: <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/SN06186/SN06186.pdf> (Accessed 12 March 2025).

Предложенные в ходе исследования относительные показатели оценки ЦТРТ, рассчитанные с учетом численности жителей страны (розничный товарооборот, оборот электронной торговли, количество сайтов электронной торговли, количество реальных магазинов, расходы покупателей на покупку в интернете), повышают объективность исследования за счет сопоставимости данных. Согласно представленным в табл. 1 показателям, США является страной-лидером по розничному товарообороту и обороту электронной торговли на одного жителя, превосходя по этим характеристикам Китай соответственно в 5,4 и 2,2 раза и Великобританию – в 2,2 и 1,1 раза. По данным двум показателям Китай занял последнее место среди исследуемых стран.

Важным аспектом развития розничной торговли является возможность покупателя выбрать торговый объект для покупки товаров (обеспеченность торговыми объектами). Полученные результаты показывают, что на 1 млн жителей Великобритании приходится 4850 реальных и 8657 цифровых торговых объектов. По данному показателю Великобритания превосходит Китай соответственно в 16 и 6,2 раза, США – в 1,5 и 1,1 раза. Это позволяет сделать вывод, что Великобритания имеет наиболее развитую розничную торговую инфраструктуру (как сеть реальных, так и сеть цифровых торговых объектов). Самые низкие показатели обеспеченности населения торговыми объектами – у Китая.

На приведенные выше показатели существенное влияние оказало развитие в странах интернета и электронной торговли. Здесь лидирует Великобритания – уровень проникновения интернета 98 %, удельный вес онлайн-покупателей в численности населения – 86 %. Для США данные показатели имеют следующие значения соответственно – 91,8 и 77 %, для Китая – 77 и 64 %.

С учетом предложенных в статье относительных показателей оценки результатов ЦТРТ лидером по обороту на одного жителя страны как розничной торговли в целом, так и электронной торговли является США, что подтверждают и данные расходов на покупку товаров в интернете. Наиболее обеспечены розничной торговой инфраструктурой (реальной и цифровой) жители Великобритании. Китай, как страна-лидер по абсолютным показателям оборота электронной торговли, уступает США и Великобритании по достигнутым относительным результатам ЦТРТ. Таким образом, исследование ЦТРТ в разрезе стран должно включать анализ как абсолютных, так и относительных показателей, что существенно повышает достоверность оценки достигнутых страной результатов цифровых преобразований розничной торговли. Наиболее же часто в мировой практике используются абсолютные показатели по стране или показатели прироста к предыдущему году, что снижает объективность и достоверность сравнительного исследования.

Заключение

1. Розничная торговля подвержена влиянию научных и технических достижений, что обусловило применение информационных и цифровых технологий субъектами торговли в торговом обслуживании населения. Исследование мировых тенденций развития розничной торговли позволило выявить: постоянное увеличение розничного товарооборота (в среднем на 104,1 %), замедление темпов прироста розничного товарооборота (с 7,4 % в 2011 г. до 5,7 % в 2023-м), рост оборота электронной торговли (с 0,89 трлн долл. в 2011 г. до 6,33 трлн долл. в 2024-м), увеличение удельного веса электронной торговли в мировом розничном товарообороте (с 4,7 % в 2011 г. до 20,2 % в 2024-м). Представленные тенденции позволяют определить в качестве тренда развития розничной торговли появление и активное развитие цифрового сектора торгового обслуживания, подтвердившего свою востребованность на потребительском рынке и конкурентоспособность, а также обладающего потенциалом дальнейшего развития.

2. Практический и научный интерес представляют результаты цифровой трансформации розничной торговли стран-лидеров. Для исследования были выбраны страны-лидеры по развитию электронной торговли на трех потребительских рынках: азиатском, американском и европейском – Китай, США и Великобритания. Согласно мировой практике, наиболее часто используемыми данными, отражающими развитие электронной торговли, являются абсолютные показатели по обороту торговли, а также удельный вес электронной торговли в розничном обороте. Признанным лидером и первым рынком электронной торговли считается Китай. По объему электронной торговли вторым в мире является рынок США.

3. Исследование развития отрасли экономики в разных странах должно учитывать условия, в которых достигнуты те или иные показатели. Для розничной торговли, обеспечивающей удов-

летворение спроса населения на товары, важным фактором для развития и оценки результатов этого развития является численность населения [11]. Применение относительных показателей, отражающих результаты цифровой трансформации с учетом численности населения, повышает объективность полученных данных. Предложенные в исследовании показатели розничного товарооборота и оборота электронной торговли на одного жителя, обеспеченности населения реальными магазинами и цифровыми торговыми объектами позволили сделать вывод, что розничная торговля Китая уступает розничной торговле как США, так и Великобритании.

4. Применение предложенных показателей оценки цифровой трансформации розничной торговли в научной и практической деятельности позволит обеспечить объективность результатов сравнительных исследований преобразований как розничной торговли в целом, так и электронной торговли как ее формы и будет способствовать адаптации отечественной торговой практики к мировым тенденциям развития.

Список литературы

1. Климченя, Л. С. Трансформация торговли: сущность, виды / Л. С. Климченя // Научные труды Республиканского института высшей школы. Философско-гуманитарные науки. 2024. № 23-2. С. 213–220.
2. Сидоров, А. А. Развитие сферы услуг в условиях цифровой трансформации национальной экономики / А. А. Сидоров // Теоретическая и прикладная экономика. 2021. № 1. С. 39–47. <https://doi.org/10.25136/2409-8647.2021.1.35316>.
3. Катасонов, И. А. Цифровая трансформация розничной торговли: эффективность автоматизации и роботизации бизнес-процессов / И. А. Катасонов // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2022. № 2. С. 160–170. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-2-160-170>.
4. Климченя, Л. С. Развитие концепций трансформации розничной торговли под влиянием промышленных революций / Л. С. Климченя // Вестник университета. 2024. № 6. С. 121–129.
5. Стрелец, И. А. Изменения в поведении экономических субъектов в условиях цифровой трансформации / И. А. Стрелец // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13, № 1. С. 149–158. <https://doi.org/10.18334/vinec.13.1.117013>.
6. Салихова, Р. Р. Особенности внедрения элементов электронной торговли традиционными розничными торговыми сетями / Р. Р. Салихова // Экономика, предпринимательство, право. 2019. Т. 9, № 4. С. 685–692. <https://doi.org/10.18334/epp.9.4.41376>.
7. Кондратьева, Е. М. Электронная торговля как концепция построения экономических отношений / Е. М. Кондратьева // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2023. № 2. С. 132–137.
8. Климченя, Л. Перспективы электронной торговли на потребительском рынке / Л. Климченя // Финансы. Учет. Аудит. 2023. № 8. С. 27–30.
9. Пламадяла, А. П. Электронная торговля как форма международного бизнеса: российская и зарубежная практика / А. П. Пламадяла // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 6-2. С. 141–144. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-6-2-141-144>.
10. Кузьмин, Е. А. Исследования тенденций развития электронной розничной торговли в Китае / Е. А. Кузьмин, Е. И. Денисевич // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 3. С. 54–57. <https://doi.org/10.18411/trnio-09-2022-107>.
11. Климченя, Л. С. Факторы трансформации розничной торговли / Л. С. Климченя // Бизнес. Инновации. Экономика: сб. науч. ст. Минск: Ин-т бизнеса Белор. гос. ун-та, 2024. Вып. 9. С. 49–57.

Поступила 23.04.2025

Принята в печать 26.06.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

References

1. Klimchenia L. S. (2024) Transformation of Trade: Essence, Types. *Scientific Works of the Republican Institute of Higher Education. Philosophical and Humanitarian Sciences*. 23-2, 213–220 (in Russian).
2. Sidorov A. A. (2021) The Development of the Service Sector in the Context of the Digital Transformation of the National Economy. *Theoretical and Applied Economics*. 1, 39–47. <https://doi.org/10.25136/2409-8647.2021.1.35316> (in Russian).
3. Katasonov I. A. (2022) Digital Transformation of Retail Trade: Efficiency of Automation and Robotization of Business Processes. *Strategic Solutions and Risk Management*. (2), 160–170. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-2-160-170> (in Russian).

4. Klimchenya L. S. (2024) The Development of Concepts of Retail Transformation Under the Influence of Industrial Revolutions. *Bulletin of the University*. 6, 121–129 (in Russian).
5. Strelets I. A. (2023) Changes in the Behavior of Economic Entities in the Context of Digital Transformation. *Issues of Innovative Economics*. 13 (1), 149–158. <https://doi.org/10.18334/vinec.13.1.117013> (in Russian).
6. Salikhova R. R. (2019) Features of the Introduction of E-Commerce Elements by Traditional Retail Chains. *Economics, Entrepreneurship, Law*. 9 (4), 685–692. <https://doi.org/10.18334/epp.9.4.41376> (in Russian).
7. Kondratieva E. M. (2023) Electronic Commerce as a Concept for Building Economic Relations. *Bulletin of the Nizhny Novgorod Lobachevsky University*. 2, 132–137 (in Russian).
8. Klimchenia L. (2023) Prospects of Electronic Commerce in the Consumer Market. *Finance. Accounting. Audit*. (8), 27–30 (in Russian).
9. Plamadyala A. P. (2021) Electronic Commerce as a Form of International Business: Russian and Foreign Practice. *Economics and Business: Theory and Practice*. (6-2), 141–144. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-6-2-141-144> (in Russian).
10. Kuzmin E. A., Denisevich E. I. (2022) Studies of Trends in the Development of Electronic Retail in China. *Trends in the Development of Science and Education*. (3), 54–57. <https://doi.org/10.18411/trnio-09-2022-107> (in Russian).
11. Klimchenia L. (2024) Retail Trade Transformation Factors. *Business. Innovations. Economics, Collection of Scientific Articles*. Minsk, Institute of Business of the Belarusian State University. 9, 49–57 (in Russian).

Received: 23 April 2025

Accepted: 26 June 2025

Available on the website: 10 October 2025

Сведения об авторе

Климченя Л. С., канд. экон. наук, доц., докторант каф. коммерческой деятельности и рынка недвижимости, Белорусский государственный экономический университет

Адрес для корреспонденции

220070, Республика Беларусь,
Минск, просп. Партизанский, 26
Белорусский государственный
экономический университет
Тел.: +375 29 653-84-31
E-mail: klimchenia@bseu.by
Климченя Людмила Сергеевна

Information about the author

Klimchenia L. S., Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Doctoral Student at the Department of Commercial Activity and Real Estate Market, Belarus State Economic University

Address for correspondence

220070, Republic of Belarus,
Minsk, Partizanski Ave., 26
Belarus State
Economic University
Tel.: +375 29 653-84-31
E-mail: klimchenia@bseu.by
Klimchenia Liudmila Sergeevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-22-32>

УДК 004; 004.932

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ «УМНЫЙ ДОМ»

М. М. ЛУКАШЕВИЧ

*Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Машинное обучение повышает эффективность использования систем «умный дом», позволяет конструкциям домашней автоматизации регулировать отопительную и охлаждающую системы, освещение, температуру помещения и другие параметры. Вариабельность данных и совершенствование таких систем требуют постоянного расширения наборов данных, переобучения или дообучения моделей машинного обучения, модификации алгоритмов и архитектур. В статье представлены модели прогнозирования тепловой и охлаждающей нагрузок дома на основе методов машинного обучения. Приведены результаты исследовательского анализа данных, построения моделей регрессии для прогнозирования загрузки отопительной и охлаждающей систем. Показана эффективность подбора значений гиперпараметров на основе метода поиска по решетке. Рассмотрена нейросетевая модель, позволяющая одновременно прогнозировать загрузку отопительной и охлаждающей систем. Выполнены оценка точности и сравнение моделей на основе метрик качества регрессии.

Ключевые слова: машинное обучение, регрессия, исследовательский анализ данных, алгоритм машинного обучения, модель машинного обучения, метрики оценки качества.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лукашевич, М. М. Разработка модели машинного обучения для системы «умный дом» / М. М. Лукашевич // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 22–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-22-32>.

DEVELOPING A MACHINE LEARNING MODEL FOR A SMART HOME SYSTEM

MARINA M. LUKASHEVICH

*Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. Machine learning improves the efficiency of smart home systems, allows home automation systems to regulate heating and cooling systems, lighting, room temperature and other parameters. Data variability and improvement of such systems require constant expansion of data sets, retraining or additional training of machine learning models, modification of algorithms and architectures. The article presents models for predicting heating and cooling loads of a house based on machine learning methods. The results of exploratory data analysis, construction of regression models for predicting the load of heating and cooling systems are presented. The efficiency of selecting hyperparameter values based on the grid search method is shown. A neural network model is considered that allows simultaneous prediction of the load of heating and cooling systems. The accuracy is assessed and the models are compared based on regression quality metrics.

Keywords: machine learning, regression, exploratory data analysis, machine learning algorithm, machine learning model, quality assessment metrics.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Lukashevich M. M. (2025) Developing a Machine Learning Model for a Smart Home System. *Digital Transformation*. 31 (3), 22–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-22-32> (in Russian).

Введение

Интеграция машинного обучения в системы автоматизации «умный дом» является перспективным направлением и дает пользователям ряд преимуществ – корректировать настройки в соответствии с окружающей средой, поведением и требованиями пользователя. Машинное обучение улучшает эффективность систем «умный дом», позволяет системам домашней автоматизации регулировать отопительную и охлаждающую системы, освещение, температуру помещения и другие параметры. В настоящее время непрерывно совершенствуются как сами системы «умный дом», так и всевозможные датчики, что требует разработки новых эффективных моделей машинного обучения для решения широкого круга задач автоматизации домашних систем.

Наряду с преимуществами машинного обучения, есть несколько существенных ограничений, а именно: необходимость большого объема данных и значительная вычислительная мощность. Кроме того, в системе «умный дом» присутствуют постоянные изменения в окружающей среде, а, соответственно, и в данных для обучения моделей машинного обучения. Это требует постоянного расширения наборов данных, переобучения или дообучения моделей, совершенствования алгоритмов и архитектур [1, 2].

Процесс разработки моделей машинного обучения

Процесс построения моделей машинного обучения включает в себя следующие этапы. Первый – это постановка задачи в терминах машинного обучения, определение метрик для оценки качества моделей. Второй этап включает получение или сбор данных. Часто при решении научных задач целесообразно воспользоваться релевантными публичными наборами данных. Третий этап – исследовательский анализ данных (Exploratory Data Analysis, EDA). Иногда используется термин «разведочный анализ данных». На этой стадии исследуется мощность набора данных, изучаются признаки, описывающие объект, устанавливаются их отличия и взаимосвязи, выполняется визуализация данных. На основе результатов исследовательского анализа данных определяется четвертый этап – обработка данных, которая может включать очистку данных (устранение дубликатов, заполнение пропусков и др.), масштабирование признаков, кодирование категориальных переменных, конструирование и отбор признаков, понижение размерности, подготовку обучающего, тестового и валидационного наборов. Пятый этап является непосредственно этапом построения моделей машинного обучения и оценки результатов. Заключительный, или шестой этап, – развертывание моделей машинного обучения в производственной среде. Описанный процесс итерационный, на каждом этапе при получении неудовлетворительных результатов может возникнуть необходимость вернуться к предыдущим этапам, усовершенствовать их, включить дополнительные данные, операции, алгоритмы и др. (рис. 1) [3, 4].

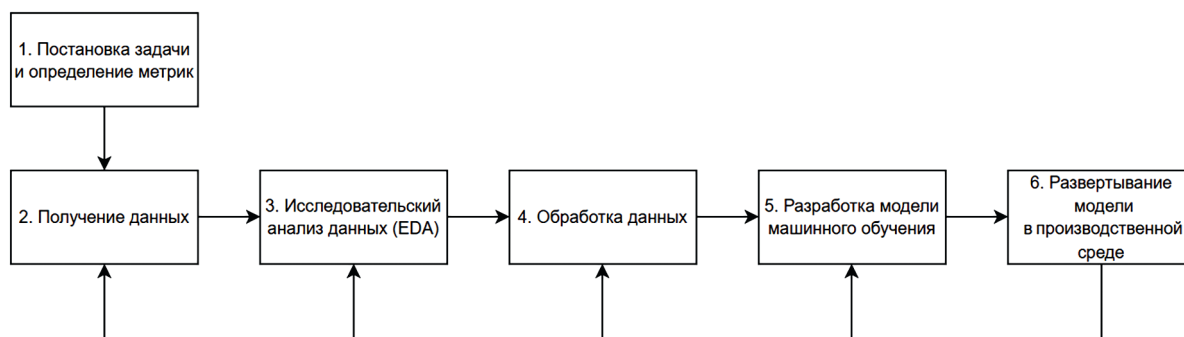


Рис. 1. Процесс разработки модели машинного обучения

Fig. 1. The process of developing a machine learning model

Целью исследований являлось построение моделей прогнозирования тепловой и охлаждающей нагрузок дома на основе методов машинного обучения. При эффективном проектировании

здания расчет тепловой и охлаждающей нагрузок нужен для определения технических характеристик отопительного и охлаждающего оборудования, необходимого для поддержания комфортных условий воздуха в помещении. В терминах машинного обучения это является задачей регрессии.

Исследовательский анализ данных

Цель исследовательского анализа данных – понимание структуры и характеристик набора данных, выявление аномалий и выбросов, идентификация связей и корреляций между переменными, подготовка данных для дальнейших этапов анализа. Для оценки мощности охлаждения и обогрева помещения необходима информация о характеристиках здания и кондиционируемого пространства (например, заполняемость и уровень активности).

Для проведения экспериментов был выбран публичный набор данных, в котором представлена информация о 768 объектах (12 типов различных зданий), описанных десятью признаками. Исследовательский анализ данных выполнялся средствами библиотеки pandas. Процедура проведения регрессионного анализа заключается в определении математической модели в форме уравнения (функция регрессии) $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$, устанавливающей функциональную связь между зависимой переменной y и группой независимых переменных $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ с учетом ошибки модели ε . Применение регрессионного анализа оправдано при наличии выборки данных, из которой можно выделить зависимую и ряд независимых переменных. Полученная подобным образом модель позволяет оценивать и прогнозировать изменение зависимой переменной от группы независимых в различных состояниях [5, 6].

Исходя из формулировки задачи регрессии, восемь переменных (относительная компактность (Relative Compactness), площадь поверхности (Surface Area), площадь стен (Wall Area), площадь крыши (Roof Area), общая высота (Overall Height), ориентация (Orientation), площадь остекления (Glazing Area), распределение площади остекления (Glazing Area Distribution)) являются независимыми (факторы, оказывающие влияние на зависимую переменную). Загрузка отопительной (Heating Load) и охлаждающей (Cooling Load) систем – значения зависимых переменных (отклик) для каждого отдельного наблюдения. Признаки «загрузка отопительной системы» и «загрузка охлаждающей системы» являются целевыми при построении моделей регрессии для предсказания загрузки отопительной и охлаждающей систем соответственно. Признаки и их основные статистические характеристики для пяти первых объектов набора данных представлены на рис. 2.

	Относительная компактность	Площадь поверхности	Площадь стен	Площадь крыши	Общая высота	Ориентация	Площадь остекления	Распределение площади остекления	Загрузка отопительной системы	Загрузка охлаждающей системы
0	0,98	514,50	294,00	110,25	7,00	2.0	0,00	0.0	15,55	21,33
1	0,98	514,50	294,00	110,25	7,00	3.0	0,00	0.0	15,55	21,33
2	0,98	514,50	294,00	110,25	7,00	4.0	0,00	0.0	15,55	21,33
3	0,98	514,50	294,00	110,25	7,00	5.0	0,00	0.0	15,55	21,33
4	0,90	563,50	318,50	122,50	7,00	2.0	0,00	0.0	20,84	28,28

Рис. 2. Первые пять объектов из исследуемого набора данных
Fig. 2. The first five objects in the dataset

Сводные статистики, позволяющие получить обобщенное представление о распределении данных и об основных характеристиках, а также отражающие типичные и наиболее значимые значения в наборе данных, представлены на рис. 3, а. На рис. 3, б приведена информация о числе объектов в наборе данных, типах признаков, описывающих объект, а также об отсутствии пропущенных и нулевых значений.

Корреляционный анализ выявляет взаимосвязи их признаков между собой. Коэффициент корреляции отражает степень линейной зависимости между двумя признаками. На рис. 4 представлена тепловая карта, которая отображает корреляцию между признаками.

В процессе экспериментов использована визуализация данных для определения трендов и взаимосвязей в них. На рис. 5 изображены диаграммы рассеяния, отображающие взаимодейст-

вие между признаками. На рис. 6 представлены диаграммы размаха – «ящики с усами», визуализирующие статистические характеристики распределения данных (медиана, квартили и выбросы) и отображающие разброс и симметрию данных, а также возможные аномалии. Зависимости загрузки холодильной и отопительной систем от плотности показаны на рис. 7.

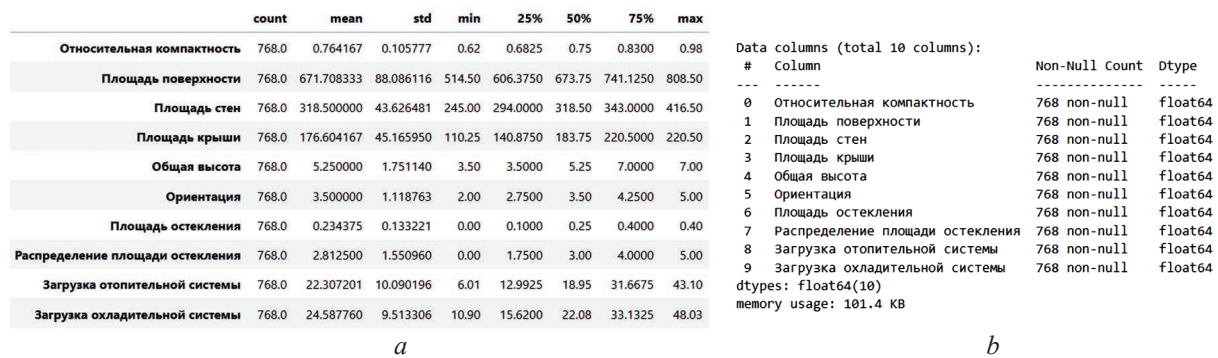


Рис. 3. Основная информация по набору данных:

a – сводные статистики набора данных; *b* – информация о признаках, описывающих объект

Fig. 3. Basic information about the dataset:

a – summary statistics of the dataset; *b* – information about features describing the object

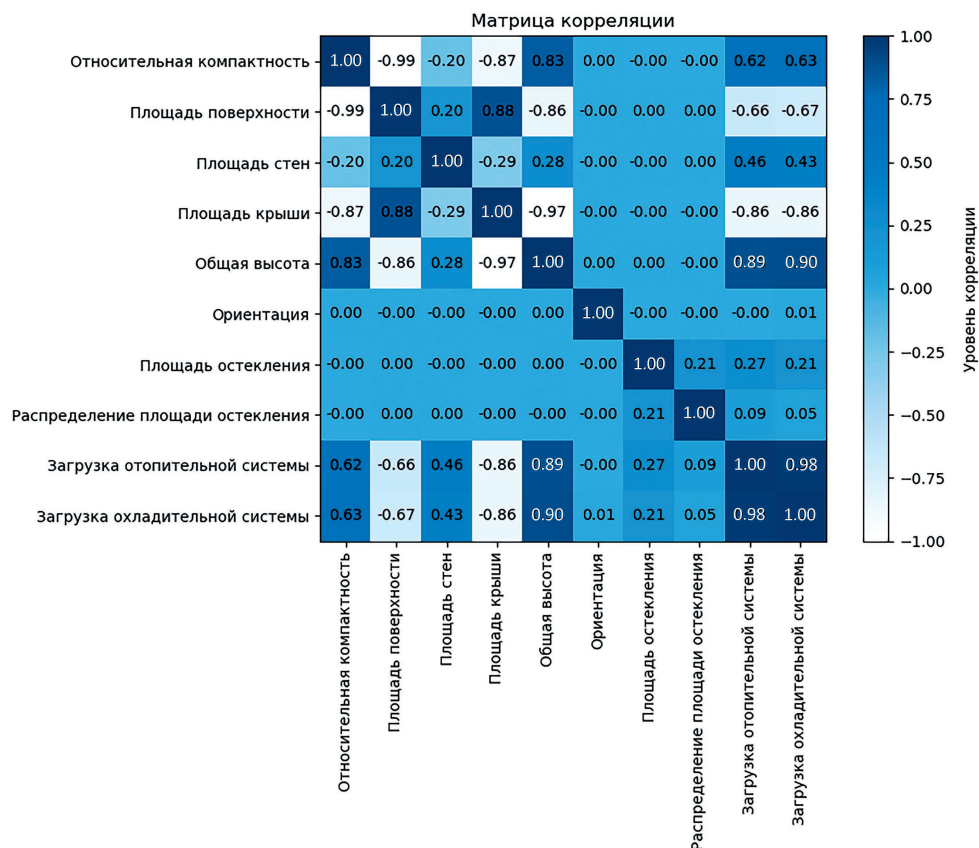


Рис. 4. Тепловая карта, отображающая корреляцию между признаками

Fig. 4. Heat map showing the correlation between features

В процессе исследовательского анализа данных установлено, что их набор содержит только числовые признаки, категориальных признаков нет. Определено, что пропущенных данных, данных с не определенным значением и категориальных переменных нет. Сводные статистики позволяют получить обобщенное представление о распределении данных и об основных характеристиках, дают понимание о наиболее типичных и значимых значениях в наборе. Выбросов и аномалий здесь нет. Данные перед этапом построения модели машинного обучения необходимо масштабировать. Иных этапов их обработки не требуется.

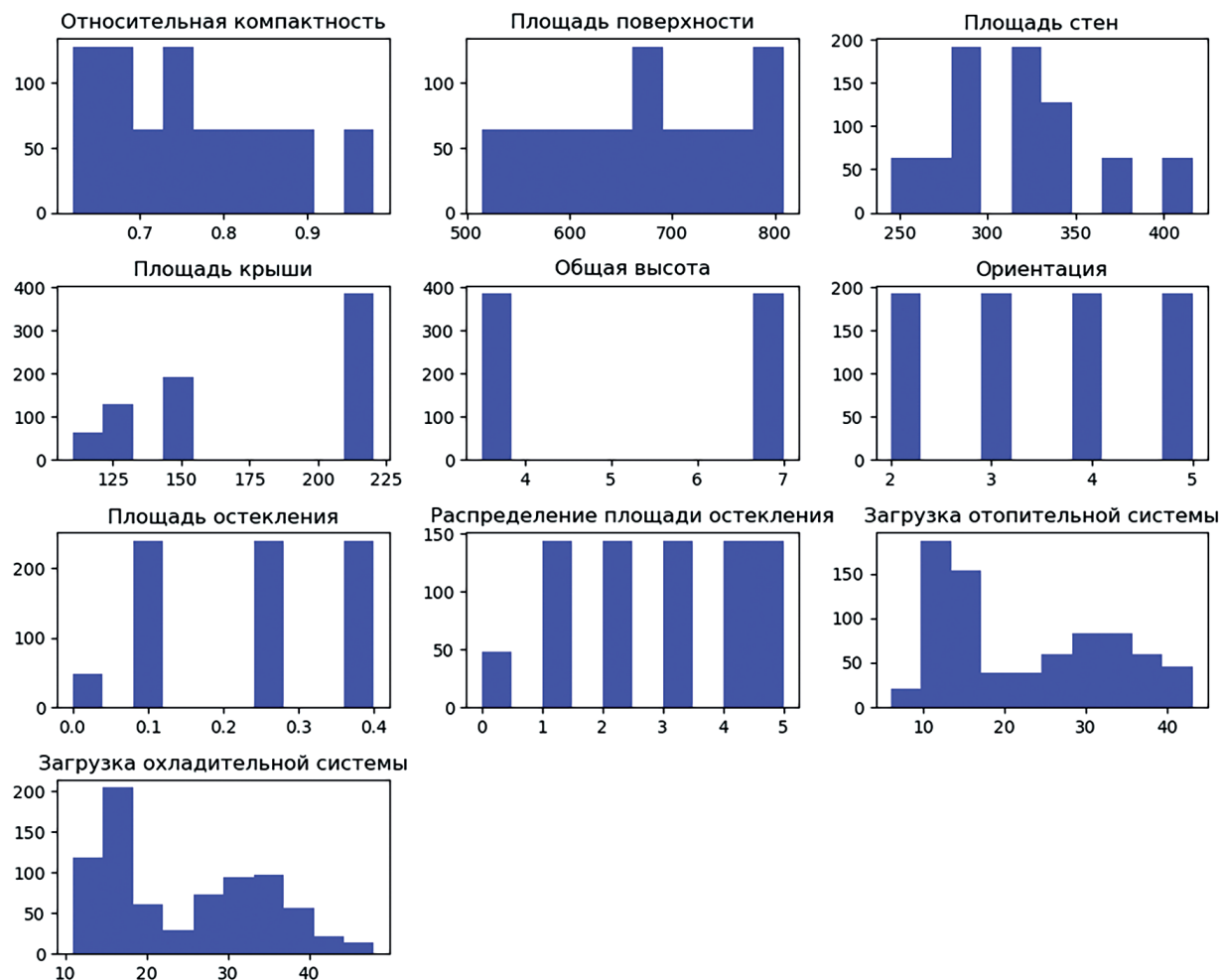


Рис. 5. Диаграммы рассеяния, отображающие взаимодействие между признаками
Fig. 5. Scatter plots showing the interaction between features

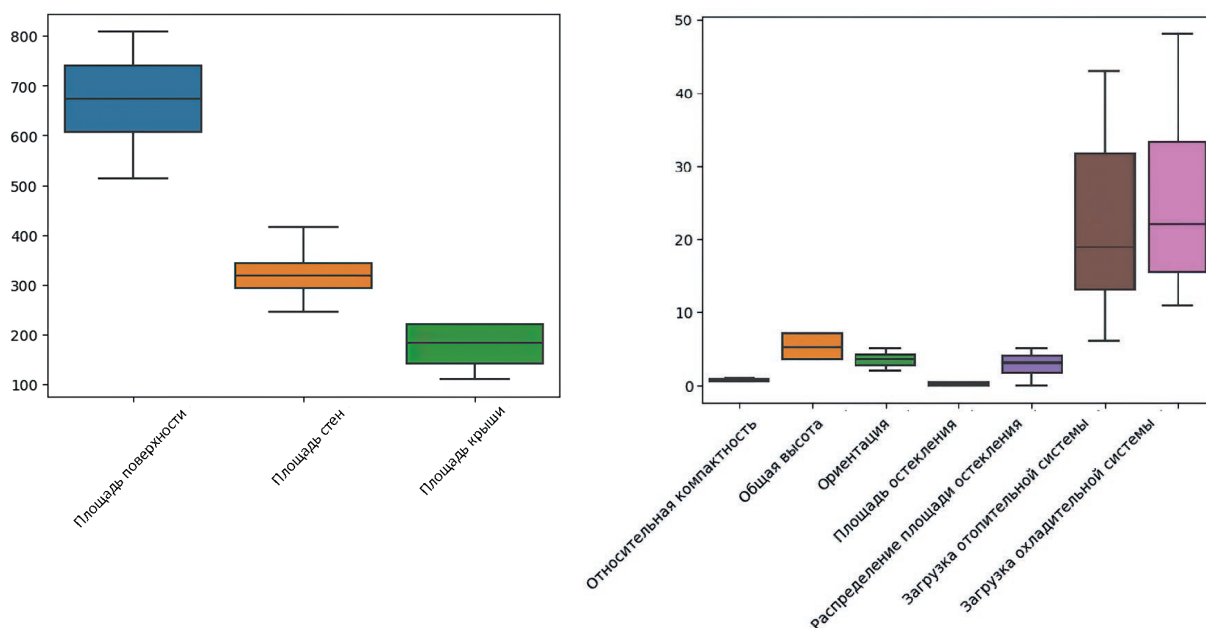


Рис. 6. «Ящики с усами», визуализирующие статистические характеристики данных и возможные аномалии
Fig. 6. “Boxes with whiskers” visualizing statistical characteristics of the data and possible anomalies

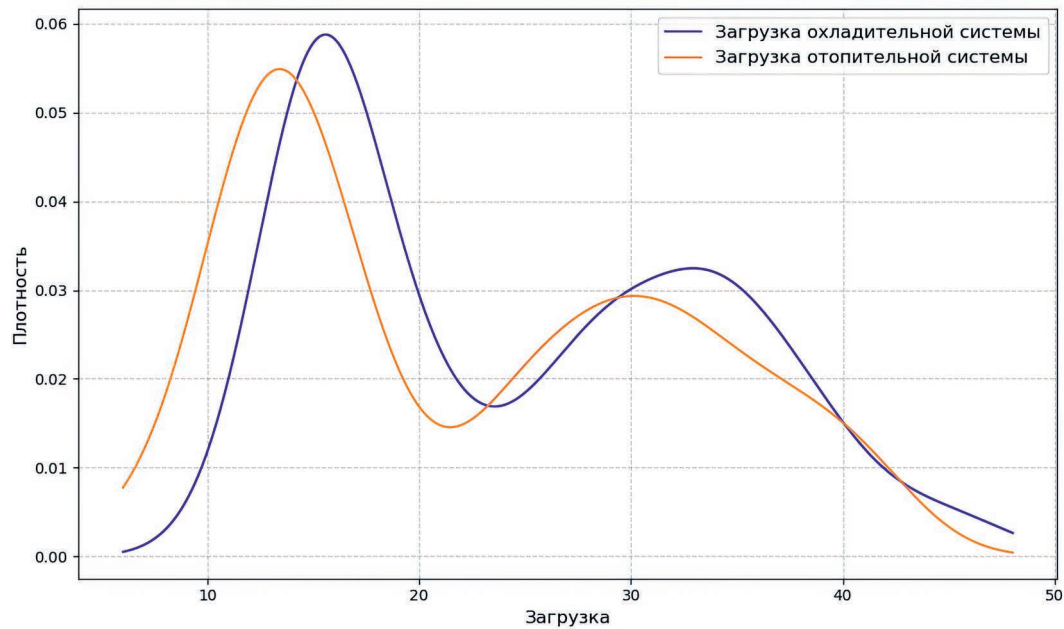


Рис. 7. Зависимость загрузки охладительной и отопительной систем от плотности

Fig. 7. Dependence of the loading of cooling and heating systems on density

Разработка моделей машинного обучения

Для построения моделей регрессии выбраны алгоритмы машинного обучения, приведенные в табл. 1 [7–11].

Таблица 1. Алгоритмы для построения моделей регрессии

Table 1. Algorithms for regression model development

Алгоритм	Краткое название алгоритма
Линейная регрессия	LinearRegressor
Дерево решений	DecisionTreeRegressor
k ближайших соседей	KNeighborsRegressor
Машины опорных векторов	SVR
Градиентный бустинг	GradientBoostingRegressor
Случайный лес	RandomForestRegressor

Для подготовки тестового и обучающего наборов, реализации выбранных алгоритмов, оценки их качества использовалась библиотека `scikit-learn`. Значения гиперпараметров алгоритмов не настраивались и использовались по умолчанию из библиотеки `scikit-learn`. Исходный набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки (70 и 30 % соответственно). Выбран подход нормализации, при котором данные масштабируются до диапазона от 0 до 1 путем преобразования с использованием минимального и максимального значений признака. Переменные Heating Load и Cooling Load являются зависимыми и фактически будут выходами модели регрессии. Указанные в табл. 1 алгоритмы позволяют построить модель с одной зависимой переменной. Поэтому каждый алгоритм будет использован для построения двух моделей, предсказывающих значения переменных Heating Load и Cooling Load.

Сравнение построенных моделей по метрикам качества помогает объективно выбрать лучшую модель среди предложенных. Сравнивая производительность представленных моделей, можно определить ту, которая обеспечивает лучший результат для описанной проблемы. Метриками качества регрессионных моделей были следующие коэффициенты: средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE), среднеквадратическая ошибка (Mean, Squared Error, MSE), коэффициент детерминации R -квадрат (R^2).

MAE измеряет среднюю абсолютную разницу между прогнозируемыми значениями и фактическими. Она отражает меру того, насколько в среднем предсказания модели близки к истин-

ным значениям. MSE подчеркивает меру того, насколько хорошо прогнозы модели согласуются с истинными значениями. Более низкие значения указывают на лучшую производительность. R -квадрат показывает долю дисперсии зависимой переменной, объясненной при помощи регрессионной модели. Если $R^2 = 0$, то регрессионная модель не объясняет никаких изменений зависимой переменной, если $R^2 = 1$, то объясняет. Коэффициент R^2 представляет собой долю общей изменчивости зависимой переменной, учитываемую регрессионной моделью, а также показывает, насколько хорошо модель фиксирует закономерности и взаимосвязи в данных. Эта метрика лучше позволяет получить относительные оценки точности регрессии, а другие две метрики дают абсолютные оценки, что не всегда наглядно.

Результаты тестирования регрессионных моделей на тестовом наборе данных

Результаты оценки точности построенных регрессионных моделей на основе алгоритмов, представленных в табл. 1, приведены в табл. 2 и 3. Оценки получены для независимых тестовых данных, а модели обучены на обучающем наборе. Лучшие результаты показывают модели на основе случайного леса для прогнозирования загрузки отопительной системы ($R^2 = 0,9978$) и на основе градиентного бустинга для прогнозирования загрузки охлаждающей системы ($R^2 = 0,9747$).

Таблица 2. Точность регрессионных моделей для прогнозирования загрузки отопительной системы
Table 2. Accuracy of regression models for predicting heating system load

Модель	MAE	MSE	R^2
LinearRegressor	2,1374	9,2336	0,9116
DecisionTreeRegressor	0,3726	0,3023	0,9971
KNeighborsRegressor	2,0421	9,7218	0,9070
SVR	2,0540	9,3331	0,9107
GradientBoostingRegressor	0,3593	0,2422	0,9976
RandomForestRegressor	0,3390	0,2294	0,9978

Таблица 3. Точность регрессионных моделей для прогнозирования загрузки охлаждающей системы
Table 3. Accuracy of regression models for predicting cooling system load

Модель	MAE	MSE	R^2
LinearRegressor	2,2699	10,0687	0,8886
DecisionTreeRegressor	1,1166	4,7207	0,9477
KNeighborsRegressor	2,2793	10,0495	0,8888
SVR	2,2754	10,5151	0,8837
GradientBoostingRegressor	1,0408	2,2869	0,9747
RandomForestRegressor	1,0863	3,3645	0,9627

Подбор гиперпараметров регрессионных моделей, оценка точности на тестовом наборе данных

Для улучшения качества работы моделей выполнен подбор отдельных гиперпараметров методом поиска по решетке. В табл. 4 представлены перечень гиперпараметров, значения гиперпараметров по умолчанию при первичном построении моделей и диапазон поиска. Для модели линейной регрессии подбор гиперпараметров не выполнялся в силу крайней простоты модели и низкой точности на тестовом наборе со значениями гиперпараметров по умолчанию. Лучшие значения гиперпараметров, а также комбинация значений определялись на основе оценки точности регрессии с использованием метрики R^2 . Подбор гиперпараметров регрессионных моделей для оценки точности прогнозирования загрузки отопительной и охлаждающей систем проводился независимо (табл. 5, 6). Результаты тестирования регрессионных моделей с выбранными значениями гиперпараметров приведены в табл. 7, 8.

Таблица 4. Данные по гиперпараметрам и диапазон поиска
Table 4. Hyperparameter data and search range

Модель	Гиперпараметр	Значение гиперпараметра по умолчанию	Диапазон поиска
DecisionTreeRegressor	"criterion"	"squared_error"	["squared_error", "absolute_error"]
	"min_samples_split"	default=2	[14, 15, 16, 17]
	"max_depth"	default=None	[5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 85, 90, 95]
	"min_samples_leaf"	default=1	[4, 5, 6]
	"max_leaf_nodes"	default=None	[29, 30, 31, 32]
KNeighborsRegressor	"n_neighbors"	default=5	[3, 5, 7, 9, 11]
	"weights"	default="uniform"	["uniform", "distance"]
	"algorithm"	default="auto"	["auto", "ball_tree", "kd_tree", "brute"]
SVR	"kernel"	default="rbf"	["linear", "poly", "rbf", "sigmoid"]
GradientBoostingRegressor	"n_estimators"	default=100	[5, 10, 15, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400]
	"max_features"	default=None	[1, 2]
	"max_depth"	default=3	[5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 85, 90, 95]
RandomForestRegressor	"n_estimators"	default=100	[5, 10, 15, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400]
	"max_features"	default=1.0	[1, 2]
	"max_depth"	default=None	[5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 85, 90, 95]

Таблица 5. Результаты подбора гиперпараметров
для регрессионной модели прогнозирования загрузки отопительной системы
Table 5. Results of hyperparameter selection for the regression model for prediction of heating system loading

Модель	Лучшее значение R^2	Значение гиперпараметра
DecisionTreeRegressor	0,9900	{"criterion": "squared_error", "min_samples_split": 15 "max_depth": 60 "min_samples_leaf": 5 "max_leaf_nodes": 32}
KNeighborsRegressor	0,9206	{"algorithm": "ball_tree", "n_neighbors": 7, "weights": "uniform"}
SVR	0,9399	{"kernel": "poly"}
GradientBoostingRegressor	0,9974	{"max_depth": 5, "max_features": 2, "n_estimators": 400 }
RandomForestRegressor	0,9929	{"max_depth": 70, "max_features": 2, "n_estimators": 200}

Таблица 6. Результаты подбора гиперпараметров
для регрессионной модели прогнозирования загрузки охлаждающей системы
Table 6. Results of hyperparameter selection of the regression model for prediction of cooling system loading

Модель	Лучшее значение R^2	Значение гиперпараметра
DecisionTreeRegressor	0,9900	{"criterion": "squared_error", "min_samples_split": 17 "max_depth": 10 "min_samples_leaf": 5 "max_leaf_nodes": 32}

Окончание табл. 6
Ending of Tab. 6

Модель	Лучшее значение R^2	Значение гиперпараметра
KNeighborsRegressor	0,9206	{"algorithm": "ball_tree", "n_neighbors": 7, "weights": "uniform"}
SVR	0,9399	{"kernel": "poly"}
GradientBoostingRegressor	0,9974	{"max_depth": 5, "max_features": 2, "n_estimators": 350 }
RandomForestRegressor	0,9929	{"max_depth": 65, "max_features": 1, "n_estimators": 100}

Таблица 7. Точность регрессионных моделей для оценки прогнозирования загрузки отопительной системы с подобранными значениями гиперпараметров
Table 7. Accuracy of regression models for assessing the forecasting of the heating system load with selected hyperparameter values

Модель	MAE	MSE	R^2
DecisionTreeRegressor	0,4640	0,4424	0,9957
KNeighborsRegressor	1,9528	8,4298	0,9182
SVR	1,6404	7,0775	0,9313
GradientBoostingRegressor	0,2829	0,1514	0,9985
RandomForestRegressor	0,4839	0,3951	0,9961

Таблица 8. Точность регрессионных моделей для оценки прогнозирования загрузки охлаждающей системы с подобранными значениями гиперпараметров
Table 8. Accuracy of regression models for assessing the forecasting of cooling system load with selected hyperparameter values

Модель	MAE	MSE	R^2
DecisionTreeRegressor	0,3726	0,3023	0,9971
KNeighborsRegressor	2,0421	9,7218	0,9070
SVR	2,0540	9,3331	0,9107
GradientBoostingRegressor	0,3593	0,2422	0,9976
RandomForestRegressor	0,3390	0,2294	0,9978

Лучшие результаты показывает модель на основе градиентного бустинга для прогнозирования загрузки отопительной системы ($R^2 = 0,9985$). Также видно увеличение точности модели в сравнении с моделями, разработанными с дефолтными значениями гиперпараметров. Лучшие результаты для прогнозирования загрузки охлаждающей системы показывает модель на основе случайного леса ($R^2 = 0,9978$). Точность моделей с дефолтными значениями гиперпараметров была ниже. Для модели на основе градиентного бустинга оценка точности составляла $R^2 = 0,9747$.

Нейросетевая модель регрессии

Представленные выше модели показывают высокую точности и могут быть использованы для решения практических задач прогнозирования загрузки отопительной и охлаждающей систем «умного дома». Однако с точки зрения развертывания моделей в производственной среде идентичный вектор данных поступает на две модели, которые независимо друг от друга прогнозируют загрузку отопительной и охлаждающей систем. Это требует использования двух моделей, что не всегда целесообразно с точки зрения вычислительных и временных затрат. Целесообразной же проставляется разработка одной модели, прогнозирующей загрузку отопительной и охлаждающей систем. Для устранения этого недостатка была разработана нейросетевая модель, включающая в себя один входной слой и два выходных значения. Эти значения будут соответствовать прогнозным значениям загрузки отопительной и охлаждающей систем. В целом

нейросетевая модель состоит из полносвязных слоев и разработана с использованием фреймворка Keras. Структура модели представлена на рис. 8.

Model: "model"

Layer (type)	Output Shape	Param #	Connected to
input_1 (InputLayer)	[(None, 8)]	0	[]
dense (Dense)	(None, 128)	1152	['input_1[0][0]']
dense_1 (Dense)	(None, 128)	16512	['dense[0][0]']
dense_2 (Dense)	(None, 64)	8256	['dense_1[0][0]']
y1_output (Dense)	(None, 1)	129	['dense_1[0][0]']
y2_output (Dense)	(None, 1)	65	['dense_2[0][0]']

=====

Total params: 26114 (102.01 KB)
Trainable params: 26114 (102.01 KB)
Non-trainable params: 0 (0.00 Byte)

Рис. 8. Структура нейросетевой модели
Fig. 8. Neural network model structure

При обучении модели использовался оптимизатор на основе статистического градиентного спуска (SGD). MSE использовалась как функция потерь, а в качестве метрики оценки точности модели – метрика R^2 . Обучение проходило в течение 500 эпох, размер батча – 10 образцов. Обучение проводилось на тех же образцах, что и в предыдущих разделах, точность модели оценивалась на идентичном тестовом наборе. Точность прогнозирования загрузки отопительной системы $R^2 = 0,9981$, а охлаждающей – $R^2 = 0,9910$, что незначительно отличается от эффективности моделей, представленных в предыдущих разделах.

Заключение

1. Приведено решение прикладной задачи на основе машинного обучения. Представлены результаты исследовательского анализа данных, построение моделей регрессии для прогнозирования загрузки отопительной и охлаждающей систем для системы «умный дом». Показана эффективность подбора значений гиперпараметров на основе метода поиска по решетке, что позволило улучшить точность моделей регрессии.

2. Точность моделей регрессии вычислялась на независимом тестовом наборе данных с применением стандартных метрик оценки качества регрессии. Лучшие результаты показали модели на основе градиентного бустинга ($R^2 = 0,9985$) для прогнозирования загрузки отопительной системы и на основе случайного леса ($R^2 = 0,9978$) для прогнозирования загрузки охлаждающей системы.

3. Дано описание нейросетевой регрессионной модели, позволяющей спрогнозировать загрузку отопительной и охлаждающей систем ($R^2 = 0,9981$ и $R^2 = 0,9910$ соответственно). Нейросетевая модель позволяет одновременно спрогнозировать загрузку отопительной и охлаждающей систем. Такой подход учитывает связи между процессами отопления и охлаждения, а также сокращает количество моделей до одной, что уменьшит затраты на обучение и поддержание модели, а также инфраструктуру в целом. Одну модель проще интегрировать в производственную среду, обновлять и тестировать.

Список литературы

1. Грингард, С. Интернет вещей: будущее уже здесь / С. Грингард; 2-е изд. М.: Альпина Паблишер, 2019.
2. Попов, Е. В. Умные города / Е. В. Попов, К. А. Семячков. М.: Изд-тво Юрайт, 2020.
3. Жерон, О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn, Keras и TensorFlow / О. Жерон; 2-е изд. М.: Диалектика, 2020.
4. Маккинни, У. Python и анализ данных / У. Маккинни; пер. с англ. А. А. Слинкина; 2-е изд., испр. и доп. М.: ДМК Пресс, 2020.
5. Курлов, А. Б. Методология информационной аналитики / А. Б. Курлов, В. К. Петров. М.: Проспект, 2014.

6. Prediction a Building's Energy Efficiency [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.kaggle.com/code/jarredpriester/predicting-a-building-s-energy-efficiency>. Date of access: 01.11.2023.
7. Polikar, R. Ensemble Based Systems in Decision Making / R. Polikar // IEEE Circuits and Systems Magazine. 2006. Vol. 6, No 3. P. 21–45. DOI: 10.1109/mcas.2006.1688199.
8. Rokach, L. Ensemble Methods for Classifiers / L. Rokach // Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. 2025. P. 957–980. DOI: 10.1007/0-387-25465-x_45.
9. Kuncheva, L. I. Measures of Diversity in Classifier Ensembles and Their Relationship with the Ensemble Accuracymachine Learning / L. I. Kuncheva, C. J. Whitaker // Machine Learning. 2003. Vol. 51, No 2. P. 181–207. DOI: 10.1023/a:1022859003006.
10. Chin-Wei, Hsu. A Practical Guide to Support Vector Classification / Chin-Wei Hsu, Chih-Chung Chang, Chih-Jen Lin // Technical Report, National Taiwan University. 2010.
11. Chicco, D. Ten Quick Tips for Machine Learning in Computational Biology / D. Chicco // BioData Mining. 2017. Vol. 35, No 10. 35. DOI: 10.1186/s13040-017-0155-3.

Поступила 16.05.2025

Принята в печать 15.07.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

References

1. Greengard S. (2019) *Internet of Things: The Future is Already Here*. Moscow, Alpina Publisher (in Russian).
2. Popov E. V., Semyachkov K. A. (2020) *Smart Cities*. Moscow, Yurait Publishing House (in Russian).
3. Giron O. (2020) *Applied Machine Learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow*. Moscow, Dialectics Publ. (in Russian).
4. McKinney W. (2020) *Python and Data Analysis*. Moscow, DMK Press Publ. (in Russian).
5. Kurlov A. B., Petrov V. K. (2014) *Methodology of Information Analytics: A Monograph*. Moscow, Prospect Publ. (in Russian).
6. Prediction a Building's Energy Efficiency. Available: <https://www.kaggle.com/code/jarredpriester/predicting-a-building-s-energy-efficiency> (Accessed 1 November 2023).
7. Polikar R. (2006) Ensemble Based Systems in Decision Making. *IEEE Circuits and Systems Magazine*. 6 (3), 21–45. DOI: 10.1109/mcas.2006.1688199.
8. Rokach L. (2025) Ensemble Methods for Classifiers. *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. 957–980. DOI: 10.1007/0-387-25465-x_45.
9. Kuncheva L. I., Whitaker C. J. (2003) Measures of Diversity in Classifier Ensembles and Their Relationship with the Ensemble Accuracymachine Learning. *Machine Learning*. 51 (2), 181–207. DOI: 10.1023/a:1022859003006.
10. Chin-Wei Hsu, Chih-Chung Chang, Chih-Jen Lin (2010) A Practical Guide to Support Vector Classification. *Technical Report, National Taiwan University*.
11. Chicco D. (2017) Ten Quick Tips for Machine Learning in Computational Biology. *BioData Mining*. 35 (10). DOI: 10.1186/s13040-017-0155-3.

Received: 16 May 2025

Accepted: 15 July 2025

Available on the website: 10 October 2025

Сведения об авторе

Лукашевич М. М., канд. техн. наук, доц. Белорусского государственного университета, докторант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. Платонова, 39
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-17
E-mail: lukashevich@bsuir.by
Лукашевич Марина Михайловна

Information about the author

Lukashevich M. M., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor at the Belarusian State University, Doctoral Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Platonova St., 39
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-17
E-mail: lukashevich@bsuir.by
Lukashevich Marina Mikhailovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-33-42>

УДК 338.32.053+65.011.46

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

А. В. ЦЕДРИК

Институт экономики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Энергетика Беларуси вносит значительный вклад в национальную безопасность, социально-экономическое развитие страны и повышение качества жизни граждан. Не обладая крупными запасами энергоносителей, государство оправданно определяет будущую эффективную стратегию, заключающуюся в мероприятиях по энергосбережению, в пропаганде и стимулировании таких мероприятий для домашних хозяйств и субъектов хозяйствования, во внедрении автоматизированных комплексов и административно-диспетчерского управления для сокращения издержек на производство топливно-энергетических ресурсов. В статье дано определение перспективных и экономически эффективных продуктов, решений и мероприятий, направленных на развитие отрасли энергетики в целом и электроэнергетики в частности. Обосновано применение технологии Smart Grid и производственных объектов для энергоэффективного потребления электроэнергии: центров обработки данных и систем накопления энергии.

Ключевые слова: цифровые продукты, цифровые решения, топливно-энергетический комплекс, электроэнергетика, интеграция, Smart Grid, центр обработки данных, системы накопления энергии, межотраслевой эффект.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Цедрик, А. В. Перспективные направления развития электроэнергетики в условиях цифровой трансформации в Республике Беларусь / А. В. Цедрик // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 33–42. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-33-42>.

PROMISING DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF ELECTRIC POWER INDUSTRY IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION IN THE REPUBLIC OF BELARUS

ALEKSANDR V. TSEDRIK

The Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The energy sector of Belarus makes a significant contribution to national security, socio-economic development of the country and improving the quality of life of citizens. Not having large reserves of energy resources, the state justifiably defines a future effective strategy consisting of energy saving measures, promotion and stimulation of such measures for households and business entities, implementation of automated complexes and administrative and dispatch control to reduce the costs of production of fuel and energy resources. The article defines promising and cost-effective products, solutions and measures aimed at developing the energy sector in general and the electric power industry in particular. The use of Smart Grid technology and production facilities for energy-efficient consumption of electricity: data processing centers and energy storage systems, is substantiated.

Keywords: digital products, digital solutions, fuel and energy complex, electric power industry, integration, Smart Grid, data processing center, energy storage systems, inter-industry effect.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

For citation. Tsedrik A. V. (2025) Promising Directions of Development of Electric Power Industry in the Context of Digital Transformation in the Republic of Belarus. *Digital Transformation*. 31 (3), 33–42. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-33-42> (in Russian).

Введение

Энергетика нашей республики вносит значительный вклад в национальную безопасность, социально-экономическое развитие страны и повышение качества жизни граждан. Беларусь импортозависима от углеводородного сырья. Объемы собственной добычи этого сырья для национальных нужд покрываются лишь на 10 %, доля его добычи по отношению к валовому потреблению первичных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) к концу 2024 г. составила 27,1 %.

В различных программных документах, посвященных развитию электроэнергетики как составной части национальной экономики, уделяется внимание ее формированию на основе нового технологического уклада. Речь идет о цифровизации и автоматизации электроэнергетики и топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

В статье рассмотрена перспективная технология Smart Grid, а также выполнен обзор двух промышленных решений – центра обработки данных (ЦОД) и систем накопления энергии (СНЭ). Такие решения способны оптимизировать уровень и эффективность потребления электроэнергии с учетом тенденций как в государстве, так и в мировой экономике в целом.

Результаты исследований и их обсуждение

Процесс цифровой трансформации электроэнергетики Республики Беларусь определен как инструмент повышения эффективности отрасли в условиях быстро меняющегося рынка с учетом изменения доли источников генерации энергии и высокой волатильности цен на энергоносители. Важным фактором ускорения «цифрового вектора» следует считать ужесточение экологического законодательства в большинстве государств мира.

В [1–5] дана наиболее полная оценка цифровой трансформации объединенной энергетической системы Республики Беларусь. В [6, с. 19] проведена первичная оценка в части интеграционных процессов в условиях цифровых преобразований, происходящих в рамках ЕАЭС. Так, в части применения международных стандартов, выработанных Международной электротехнической комиссией (МЭК), имеются схожие подходы, применяемые Беларусью и Россией, реже – Казахстаном (табл. 1).

Таблица 1. Стандарты, применяемые в электроэнергетике Беларуси, Казахстана, России
Table 1. Applicable standards in the electric power industry among Belarus, Kazakhstan, Russia

Информация	Стандарт	Беларусь	Казахстан	Россия
Применение международных стандартов	ISO/IEC 27000	–	–	–
	ISO/IEC 27001:2021	–	+	–
	NIST SP 800–53	–	–	–
	IEC 60870-5-101	+	+	+
	IEC 61850-7-1:2003	+	+	+
	IEC 61968-100 (2002)	+	–	–
	IEC/TS 61970-2:2004	+	–	+
Применение национальных стандартов	ГОСТ Р 59947–2021	–	–	+
	ГОСТ Р 58651.1-10–2023	–	–	+
	ГОСТ Р 57114–2022	–	–	+
	ГОСТ Р 59950–2021	–	–	+
	ТКП 609–2017	+	–	–
	ТКП 33240.20.1	+	–	–
	СТП 33240.01.1	+	–	–
	СТО 569470	–	–	+
Обозначения: «–» – данный стандарт или ГОСТ не применяется; «+» – данный стандарт или ГОСТ применяется (по данным на июль 2022 г.). Примечание – Составлено на основе [7, 8].				

В рамках Союзного государства Беларуси и России применение национальных стандартов принципиально отличается друг от друга. В качестве предложения для объединения подходов и более эффективных интеграционных процессов заинтересованным сторонам следует выработать общие межстрановые стандарты, используемые в электроэнергетике для двух государств. Данная задача особенно актуальна в связи со сближением энергетических рынков нефти, газа и электроэнергии двух стран, в том числе в рамках ЕАЭС. Такой подход поможет идентифицировать цифровые проекты с большей точностью, создать совершенную рыночную конкурентную среду и формировать передовой опыт для ЕАЭС в целом для данной отрасли.

Помимо развития электроэнергетики стран ЕАЭС, важным направлением деятельности по цифровой трансформации энергетической отрасли для Беларуси, по ее успешной интеграции и разработке универсальных критериев для стран с наиболее тесными экономико-политическими связями является работа над Концепцией цифровой трансформации отраслей ТЭК государств-участников СНГ и над Планом первоочередных мероприятий по ее реализации. Такие проекты направлены на систематизацию уже имеющегося опыта использования цифровых технологий на национальных уровнях, формирование единого видения цифровизации отраслей ТЭК [9, с. 50–51].

Электроэнергетическая отрасль Беларуси – составная часть ТЭК страны, объединяющая процессы генерации, распределения, преобразования и сбыта электрической энергии, обеспечивающая внутренние потребности отраслей экономики и населения и осуществляющая в незначительном количестве экспорт. Отрасль обладает полным комплексом технологических процессов в области электро- и теплогенерации, в том числе в атомном секторе (с 2020 г.), а также практически не зависит от импорта первичных энергоресурсов. Рассмотрим применение технологии Smart Grid (умная сеть) и ряда инфраструктурных решений, в частности ЦОД электроэнергии (ЦОДЭ) и локализации СНЭ в Беларуси, как наиболее эффективных способов использования потенциала электроэнергетики страны в целях обеспечения ее энергетической безопасности.

Smart Grid. В Белорусской энергосистеме предусматривается продолжение работ по созданию, реконструкции и модернизации распределительных электрических сетей с внедрением элементов Smart Grid. В частности, предполагаются постепенная автоматизация сетей напряжением 0,4–10,0 кВ, установка систем контроля их состояния, внедрение платформ создания комплексов диспетчерского, технологического, ситуационного, коммерческого управления объектами электроэнергетики и т. д. [10]. Началом внедрения технологии Smart Grid принято считать 2014 г., когда был внедрен пилотный проект на базе КУП «Бобруйские электросети» при поддержке компании «Шнайдер Электрик». Следует отметить, что отдельные элементы концепции были все же внедрены (например, применение технологии АСКУЭ и АСУ ТП), но конечного результата достигнуто не было (подразумевалась 100%-ная автоматизация электросетевого хозяйства района и граничащих с ним еще четырех административных районов).

Переход к технологиям Smart Grid, расширение систем управления также приведут к увеличению нагрузки на каналы связи и потребуют направления инвестиций в их развитие. Увеличение темпов внедрения цифровых технологий в электроэнергетике представляется возможным при условии привлечения большего числа источников финансирования. Внедрение современных технологий, развитие инфраструктуры умных сетей позволит объединить в единую сеть управление, контроль и защиту, а также обеспечить всех участников процессов генерации, распределения и потребления энергии необходимой информацией, что повысит эффективность функционирования энергетики и энергоэффективность национальной экономики в целом.

Несмотря на то что термин Smart Grid официально используется с 2003 г. после публикации М. Т. Вигт «Спрос надежности будет управлять инвестициями», к единой трактовке понятия до сих пор не пришли. В мировой практике для определения умной сети используются ее атрибуты или признаки. Иными словами, Smart Grid – система передачи электроэнергии по цепочке от производителя услуги к потребителю. Она способна сама отслеживать и распределять потоки электричества с целью достижения максимальной эффективности использования энергии. Благодаря информационно-коммуникационным технологиям все оборудование Smart Grid взаимодействует друг с другом. Конечная цель создания Smart Grid – деятельность в формате единой интеллектуальной системы энергоснабжения. Результаты анализа собранной с оборудования информации помогают оптимизировать использование электроэнергии, снизить затраты, увеличить надежность и эффективность энергосистем.

По мнению белорусских специалистов-практиков в области построения электрических сетей (РУП «Белэнергопроект»), «... интеллектуальные электрические сети (Smart Grid) представляют собой идеологию электрических сетей будущего, в которой планируемые на перспективу решения должны, по возможности, укладываться в рамки этой идеологии. Важно учесть, что Smart Grid – это идеология, а не комплекс каких-либо решений». Однако определенные виды электротехнической продукции и автоматики белорусского выпуска уже по ряду показателей соответствуют признакам Smart Grid.

В настоящее время масштабная реализация Smart Grid в Белорусской объединенной энергосистеме в обозримом будущем маловероятна по следующим причинам:

- 1) отсутствуют развитые розничные рынки (в меньшей степени – оптовые) электроэнергии;
- 2) широкий спектр объектов малой генерации, что усложняет объединение всех объектов в одну платформу на базе технологии Smart Grid.

В условиях развития умных технологий, ежегодного повышения уровня потребления энергии, погодных катаклизмов, увеличивающегося риска кибератак растет и потребность в гибкой и надежной электросети. Ответом на эти вызовы становится появление зарекомендовавшей себя технологии. Данная сеть вбирает в себя обширный массив из технических элементов и узлов, обеспечивающих цифровой формат связи и обработки данных. Наиболее перспективными возможностями Smart Grid принято считать:

- способность к самовосстановлению после аварийных ситуаций;
- устойчивость к кибернетическому вмешательству;
- доступность для прибывших пользователей;
- гибкость, в том числе способность подстроиться под нужды потребителей;
- предупреждение опасных для людей и окружающей среды ситуаций;
- повышение эффективности работы сети.

Для кардинального повышения технико-экономических показателей эффективности и надежности функционирования распределительных электрических сетей необходим их перевод на более высокий качественный технический уровень. Построение активно-адаптивных распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10,0 (6) кВ – первоочередная задача. Ее можно достичь при комплексной модернизации, инновационном развитии и автоматизации всех субъектов электроэнергетики на основе передовых технологий и сбалансированных проектных решений на всей территории Беларуси. Такая электросеть нового поколения способна в авторежиме моментально реагировать на изменения параметров. Изменения в сети будут учитывать различные причины – кибервзлом, шпионаж (т. е. снижение влияния человеческого фактора), аварию на сети из-за природных катаклизмов, вывод из эксплуатации в связи с износом участков сети и проч. В среднесрочной перспективе (на протяжении 10 ближайших лет) при построении широкой сети распределенных источников малой генерации формирование розничных рынков электроэнергии в Беларуси и государствах-партнерах по ЕАЭС представляется возможным.

Следующим шагом предполагается объединение на уровне единой информационно-диспетчерской платформы производителей, потребителей электроэнергии и электрических сетей в общее информационно-коммуникационное пространство [11]. Одной из немаловажных задач является обеспечение реагирования на киберугрозы и киберинциденты на объекты энергетической инфраструктуры. Ряд атак на инфраструктуру увеличивается, но вместе с тем количество предотвращенных угроз со стороны Беларуси тоже значительно выросло. Также за десятилетия стало больше видов киберугроз, к которым можно отнести DDOS-атаки с целью кражи данных или вывода программного обеспечения, обеспечивающего бесперебойное функционирование объекта либо инфраструктуры в целом, рассылку на электронные почтовые ящики (как правило, относится к портативным компьютерам) для компрометации информации и действий по краже персональных данных (например, менеджмента организации). Официальная статистика не распространяет информацию относительно количества и последствий такого рода атак, как и их отражение в относительном количестве. Однако само увеличение числа предотвращенных угроз не вызывает сомнений.

Из цифровых систем, интеллектуальных технологий и комплексов, применимых к ТЭК, в том числе в электроэнергетике, помимо технологии Smart Grid следует отметить следующие системы, часть из которых уже реализуется в Беларуси: АСКУЭ, ГИС/ПРК ZULU, BMS, SCADA, Cloud-Control, EMIS, ЕРОКС, БРИЗ-М.

Центры обработки данных. В Беларуси достаточно широкое распространение получают ЦОДы. Один из наиболее популярных подтипов в стране – ЦОДЭ. Он является в сущности специализированным центром, занимающимся сбором, обработкой и хранением данных о потреблении, производстве и распределении электроэнергии, а также позволяет автоматизировать и оптимизировать управление энергосистемой. В ЦОДЭ аккумулируются данные из нескольких источников: из учетных приборов, датчиков, других систем мониторинга. После сбора данные обрабатываются и анализируются с целью оценки эффективности работы энергосистемы и принятия решений по ее управлению.

ЦОДЭ необходим с точки зрения обеспечения надежности и безопасности энергосистемы, а также при обеспечении энергоэффективности и экономии ресурсов. Его можно использовать для прогнозирования потребления и планирования производства электроэнергии в будущем. Например, программное обеспечение «Мой Клиент: Ресурсы» производства ООО «Европейские Системные Технологии» успешно работает на сервере РУП «Витебскэнерго» филиала «Энергосбыт» в качестве ЦОД. Он выполняет функции по обработке, хранению и распространению информации в интересах РУП «Витебскэнерго». Целью центра считается решение проблемы дистанционного получения показаний счетчиков электричества через возможные каналы связи. ЦОД способен сократить капитальную стоимость владения и поддержания ИКТ-инфраструктуры за счет возможностей по эффективному использованию технических средств, а также при перераспределении нагрузок и сокращении административных расходов [12].

В части рекомендаций возможно предложение касаясь ЦОД о том, когда тариф на электроэнергию для его деятельности будет являться пониженным и/или не облагаться НДС. То есть, чем больше ЦОД по объему потребления энергии, тем меньше тариф для его деятельности. Известно, что бизнес к такой расстановке готов. Например, в России в 2025 г. разрабатываются поправки в «Закон о промышленной политике». Помимо требуемых объемов энергии для функционирования ЦОД, предлагается четко регламентировать следующие вопросы: что следует отнести к понятию «центр обработки данных»; какие преференции и льготы будет получать такой объект, в которых используется определенная доля собственного отечественного оборудования; сроки преференций и льгот в зависимости от объемов инвестиций в объект. Создание тарифной сетки в соответствии с мощностями ЦОД, упрощенный, недискриминационный вход ЦОД на рынки Беларуси в качестве мощного автоматизированного средства, обладающего многозадачностью, регламентация термина «центр обработки данных» – основные задачи, которые возможно отразить в технических нормативно-правовых актах и ряде технических стандартов госорганами в перспективе.

Системы накопления энергии. Перспективным направлением в части автоматизации ряда процессов в энергетической отрасли является создание и эксплуатация СНЭ. СНЭ, устанавливаемые на тепловых электрических станциях и учитывающие возможность выдачи мощности в электросеть, могут использоваться для регулирования частоты, сглаживания пиковых часов работы энергосистемы и регулирования ее нагрузки, для обеспечения статической и динамической устойчивости энергосистемы. В некоторых случаях СНЭ могут применяться в качестве альтернативы генерации в пиковое время ее использования. При этом экономическая целесообразность установки должна обосновываться результатами технико-экономических расчетов, подтверждающими их преимущества над энергоисточниками [13].

Выбор энергоисточников для реализации пилотных проектов по установке СНЭ, их мощности и емкости должен осуществляться по результатам комплексного анализа, в котором следует учитывать режимы работы электростанции и подключенных к ней крупных промышленных потребителей, количество линий электропередачи 110 кВ и более, к которым подключена электростанция, общее значение станции для энергосистемы. Разработку документации до момента вложения инвестиций в проект, предусматривающий вариант установки СНЭ, целесообразно проводить после фактического появления их на рынке Беларуси в существенных объемах. При этом следует учитывать такие факторы, как срок службы СНЭ и их качественные характеристики, а срок окупаемости СНЭ как эффективного энергосберегающего мероприятия предусмотреть в диапазоне десяти лет.

Использование СНЭ в системообразующих сетях 220 кВ и более экономически нецелесообразно по причине их высокой стоимости, а также из-за значительных требуемых величин по их мощности и емкости для сетей 220 кВ. Необходимым условием экономической целесообразности использования СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов является срок окупаемости.

Для трансформаторных подстанций 110/10 кВ в условиях белорусской энергосистемы использование СНЭ позволяет сбалансировать суточную неравномерность нагрузок, компенсируя дневные пиковые нагрузки и повышая ночные минимальные нагрузки. Применение СНЭ способно помочь в отказе от замены трансформаторов 110/10 кВ в пользу трансформаторов с большей мощностью с преобладанием следующих типов нагрузки:

- для коммунально-бытового потребления при росте нагрузок на 30 % больше допустимой перегрузочной способности существующих трансформаторов;
- для субъектов хозяйствования при росте нагрузок ориентировочно на 70 % больше допустимой перегрузочной способности существующих.

При существующей стоимости систем накопления энергии, доступных на рынке Беларуси, капитальные вложения в их установку в распределительных электрических сетях напряжением 0,4–10,0 кВ коммунально-бытовых потребителей значительно превышают стоимость реконструкции электросетевых объектов. Оценку цифровой трансформации в энергетике, как правило, проводят с учетом межотраслевого уровня, на котором необходимо определять уже межотраслевые энергетические эффекты, характеризующие изменение производственных показателей (т. е. объемов производства, выпуска и эксплуатации транспорта, потребления энергетической продукции) и в других отраслях (табл. 2).

Таблица 2. Оценка межотраслевых эффектов в результате цифровой трансформации в ходе технологических изменений
Table 2. Assessing the cross-industry effects of digital transformation during technological change

Технологическое изменение	Оценка эффекта в отрасли		
	электроэнергетической	газовой	нефтяной
Увеличение объемов использования ВИЭ в производстве электроэнергии (с сопутствующим процессом повышения прогнозируемости и с интеллектуальным управлением режимами энергосистемы и сети)	Снижение объемов потребления ископаемого невозобновляемого топлива (нефти и природного газа). Увеличение объемов передачи электроэнергии для объектов ТЭК, снижение потерь при передаче. Снижение передачи электроэнергии в иные страны по причине их выхода из договоров	Снижение объемов добычи с учетом изменения потерь и спроса электростанций. Снижение объемов транспортировки газа и потерь при транспортировке. Снижение потребления электроэнергии на нужды в сфере добычи газа	–
Увеличение количества электромобилей (удешевление под них инфраструктуры, прочие возможности для владельцев на рынке электроэнергии)	Существенное увеличение объемов производства электроэнергии с целью обеспечения спроса электромобилей. Рост объемов передачи электроэнергии для объектов газовой отрасли и потерь при передаче. Рост производства электроэнергии (главный драйвер – ввод в ОЭС БелАЭС). Повышение объемов передачи электроэнергии для объектов добычи нефти и нефтепереработки отрасли (соответственно, гипотетический рост потерь при передаче)	Рост объемов добычи с учетом изменения потерь и спроса электростанций. Увеличение объемов транспортировки газа и потерь при его транспортировке (трубопроводом). Рост потребления электроэнергии на потребности промышленного производства	Снижение спроса на моторное топливо. Снижение объемов нефтепереработки. Снижение объемов добычи и транспортировки нефти. Снижение потребления электроэнергии на производственные нужды предприятий нефтепереработки

Источник: составлено автором на основе [2, 4, 5, 11].

Важным элементом наиболее популярной концепции по интеллектуализации энергетических сетей Smart Grid являются облачные вычисления (Cloud Computing), главная суть которых – обеспечение деятельности удаленного хранилища данных, автоматика действий с целью аналитических исчислений, снижение издержек на обслуживание IT-систем путем экономии энергии, финансовых ресурсов и оптимизации работы персонала.

Научным сообществом и бизнесом предлагаются возможности интеграции технологий блокчейн в концепции Smart Grid. Блокчейн, по задумке разработчиков технологии, будет содействовать обеспечению устойчивой тенденции к распределению потоков. Предполагается, что данная технология позволит поддерживать и распределять ее на региональные узлы накопления энергии на уровне РУП-ОБЛЭНЕРГО [5, 11]. Цифровизация процесса принятия управленческих решений в самой отрасли в Беларуси связана с цифровизацией бизнес-процессов на уровне предприятия и, в том числе, с созданием и развитием офиса цифровизации. В основе подхода, предлагаемого в Стратегии ГПО «Белэнерго» [14], лежит типовая двухуровневая иерархическая архитектурная схема взаимодействия информационной системы в рамках единого отраслевого информационного пространства: нижний уровень – ERP-системы, верхний – BPM-система.

Оценкой высокой степени зрелости цифровизации отрасли следует считать уровень и количество различных инициатив, стартапов, внедрение определенных технологий. С точки зрения исследовательского опыта, важно определение рисков в отрасли, с которыми может столкнуться национальная экономика. В проведенном исследовании структурирована информация, относящаяся к текущему состоянию развития электросетевого комплекса Беларуси, в том числе с учетом опыта государств с развитой рыночной экономикой. В табл. 3, составленной автором на основе ряда исследований и показателей, взятых из статистического бюллетеня [14] и научных изданий [1–3, 5, 6, 11], представлена информация о текущем положении электросетевого комплекса Беларуси в сравнении с опытом государств с развитой электросетевой инфраструктурой.

Таблица 3. Текущее состояние и электросетевого комплекса Беларуси
в сравнении с опытом развитых государств

Table 3. Current state of the electric grid complex of Belarus in comparison
with the experience of developed countries

Показатель	Беларусь		Развитые государства	
	Текущее состояние	Ориентир	Текущее состояние	Ориентир
Уровень потерь электроэнергии в распределительных сетях	До 40 % (технологический расход на транспортировку во всех сетях – от 7,36 до 8,03 %)	4–5 %	6 %	4 %
Наличие интеллектуальных приборов учета (split-счетчики с расщепленной архитектурой)	На конец 2022 г. в Беларуси внедрено более 27 тыс. электросчетчиков (3,73 % от всего количества). Цена трехфазного электросчетчика с технологией удаленного доступа – от 500 до 830 BYN в зависимости от его комплектации	100 %	50 %	100 %
Наличие единой базы данных, стандартов и центра сбора данных	В стадии проработки. Ставка на так называемый офис цифровизации	Централизованный порядок (офис цифровизации) с сетевой организацией	Сетевая форма организации	
Единый оператор учета	Более 4,5 млн собственников приборов учета	Отсутствие дискриминационных действий и кибератак	Отсутствие дискриминационных действий и кибератак	

Окончание табл. 3
Ending of Tab. 3

Показатель	Беларусь		Развитые государства	
	Текущее состояние	Ориентир	Текущее состояние	Ориентир
Совместимость приборов учета	Нет, представлено на рынке порядка 200 модификаций (разрознена)	Полная совместимость и общие критерии и подходы к оценке	Полная совместимость и общие критерии и подходы к оценке	
Доступ субъектов рынка к данным учета	Ограничен	Отсутствие дискриминационных действий и кибератак	Отсутствие дискриминационных действий и кибератак	
Защищенность и безопасность данных	Не проработана, имеется опыт кибервзлома персонального учета электроэнергии в быту	Соответствует критериям Стратегии ГПО «Белэнерго» на период с 2021 по 2025 г.	Соответствие, как правило, общеевропейскому стандарту	

Определенно, при внедрении цифровых продуктов и решений нужно учитывать историческую взаимосвязь с реализацией и ускорением цифровизации энергетического комплекса. Пока следует констатировать, что цифровизация – это общемировой тренд. Ряд показателей, которые сравнивались в статье (уровень потерь электроэнергии в распределительных сетях, наличие интеллектуальных приборов учета), существенно отличается от развитых государств. Однако при планомерной деятельности электросетевых предприятий и программ, регламентирующих процесс внедрения цифровых решений и проектов в Беларуси, этот разрыв возможно сократить при введении импортозамещающих технологий и укрупнении групп собственных разработчиков по созданию и сопровождению программного обеспечения и продуктов и оказанию ими аутсорсинговых услуг. В таком случае произойдет постепенное повышение гибкости и адаптивности энергосистемы, сглаживание пиковой нагрузки, снижение потерь и прочих технико-экономических показателей.

Заключение

1. С учетом проведенного анализа направлений развития электроэнергетики в условиях цифровой трансформации предлагается обратить внимание на:

- обеспечение эволюционного развития продуктов в соответствии с запросами рынка, новыми технологическими возможностями и требованиями регуляторов, соблюдение баланса интересов производителей, потребителей и государства;
- существующие трудности в развитии отечественного рынка IT-решений (относительно невысокая скорость разработки продуктов, сложность их адаптации к существующему информационно-коммуникационному ландшафту ввиду санкционных ограничений на поставки оборудования);
- низкий уровень взаимодействия отечественных вендоров с национальными операторами в части предоставления услуг по разработке и внедрению IT-решений;
- вопросы этики, безопасности, эффективности и интенсификации внедрения передовых цифровых решений: искусственного интеллекта, машинного обучения, технологии применения Big Data, безлюдных производств;
- развитие общенациональных методических подходов к построению компонентов архитектуры информационных систем в энергетике;
- обеспечение устойчивого и бесперебойного функционирования информационной инфраструктуры топливно-энергетического комплекса, в первую очередь критической информационной инфраструктуры электроэнергетики Беларуси и последующей реализации госполитики в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса с применением единой цифровой платформы и с соблюдением принципов клиентоцентричности.

2. Предлагаемые рекомендации и подходы могут найти свое отражение в ряде учебно-методических комплексов («Экономика энергетики», «Экономика предприятия энергетической отрасли», «Энергетический менеджмент» и др.) и программных документов, регулирующих процессы обеспечения энергетической безопасности.

Список литературы

1. Зорина, Т. Г. Совершенствование методологии оценки цифровой трансформации объединенной энергетической системы Республики Беларусь. Проблемы и перспективы / Т. Г. Зорина, С. Г. Прусов // Вестник КГЭУ. 2021. Т. 13, № 3. С. 99–113.
2. Прусов, С. Г. Методические подходы к совершенствованию оценки эффективности цифровой трансформации энергетики Республики Беларусь / С. Г. Прусов, Т. Г. Зорина // Вестник Брестского государственного технического университета. 2022. № 2. С. 176–181.
3. Зорина, Т. Цифровая трансформация электроэнергетики Беларуси в рамках общих подходов к цифровизации ТЭК стран СНГ / Т. Зорина, С. Прусов // Наука и инновации. 2022. № 2. С. 59–65.
4. Данилова, О. В. Проблемы цифровизации ключевых секторов экономики в Российской Федерации и Республике Беларусь: Smart Grid в электроэнергетике / О. В. Данилова, И. В. Новикова, В. Б. Криштаносов // Труды БГТУ. Серия 5. Экономика и управление. 2021. № 2. С. 5–14.
5. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты / Г. И. Абдрахманова [и др.] // XXII Апрельская Междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, г. Москва, 13–30 апр. 2021 г. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021.
6. Цедрик, А. В. Цифровизация энергетического комплекса Республики Беларусь: анализ состояния, перспективные направления, альтернативное предложение по оценке эффективности / А. В. Цедрик // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 1. С. 16–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-1-16-27>.
7. Об органе государственного управления в сфере цифрового развития и вопросах информатизации: Указ Президента Республики Беларусь от 5 октября 2021 г. № 136. Минск: М-во информ. и связи Респ. Беларусь, 2021.
8. Купчиков, Т. В. Цифровизация «окно возможностей» для повышения эффективности и управляемости энергосистем государств-участников СНГ / Т. В. Купчиков // Исполнительный комитет электроэнергетического Совета СНГ. Нур-Султан, 2022. С. 11–13.
9. Цедрик, А. В. ТЭК Республики Беларусь: тенденции, состояние, рекомендации / А. В. Цедрик // Энергия: экономика, техника, экология. 2024. № 5. С. 43–53.
10. Ковалев, М. М. Будущее белорусской энергетики на фоне глобальных трендов / М. М. Ковалев, А. С. Кузнецов. Минск: Белор. гос. ун-т, 2018.
11. Колик, В. Р. Smart Grid: проблемы и перспективы автоматизации распределительных электрических сетей белорусской энергосистемы: презентация / В. Р. Колик // НИИПИ РУП «Белэнергосетьпроект». Минск, 2019.
12. ЦОД бытовых потребителей электроэнергии РУП «Витебскэнерго» // Европейские электронные технологии.
13. Малашенко, М. П. Интеграция БелАЭС в объединенную энергосистему и потребление природного газа предприятиями Министерства промышленности на технологические цели / М. П. Малашенко // Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2022. С. 44–47.
14. Автоматизация и цифровая трансформация: бюллетень / М-во энергетики Респ. Беларусь; ГПО «Бел-энерго». Минск, 2023.

Поступила 17.03.2025

Принята в печать 21.08.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

References

1. Zorina T. G., Prusov S. G. (2021) Improving the Methodology for Assessing the Digital Transformation of the United Energy System of the Republic of Belarus. Problems and Prospects. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 13 (3), 99–113 (in Russian).
2. Prusov S. G., Zorina T. G. (2022) Methodical Approaches to Improving the Assessment of the Efficiency of the Digital Energy Transformation of the Republic of Belarus. *Bulletin of the Brest State Technical University*. (2), 176–181 (in Russian).
3. Zorina T., Prusov S. (2022) Digital Transformation of the Belarus' Electric Power Industry Within the Bounds of Common Approaches to the CIS Fuel and Energy Sector Digitalization. *Science and Innovation*. (2), 59–65 (in Russian).
4. Danilova O. V., Novikova I. V., Kryshtanosau V. B. (2021) Problems of Digitalization of Key Sectors of the Economics in the Russian Federation and the Republic of Belarus: Smart Grid in Electric Power Industry. *Proceedings of the Belarusian State Technological University*. 250 (2), 5–14 (in Russian).
5. Abdrakhmanova G. I., Bykhovsky K. B., Veselitskaya N. N., Vishnevsky K. O., Gokhberg L. M., Grebenyuk A. Yu., et al. (2021) Digital Transformation of Industries: Starting Conditions and Priorities. *XXII Apr. International Scientific Conf. on the Development of the Economy and Society, Moscow, April 13–30*. Moscow, Ed. House of the Higher School of Economics (in Russian).

6. Tsedrik A. V. (2024) Digitalization of the Energy Complex of the Republic of Belarus: State Analysis, Promising Areas, Alternative Proposal for Evaluating Efficiency. *Digital Transformation*. 30 (1), 16–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-1-16-27> (in Russian).
7. On the Public Administration Body in the Field of Digital Development and Informatization. *Decree of the President of the Republic of Belarus from 5 Oct. 2021 No 136*. Minsk, Ministry of Informatization and Communications of the Republic of Belarus (in Russian).
8. Kupchikov T. V. (2022) Digitalization is the “Window of Opportunity” to Increase Efficiency and Controllability of Energy Systems of the CIS Member States. *Executive Committee of the CIS Power Engineering Council*. Nur-Sultan. 11–13 (in Russian).
9. Tsedrik A. V. (2024) Fuel and Energy Complex of the Republic of Belarus: Trends, Status, Recommendations. *Energy: Economy, Technology, Ecology*. (5), 43–53 (in Russian).
10. Kovalev M. M., Kuznetsov A. S. (2018) *The Future of Belarusian Energy Amid Global Trends*. Minsk, Belarusian State University (in Russian).
11. Kolik V. R. (2019) Smart Grid: Problems and Prospects of Automation of Distribution Electric Networks of the Belarusian Energy System: Presentation. *Research and Development Institute of RUE “Belenergosetproekt”*. Minsk (in Russian).
12. Data Center for Household Electricity Consumers RUE “Vitebskenergo”. *European Electronic Technology*. (in Russian).
13. Malashenko M. P. (2022) Integration of BelNPP into the Combined Energy System and Consumption of Natural Gas by Enterprises of the Ministry of Industry for Technological Purposes. *Energy-Saving Technologies and Alternative Energy*. Minsk, Belarusian National Technical University. 44–47 (in Russian).
14. Automation and Digital Transformation: Bulletin. *Energy MOU Rep. Belarus; GPO “Belenergo”*. Minsk, 2023 (in Russian).

Received: 17 March 2025

Accepted: 21 August 2025

Available on the website: 10 October 2025

Сведения об авторе

Цедрик А. В., ст. науч. сотр., Институт экономики
Национальной академии наук Беларуси

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
Минск, ул. Сурганова, 1–2
Институт экономики
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 29 863-08-69
E-mail: aleksandr.cedrik.90@mail.ru
Цедрик Александр Вячеславович

Information about the author

Tsedrik A. V., Senior Researcher, The Institute
of Economics of the National Academy of Sciences
of Belarus

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Surganova St., 1–2
The Institute of Economics
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 29 863-08-69
E-mail: aleksandr.cedrik.90@mail.ru
Tsedrik Aleksandr Vyacheslavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-43-53>

УДК 004.942, 519.876.5

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОБОТОВ И ИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Т. Ю. КИМ, Г. А. ПРОКОПОВИЧ

*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Разработана универсальная программная технология для быстрого создания и тестирования цифровых двойников робототехнических систем с возможностью адаптивного управления. Она позволяет гибко и относительно быстро создавать цифровые двойники мобильных и антропоморфных роботов. Цифровой двойник, состоящий из имитационных моделей кинематической системы, системы управления и среды функционирования, в режиме реального или псевдореального времени способен практически полностью имитировать поведение робота в различных режимах. Описан процесс работы технологии, начиная от создания твердотельной модели и заканчивая выбором метода оптимального управления движением робота. Особое внимание уделено адаптивному управлению через обучение с подкреплением, позволяющему системе адаптироваться в изменяющихся условиях. В зависимости от целей предполагаемого объекта и доступности исходных данных предлагаемая технология дает возможность проектировать и реализовывать систему управления роботом или проверять новые методы управления. Реализован практический пример применения технологии создания цифровых двойников для управления антропоморфным роботом, цель которого – имитация человеческой ходьбы. Результаты подтверждают сокращение времени разработки и повышение надежности решений. Технология интегрирована в единый программный комплекс, что упрощает создание новых двойников и тестирование алгоритмов.

Ключевые слова: мобильный робот, колесный робот, антропоморфный робот, цифровой двойник, система управления, генетический алгоритм, обучение с подкреплением, имитационное моделирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ким, Т. Ю. Технология создания цифровых двойников для оптимизации конструктивных параметров роботов и их систем управления / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 43–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-43-53>.

TECHNOLOGY FOR CREATING DIGITAL TWINS TO OPTIMIZE THE DESIGN PARAMETERS OF ROBOTS AND THEIR CONTROL SYSTEMS

TATYANA YU. KIM, RYHOR A. PRAKAPOVICH

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. A universal software technology for rapid creation and testing of digital twins of robotic systems with adaptive control capability has been developed. It allows for flexible and relatively rapid creation of digital twins of mobile and anthropomorphic robots. A digital twin consisting of simulation models of the kinematic system, control system, and operating environment is capable of almost completely simulating the robot's behavior in various modes in real or pseudo-real time. The technology operation process is described, starting from creating a solid model and ending with selecting the optimal robot motion control method. Particular attention is paid to adaptive control through reinforcement learning, which allows the system to adapt to changing conditions. Depending on the goals of the proposed object and the availability of initial data, the proposed technology makes it possible design and implement a robot control system or test new control methods. A practical example of applying the technology for creating digital twins to control an anthropomorphic robot aimed at simulating human walking has been implemented. The results confirm a reduction in development time and an increase

in the reliability of solutions. The technology is integrated into a single software package, which simplifies the creation of new twins and testing of algorithms.

Keywords: mobile robot, wheeled robot, anthropomorphic robot, digital twin, control system, genetic algorithm, reinforcement learning, simulation modeling.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kim T. Yu., Prakaopovich R. A. (2025) Technology for Creating Digital Twins to Optimize the Design Parameters of Robots and Their Control Systems. *Digital Transformation*. 31 (3), 43–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-43-53> (in Russian).

Введение

С целью снижения финансовых затрат и рисков, связанных с проведением экспериментов на реальных объектах, в научных и производственных областях широко применяются цифровые двойники. Это дает возможность проводить исследования и анализ в виртуальной среде, минимизируя временные затраты, обеспечивая более быстрые циклы разработки [1]. Цифровой двойник – комплексная имитационная модель, точно воспроизводящая все физические характеристики и логику поведения за счет оснащения сенсорами и системой управления, что позволяет полноценно взаимодействовать с окружающей средой.

В ряде научно-технических работ авторами были созданы цифровые двойники мобильных роботов, а также разработаны методы оптимизации систем управления, нейросетевого регулирования и обучения с подкреплением для мобильных роботов и параллельных манипуляторов. Кроме того, с помощью эволюционных алгоритмов проводилась оптимизация массы компонентов редуктора для трехмерной печати [2–4]. На основе этих моделей успешно тестировались методы автоматической генерации траекторий для колесных роботов, что подтвердило их эффективность и универсальность. Одним из первых результатов стало создание имитационной модели двухколесного робота [5], которая получила дальнейшее развитие в формировании и совершенствовании системы управления [6].

Разработанная система обеспечила стабильное движение по заданной траектории и адаптацию к изменяющейся внешней среде. Для повышения точности управления использовались сенсоры и обратная связь. Также велись работы по оптимизации целевой функции, определяющей критерии эффективности системы через точность движения, минимизацию ошибок и устойчивость к внешним воздействиям [7, 8]. Для ее настройки применялись современные методы, такие как генетические алгоритмы и обучение с подкреплением. Первые позволяли находить оптимальные параметры управления, имитируя естественный отбор, тогда как второй подход обеспечивал самообучение системы в процессе взаимодействия со средой [4, 6–11].

Таким образом, накопленный опыт авторов позволил на основе разработанного шаблона создать и выполнить тестирование цифровых двойников различных роботов и устройств, что продемонстрировано в [2, 4, 11]. Так, в [4] представлена оптимизация массы компонентов редуктора для трехмерной печати с применением генетического алгоритма. В [2] описывалось создание антропоморфного робота, в [11] – автономное управление подъемной воздушной подушкой, причем обе работы основывались на применении обучения с подкреплением.

В результате анализа проделанной работы появилось логическое решение по объединению и унификации полученного опыта. Это позволило не только систематизировать информацию, но и создать единый программный комплекс, который в последующем мог бы интегрировать и другие модели и алгоритмы. Таким образом, предложенный программный комплекс можно считать реализацией целой технологии по созданию и анализу цифровых двойников. Основные функциональные блоки, из которых состоит рассматриваемая технология, представлены на рис. 1.

Предложенная технология базируется на общих подходах разработки имитационных моделей, спроектированных из твердотельных моделей, моделирования и модели системы управления, служит для обеспечения взаимодействия между блоками (моделями). Эта технология опирается на общие подходы кинематических и динамических расчетов роботов, а также на опыт авторов. Комбинирование вышеперечисленных моделей друг с другом позволяет экспериментировать и создавать новые цифровые двойники. К примеру, к модели антропоморфного робота можно добавить существующие сенсоры для обхода препятствий, или применить подражательный метод для выполнения человеческой походки модели робота, как это было реализовано на примере колесного робота в [5].

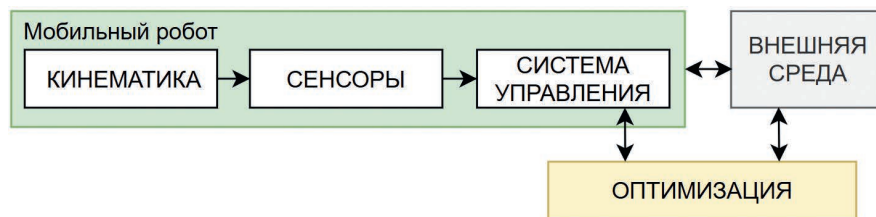


Рис. 1. Универсальная схема создания цифровых двойников
Fig. 1. Universal framework for digital twin development

Технология создания цифровых двойников

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального робота или другого технического устройства, выполненную в одной или нескольких специализированных САх (Computer-aided technologies – автоматизированные системы проектирования и производства) системах, таких как CAD (проектирование), CAM (производство), CAE (инженерный анализ) [12]. В процессе исследований все работы проводились в среде MATLAB/Simulink.

Типовой цифровой двойник мобильного робота состоит из следующих компонентов:

- 1) имитационная модель объекта управления, повторяющая все физические параметры робота, которая создается на основе полной трехмерной модели робота (CAD);
- 2) модель его системы управления.

Имитационная модель может быть представлена в виде математического описания, демонстрируя зависимости и системы уравнений, либо в виде численной модели. Система управления может быть в виде некой аналоговой формы, либо численно воспроизводить исполнение заданных алгоритмов управления, например, контроллер. Причем в некоторых случаях имитационная модель системы управления может быть вынесена из цифрового двойника и заменена реальной системой управления. Тогда данную систему принято называть HIL (Hardware-in-the-loop). Она позволяет тестировать реальные контроллеры, взаимодействующие с имитационными моделями робототехнических систем, для проверки их работоспособности в условиях, приближенных к реальным.

Имитационная модель робота состоит из кинематической и динамической частей. Кинематическая модель описывает положение, скорость и ускорение робота, не принимая во внимание действующие на него силы и моменты. Кинематика фокусируется на геометрических движениях: изменение положения и угла поворота платформы. Динамическая модель робота, в свою очередь, учитывает внешние факторы, такие как силы, момент, инерция и трение. Динамическую модель можно создавать в Simulink самостоятельно из блоков в библиотеке самого Simulink или интегрировать уже имеющуюся твердотельную модель CAD, что позволит создать модель, которая учитывает физические ограничения и геометрические конструкции. При правильном описании кинематической модели среда MATLAB способна сгенерировать адекватную динамическую модель.

Следующим важным компонентом имитационной модели робота являются сенсоры, которые обеспечивают сбор информации из окружающей среды и его внутреннего состояния. Там уже реализованы фильтрация и нормализация получаемых данных, которые улучшают точность и надежность данных для управления и принятия решения. Следующий компонент – внешняя среда, также разрабатываемая в виртуальной среде. В работе по оптимизации контроллера движения мобильного робота [6] внешняя среда представляет собой полигоны с возможностью выбора карт. Имитационная модель может взаимодействовать с различными препятствиями или следовать по линии. Процесс взаимодействия имитационной модели робота с виртуальной средой анализируется на основе предложенных целевых функций, которые оценивают качество управления и выполнение поставленной задачи. Заключительным компонентом является процесс оптимизации, где непосредственно реализуется система управления. Оптимизация направлена на поиск наилучших параметров управления, удовлетворяющих заданным критериям эффективности. Для этого применяются современные методы, такие как генетические алгоритмы и обучение с подкреплением.

Подготовка исходных данных – важный этап при создании цифрового двойника, от которого зависит точность будущих расчетов. Эти данные служат фундаментом для последующего мо-

делирования и включают в себя информацию о положении и об ориентации реального робота, параметры исполненных механизмов, характеристики сенсоров и карт. Взаимодействие этих компонентов позволяет формировать различные варианты цифровых двойников, имеющие некоторые сходства между собой. Поэтому было принято решение объединить их в технологию создания цифровых двойников, которая включает различные имитационные модели и системы управления. В качестве практического примера в разделе «Практическое применение технологии создания цифрового двойника с возможностью адаптивного управления» представлена реализация имитационной модели и системы управления антропоморфного робота.

На рис. 2 показана функциональная схема технологии создания цифрового двойника.

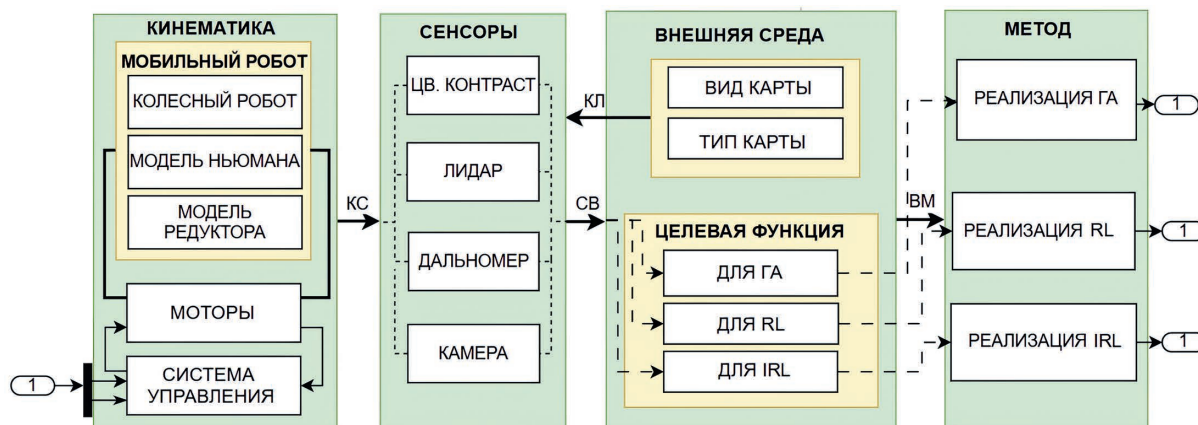


Рис 2. Функциональная схема технологии создания цифрового двойника

Fig. 2. Functional diagram of the digital twin creation technology

Рассмотрим подробнее связи между блоками. Сигнал КС (кинематика – сенсоры) передает данные, вводимые пользователем о характеристиках робота и выборе типа управления, из блока «Кинематика» в блок «Сенсоры». Сигнал СВ (сенсоры – внешняя среда) передает данные от сенсоров об окружающей среде и о состоянии робота в блок «Внешняя среда» для целевой функции, при этом данные уже проходят фильтрацию, нормализацию и интерпретацию. Сигнал КЛ (карта – лидар) передает информацию о внешней среде обратно в блок «Сенсоры» для корректировки данных; при этом данные преобразуются в оттенки серого и масштабируются в метры/пиксели. Сигнал ВМ (вознаграждение – методы) передает данные целевой функции и характеристики внешней среды в блок «Метод». Прямая линия на схеме означает соединение физических параметров робота, а пунктирная линия указывает предполагаемые связи между блоками. На рис. 2: ГА – генетический алгоритм; RL – обучение с подкреплением; IRL – подражательное обучение.

Как уже отмечалось, цифровой двойник состоит из кинематики робота, сенсоров и внешней среды, а также системы управления. Таким образом, получаем три имитационные модели, а именно: модель робота, модель сенсоров и модель внешней среды. Эти модели могут комбинироваться в различных конфигурациях для создания других роботов.

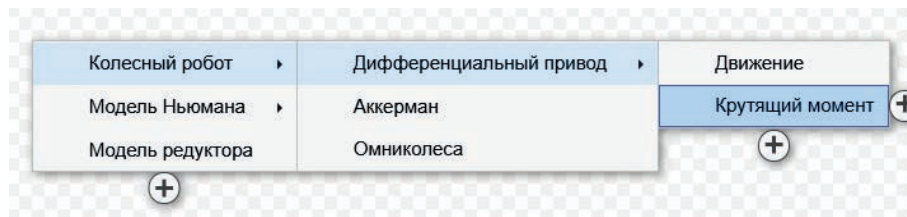
Основные разделы в многослойной модели

При запуске многослойной модели появляются четыре основных раздела: «Кинематика», «Сенсоры», «Внешняя среда», «Оптимизация». Каждый блок имеет свой набор параметров, от выбора которых зависят остальные параметры в последующих этапах.

«Кинематика». Здесь представлены такие модели, как дифференциальный привод с приводом Аккермана, омниколеса, модель компонентов редуктора для трехмерной печати и антропоморфный робот. Каждая из них позволяет осуществлять выбор подходящего типа двигателя в зависимости от конфигурации робота, а также его габаритов. В случае колесного робота можно задать необходимый тип двигателя и его параметры, такие как мощность, крутящий момент и скорость вращения. Для моделей шестерней возможно уточнение входных параметров, включая передаточное отношение, тип зацепления и материалы. Модель антропоморфного робота предоставляет возможность выбора отдельных компонентов, таких как манипулятор или педипулятор, либо

полного робота в заданной конфигурации, что адаптирует кинематическую модель под конкретные задачи. Каждая из представленных моделей сопровождается соответствующим описанием кинематической характеристики, обеспечивая возможность дальнейшего моделирования.

В разделе «Кинематика» необходимо выбрать объект управления в выпадающем окне, тип модели и вид управления (рис. 3, *a*) и задать начальные значения в зависимости от выбранного объекта (рис. 3, *b*).



a

b

Рис. 3. Реализация блока «Кинематика»:

a – выбор объекта для блока (колесный робот с дифференциальным приводом); *b* – интерфейс блока

Fig. 3. Implementation of the “Kinematics” block:

a – selection of an object for the block (wheeled robot with differential drive); *b* – block interface

На выходе выбранной модели формируются данные, необходимые для дальнейшей обработки: скорости вращения колес, текущие координаты робота и угол ориентации. Эти данные можно представить в виде графиков, таблиц, а также сохранить в формате .mat.

«Сенсоры». В этом разделе (рис. 4, *a*) представлены различные типы датчиков, предназначенные для моделирования и обработки входных данных, имитирующих сигналы, поступающие с реальных устройств. В настоящее время доступны следующие датчики: датчик света, датчик расстояния, лидар, адаптированные для колесного робота. Выбор количества и расположения сенсоров показан визуалью на рис. 4, *b*. В соответствии с выбором сенсора заполняются необходимые входные параметры, остальные же игнорируются. Для модели антропоморфного робота предполагается использовать вышеперечисленные сенсоры в зависимости от поставленных задач, тогда как для редуктора нет необходимости использовать этот блок. В дальнейшем планируется расширение функционала за счет добавления камер, ультразвуковых датчиков, датчиков освещенности и GPS-модулей.

Управление робототехнической системой осуществляется исходя из информации, полученной с сенсоров, что позволяет адаптировать поведение робота под текущие условия окружающей среды. Рассмотрим пример использования сенсоров на мобильном роботе с датчиками света. Для начала пользователь задает их количество и расположение на корпусе мобильного робота в соответствии с поставленной задачей. Внутри каждого датчика уже предусмотрена функция с предустановленными алгоритмами обработки данных. Эти алгоритмы обеспечивают анализ входных сигналов, включая фильтрацию, нормализацию и интерпретацию данных.

Следует отметить, что при реализации на реальном роботе были выявлены корректировки данных, связанные с изменением уровня освещенности. Эти изменения учитываются в моде-

лировании, где предусмотрена возможность активации соответствующего режима моделирования. Такой подход позволяет повысить точность моделирования и приближение работы сенсоров к реальным условиям эксплуатации.

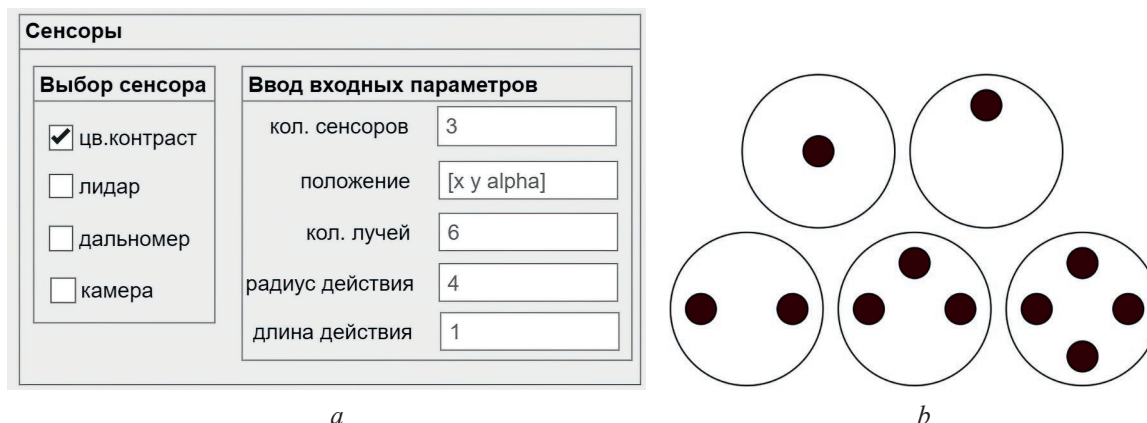


Рис 4. Реализация блока «Сенсоры»: *a* – интерфейс блока; *b* – количество и расположение сенсоров
Fig. 4. Implementation of the “Sensors” block: *a* – block interface; *b* – number and location of sensors

«Внешняя среда». Этот раздел представляет структуру выбора и настройки внешней среды, где происходит выбор карты и ее типа, определяется целевая функция для решения задач оптимизации или управления (из раздела «Оптимизация») и для каждого объекта (из раздела «Кинематика»). Процесс начинается с выбора карты, которая задает геометрическую форму или конфигурацию пространства. В качестве вариантов доступны эллипс, квадрат, окружность или сложная карта, что позволяет учитывать различные формы и сложности среды. Далее уточняется тип карты, который может быть представлен в численной или аналоговой форме. Числовой формат карты – это дискретное представление пространства в виде матрицы, которая содержит реальные препятствия, аналоговый формат – непрерывное представление пространства, где координаты и препятствия задаются в виде функций (формул). Данные, сформированные от выбранной карты, преобразовываются в оттенки серого, масштабируются в необходимые метры/пиксели и передаются в раздел «Сенсоры» для корректной работы последних.

На следующем этапе задается/определяется целевая функция, которая формируется (уже разработана/сформирована) в зависимости от выбранной карты и типа задачи (рис. 5). Целевая функция уже адаптирована для различных методов, таких как ГА, RL или IRL. Таким образом, схема обеспечивает гибкость настройки среды и целевой функции для моделирования и оптимизации в зависимости от заданных параметров и задач. Что касается колесных роботов, существует возможность добавить визуализатор движения робота по карте (добавить галочку).

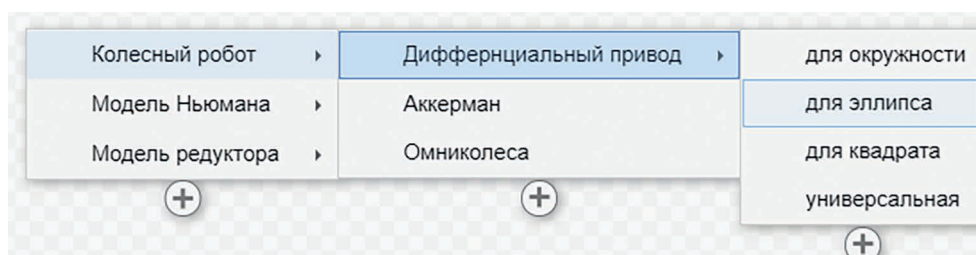


Рис. 5. Реализация блока «Внешняя среда»
Fig. 5. Implementation of the “External Environment” block

«Оптимизация». В разделе представлен блок, где происходит процесс оптимизации, в котором реализованы три эволюционных метода: ГА, RL и IRL. На рис. 6 показаны общие входные данные, отмеченные красным цветом. Они поступают из раздела «Внешняя среда» и являются общими данными для работы всех трех алгоритмов; включают параметры карты и целевой функции, которые используются независимо от выбранного метода оптимизации. Черные стрелки на рис. 6 обозначают отдельные параметры, задаваемые индивидуально для каждого из алгоритмов.

мов. Эти параметры позволяют адаптировать работу системы под особенности конкретного метода, будь то ГА, RL и IRL. Тот же принцип действует и для выходного сигнала блока «Оптимизация».



Рис. 6. Реализация входных и выходных данных в блоке «Оптимизация»

Fig. 6. Implementation of input and output data in the “Optimization” block

Практическое применение технологии создания цифрового двойника с возможностью адаптивного управления

Благодаря имеющейся возможности, исследования проводились на реальном антропоморфном роботе. Однако, как известно, тестирование на физических роботах ведет к высоким затратам ресурсов, временным издержкам и рискам повреждения оборудования. В связи с этим был разработан цифровой двойник на базе предложенной технологии, позволяющий безопасно тестировать и оптимизировать алгоритмы управления в виртуальной среде до их внедрения на реальном роботе. Воспользуемся разработанной технологией создания цифровых двойников адаптивного управления. В качестве примера рассмотрим задачу программирования имитации походки антропоморфного робота, целью которого является плавно и устойчиво двигаться шагом по ровной поверхности.

Для дальнейшей работы над моделью было принято решение преобразовать ее в специализированные блоки библиотеки Simscape MATLAB/Simulink. Нижние конечности робота оснащались вращательными суставами с крутящим моментом, а руки робота имели пассивные вращающиеся суставы, что способствовало более естественному движению. Для обеспечения правильного функционирования модели выставлялись ограничения по углам в каждом суставе, это предотвращало чрезмерные и неестественные движения робота. Чтобы модель воспринимала пол как твердую поверхность, подключались контактные силы, что позволяло учитывать влияние силы тяжести и других факторов. Настройка контактных сил приближает моделирование к реальному миру, используя параметры жесткости и демпфирования для управления каждым суставом, а также для реализации взаимодействия с конкретной поверхностью, а точнее – с грунтом.

В этом этапе исследования роль сенсоров выполняли блоки Transform sensors¹ и Bushing joint², которые измеряли величины (включающие относительную позу, скорость и ускорение), перемещение детали робота в пространстве и контролировали демпферы для смягчения движения (назовем их сенсорами корпуса). Роль карты выполняла поверхность, по которой передвигался робот. Затем формировалась целевая функция для оценки походки робота, которая обновлялась в каждый момент времени. Целевая функция оценивает такие критерии, как скорость движения вперед, вертикальное смещение, боковое смещение, потребление электроэнергии (робот выполняет меньше действий, но качественно). Далее выбирался метод оптимизации обучения с подкреплением. Настройка, запуск метода, а также результаты имитации человеческой ходьбы будут рассмотрены подробно в последующих исследованиях.

На основе реального антропоморфного робота и предложенных методов была реализована программная технология управления роботом на базе цифрового двойника, представляющая собой совокупность алгоритмов, методов и действий, направленных на многократное повторяемое воспроизводство технологического процесса (рис. 7).

Обозначения для рис. 7: прямые линии – физические сигналы, передаваемые между блоками; 1 – сигнал в диапазоне $[-1; 1]$, формирует результат работы RL; 2 – блок «Система управления» преобразует сигнал в крутящий момент, учитывая демпфирование, жесткость, а также положение и скорость каждого сустава (3); 4 – блок «Сенсоры» передает информацию о направлении робота, выходные данные блока «Сенсоры» корпуса, данные с сигнала (3) и крутящий момент (2); 5 – блок «Целевая функция» передает оценочные данные и сформированную награду выбранно-

¹ Transform Sensor. Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/sm/ref/transformsensor.html>.

² Bushing Joint. Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/sm/ref/bushingjoint.html>.

му методу, а также дополнительную информацию о среде, включая данные о контактной силе, сенсоры корпуса и (3).

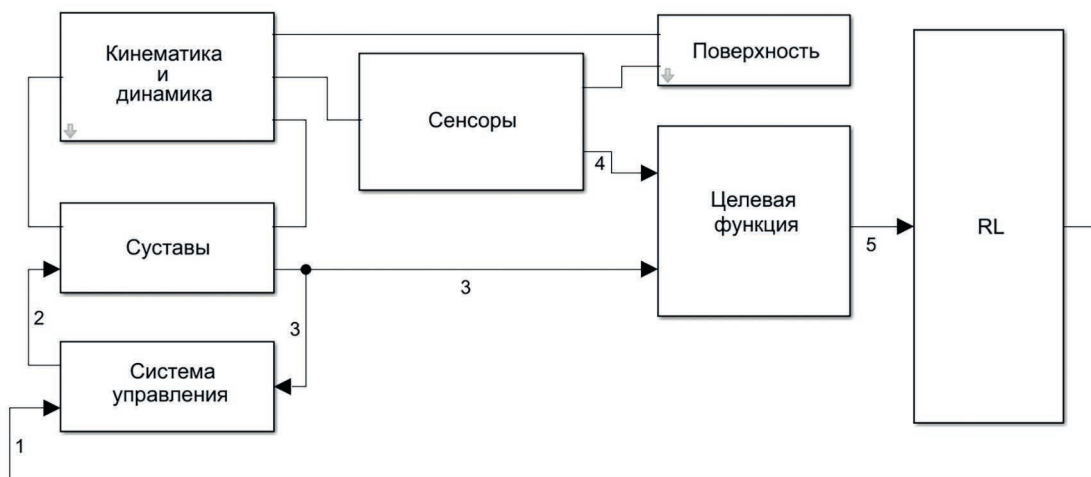


Рис. 7. Цифровой двойник антропоморфного робота с применением обучения с подкреплением в среде Simulink

Fig. 7. Digital twin of an anthropomorphic robot using reinforcement learning in the Simulink

В программе полноценной технологии уже подготовлены модели для работы отдельно с манипулятором, где ноги статичны, с педипулятором, где руки в пассивном вращении, и полноценный робот со всеми активными вращающимися суставами. На примере антропоморфного робота (рис. 8) выбирался тип модели педипулятора, задавались входные параметры в допустимых рамках.

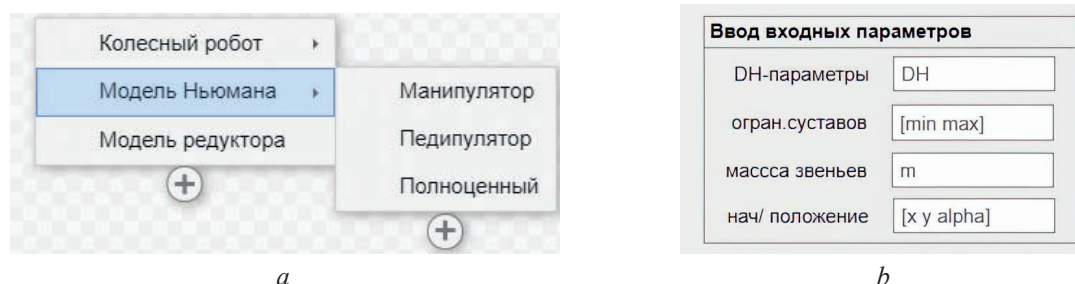


Рис. 8. Антропоморфный робот: *a* – выбор отдельных частей робота в блоке «Кинематика»; *b* – входные параметры для робота

Fig. 8. Anthropomorphic robot: *a* – selection of individual parts of the robot in the “Kinematics” block; *b* – input parameters for the robot

Рассмотренная технология создания цифровых двойников представляет собой структурированную схему, в которой выделены основные блоки: «Кинематика», «Сенсоры», «Внешняя среда» и «Оптимизация» (рис. 9).

Проведенное исследование позволило разработать и апробировать технологию создания цифрового двойника на примере антропоморфного робота. Применение данной технологии направлено на минимизацию временных затрат и снижение вероятности ошибок на этапах моделирования и верифицировании. Кроме того, технология продемонстрировала повышение надежности реализации и проверки методов управления.

Заключение

1. Технология создания цифровых двойников представляет собой гибкость и модульность, что дает возможность комбинирования с имеющимися компонентами. В среде MATLAB/Simulink были созданы блоки управления (программы), которые позволяют по параметрам, указанным в поставленной задаче, переходить от одного блока к следующему, детально расписывая ветви каждого блока.

The interface is divided into four main sections:

- Кинематика (Kinematics):**
 - Выбор объекта (Object Selection):** Колесный робот, Модель Ньюман, Модель редукто..
 - Выбор модели (Model Selection):**
 - ☒ мат. модель
 - ☐ тверд. модель
 - Ввод входных параметров (Input Parameters):**
 - лин. скорость:
 - угл. скорость:
 - рад. колеса:
 - ширина базы:
 - нач. положение:
- Сенсоры (Sensors):**
 - Выбор сенсора (Sensor Selection):**
 - ☒ цв. контраст
 - ☐ лидар
 - ☐ дальномер
 - ☐ камера
 - Ввод входных параметров (Input Parameters):**
 - кол. сенсоров:
 - положение:
 - кол. лучей:
 - радиус действия:
 - длина действия:
- Внешняя среда (External Environment):**
 - Карты (Maps):**
 - ☐ эллипс
 - ☐ квадрат
 - ☐ окружность
 - ☒ сложная карта
 - Тип карты (Map Type):**
 - ☐ численная
 - ☐ аналоговая
 - ☒ загрузить
 - Целевая функция (Objective Function):** Колесный робот, Модель Ньюман, Модель редукто..
- Оптимизация (Optimization):**
 - метод оптимизации (Optimization Method):**
 - ☒ генетический алгоритм
 - ☐ обучение с подкреплением
 - ☐ подражательное обучение

A green play button labeled "Start" is located at the bottom right of the interface.

Рис. 9. Полноценная технология создания цифровых двойников
Fig. 9. Comprehensive digital twin development technology

2. Технология демонстрирует значительный потенциал для создания цифровых двойников с адаптивными системами управления, способных к эффективной работе в сложных и динамичных условиях. Применение таких методов, как генетические алгоритмы и обучение с подкреплением, способствует автоматическому улучшению навыков робота, его адаптации к новым задачам и оптимальному использованию ресурсов. Благодаря возможности предварительного тестирования в симуляционной среде создается основа для разработки надежных решений, которые легко масштабируются и модифицируются в соответствии с потребностями пользователя.

3. Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф23МЭ-030 «Эволюционные методы генерации оптимальных структур высокопроизводительных аппаратных ускорителей для реализации искусственных нейронных сетей на базе перепрограммируемых логических интегральных схем» и в рамках задания 1.3.1. ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика».

Список литературы

1. Stjepandić, J. Digital Twin: A Conceptual View / J. Stjepandić // An Approach for Production Process Optimization in a Built Environment. Cham: Springer, 2022.
2. Ким, Т. Ю. Разработка цифрового двойника антропоморфного робота «Астронавт» с применением метода обучения с подкреплением в режиме реального времени / Т. Ю. Ким // Молодежь в науке. Минск, 2022. С. 419–422.
3. Прокопович, Г. А. Разработка системы управления учебным роботом-манипулятором параллельной структуры с применением технологии модельно-ориентированного проектирования / Г. А. Прокопович // Информатика. 2019. Т. 16, № 4. С. 99–114.
4. Ким, Т. Ю. Метод оптимизации массы деталей редуктора при изготовлении с помощью 3D-печати на основе генетического алгоритма / Т. Ю. Ким, А. В. Печковская, Е. И. Печковский // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. 2024. Т. 21, № 3. С. 32–46.
5. Ким, Т. Ю. Имитационное моделирование движения двухколесного робота RoboCake на горизонтальной плоскости / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Молодежь в науке – 2020: тез. докл. XVII Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 сент. 2020 г. Минск: Беларус. навука, 2020. С. 398–400.
6. Ким, Т. Ю. Оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии на основе генетического алгоритма / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Информатика. 2021. Т. 18, № 4. С. 53–68.

7. Ким, Т. Ю. Исследование влияния способа формирования функции вознаграждения по методу «двойника» для алгоритма обучения с подкреплением / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Информационно коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ–2024): электр. сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Полоцк, 29 марта 2024 г. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2024. С. 93–97.
8. Kim, T. Automatic Tuning of the Motion Control System of a Mobile Robot Along a Trajectory Based on the Reinforcement Learning Method / T. Kim, R. Prakapovich // *Communications in Computer and Information Science*. 2022. Vol. 1562. P. 234–244.
9. Ким, Т. Ю. Разработка метода подражательного обучения для нейросетевой системы управления движением мобильного робота на примере задачи поиска выхода из лабиринта / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Информатика. 2024. Т. 21, № 3. С. 32–46.
10. Ким, Т. Ю. Обучение мобильного робота передвижению в неизвестной среде с применением метода обучения с подкреплением // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере (ITI'2023): матер. 12-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: Объед. инст-т проблем информ. НАН Беларуси, 2023. С. 78–81.
11. Research on Autonomous Lift Control Method of Hovercraft Based on DDPG / Y. Wang [et al.] // Искусственный интеллект в Беларуси: матер. III форума IT-Академграда. Минск: НАН Беларуси, 2024. С. 336–347.
12. Engineers' CAx Education – It's Not Only CAD / C. W. Dankwort [et al.] // *Computer-Aided Design*. 2004. Vol. 36, No 14. P. 1439–1450. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.02.011>.

Поступила 23.04.2025

Принята в печать 27.06.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

References

1. Stjepandić J. (2022) Digital Twin: A Conceptual View. *An Approach for Production Process Optimization in a Built Environment*. Cham, Springer.
2. Kim T. Yu. (2022) Development of a Digital Twin for an Anthropomorphic “Astronaut” Robot Using Real-Time Reinforcement Learning. *Youth in Science*. Minsk. 419–422 (in Russian).
3. Prokopovich G. A. (2019) Development of a Control System for an Educational Parallel-Structure Manipulator Robot Using Model-Based Design Technology. *Informatics*. 16 (4), 99–114 (in Russian).
4. Kim T. Y., Pechkovskaya A. V., Pechkovsky E. I. (2024) Mass Optimization Method for Gearbox Parts Manufactured by 3D Printing Based on a Genetic Algorithm. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics. Informatics*. 21 (3), 32–46 (in Russian).
5. Kim T. Y., Prokopovich G. A. (2020) Simulation of Two-Wheeled RoboCake Robot Motion on a Horizontal Plane. *Youth in Science – 2020, Proc. XVII Int. Sci. Conf.* Minsk, Belaruskaya Navuka. 398–400 (in Russian).
6. Kim T. Y., Prokopovich G. A. (2021) Optimization of PID Controller Coefficients for Mobile Robot Motion Control System Along a Color-Contrast Line Using a Genetic Algorithm. *Informatics*. 18 (4), 53–68 (in Russian).
7. Kim T. Y., Prokopovich G. A. (2024) . Study of the Influence of Reward Function Formation Method Using the “Twin” Approach for Reinforcement Learning Algorithms. *Information and Communication Technologies: Achievements, Problems, Innovations (ICT–2024): Electronic Collection of Articles of the III International Scientific and Practical Conference, Polotsk, March 29*. Novopolotsk, Polotsk State University. 93–97 (in Russian).
8. Kim T., Prakapovich R. (2022) Automatic Tuning of the Motion Control System of a Mobile Robot Along a Trajectory Based on the Reinforcement Learning Method. *Communications in Computer and Information Science*. 1562, 234–244.
9. Kim T. Y., Prokopovich G. A. (2024) Development of Imitation Learning Method for Neural Network Control System of Mobile Robot Using Maze Exit Search Task. *Informatics*. 21 (3), 32–46 (in Russian).
10. Kim T. Y. (2023) Training a Mobile Robot to Navigate in an Unknown Environment Using Reinforcement Learning. *Information Technologies in Industry, Logistics and Social Sphere (ITI'2023): Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference*. Minsk, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. 78–81 (in Russian).
11. Wang Y., Qin Z., Kim T. Y., Wu P., Cheng P., Zhang X., et al. (2024) Research on Autonomous Lift Control Method of Hovercraft Based on DDPG. *Artificial Intelligence in Belarus: Proceedings of the III IT-Akademgrad Forum*. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus. 336–347.
12. Dankwort C. W., Weidlich R., Guenther B., Blaurock J. E. (2004) Engineers' CAx Education – It's Not Only CAD. *Computer-Aided Design*. 36 (14), 1439–1450. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.02.011>.

Received: 23 April 2025

Accepted: 27 June 2025

Available on the website: 10 October 2025

Вклад авторов

Ким Т. Ю. описала теоретические основы технологии создания цифровых двойников, выполнила программную реализацию технологии создания цифровых двойников с возможностью адаптивного управления, провела вычислительные эксперименты, проанализировала полученные результаты, подготовила рукопись статьи.

Прокопович Г. А. предложил концепцию технологии создания цифровых двойников, предоставил экспертные рекомендации по параллельному манипулятору, поделился практическим опытом в области управления динамическими системами.

Authors' contribution

Kim T. Yu. described the theoretical foundations of the technology for creating digital twins, implemented a software solution for the technology with adaptive control capabilities, conducted computational experiments, analyzed the obtained results, prepared the manuscript of the article.

Prakapovich G. A. proposed a concept for the technology of creating digital twins, provided expert recommendations on a parallel manipulator, and shared practical experience in the field of managing dynamic systems.

Сведения об авторах

Ким Т. Ю., мл. науч. сотр. лаб. робототехнических систем № 116, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

Прокопович Г. А., канд. техн. наук, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
Минск, ул. Сурганова, 6
Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 17 270-31-75
E-mail: tatyana_kim92@mail.ru
Ким Татьяна Юрьевна

Information about the authors

Kim T. Yu., Junior Researcher of the Laboratory of Robotic Systems No 116, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Prakapovich R. A., Cand. Sci. (Tech.), The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Surganova St., 6
The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 17 270-31-75
E-mail: tatyana_kim92@mail.ru
Kim Tatyana Yuryevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-54-65>

УДК 004.942

АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА ВНЕДРЕНИЯ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ И ИХ ИНТЕГРАЦИЯ С ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

И. В. БАРАНОВСКИЙ, И. В. ТИМОШКЕВИЧ

*Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Проведен анализ мировых практик внедрения технологий информационного моделирования зданий (BIM) с акцентом на их взаимодействие с телекоммуникационными системами. Рассмотрены этапы реализации BIM – от формирования базовой модели до комплексного анализа данных, а также роль облачных технологий и современных каналов связи. Особое внимание уделено опыту в области BIM стран-лидеров, включая Великобританию, Германию, Сингапур и США. Проанализированы барьеры, препятствующие широкому внедрению технологии, такие как стандартизация процессов и подготовка кадров. Отмечены возможности адаптации международного опыта для условий Республики Беларусь, включая перспективы повышения уровня диспетчеризации и эффективности эксплуатации объектов. Проанализирован мировой опыт и выявлены особенности применения BIM-технологий в мировой практике и в условиях Республики Беларусь для увеличения диспетчеризации и телекоммуникаций. Исследованы этапы внедрения технологии информационного моделирования зданий на основе мирового опыта, а также возможность интеграции BIM-технологий с телекоммуникационными системами.

Ключевые слова: информационная модель зданий, жизненный цикл объекта, эксплуатация, трехмерная модель, моделирование зданий, телекоммуникация, диспетчеризация, уровни зрелости BIM.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Барановский, И. В. Анализ мирового опыта внедрения BIM-технологий и их интеграция с телекоммуникационными системами: перспективы для Республики Беларусь / И. В. Барановский, И. В. Тимошкевич // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 54–65. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-54-65>.

ANALYSIS OF GLOBAL EXPERIENCE IN IMPLEMENTING BIM TECHNOLOGIES AND THEIR INTEGRATION WITH TELECOMMUNICATION SYSTEMS: PROSPECTS FOR THE REPUBLIC OF BELARUS

IVAN V. BARANOVSKY, IVAN V. TSIMASHKEVICH

*Institute of Housing and Public Utilities of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The article analyzes global practices of implementing building information modeling (BIM) technologies with an emphasis on their interaction with telecommunication systems. The article considers the stages of BIM implementation – from the formation of a basic model to complex data analysis, as well as the role of cloud technologies and modern communication channels. Particular attention is paid to the experience of leading countries in the field of BIM, including the UK, Germany, Singapore and the USA. Barriers to widespread implementation of the technology, such as process standardization and personnel training, are analyzed. The possibilities for adapting international experience to the conditions of the Republic of Belarus are noted, including prospects for increasing the level of dispatching and the efficiency of facility operation. The article analyzes global experience and identifies the features of using BIM technologies in global practice and in the Republic of Belarus to in-

crease dispatching and telecommunications. The stages of implementing building information modeling technology based on global experience, as well as the possibility of integrating BIM technologies with telecommunication systems, are studied.

Keywords: building information model, object lifecycle, operation, three-dimensional model, building modeling, telecommunications, dispatching, BIM maturity levels.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Baranovsky I. V., Tsimashkevich I. V. (2025) Analysis of Global Experience in Implementing BIM Technologies and Their Integration with Telecommunication Systems: Prospects for the Republic of Belarus. *Digital Transformation*. 31 (3), 54–65. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-54-65> (in Russian).

Введение

Существует большое количество определений BIM-технологии. Одно из них гласит, что BIM (англ. Building Information Modeling) – это подход (метод) к построению процессов, связанных с жизненным циклом объекта строительства, при котором решения принимаются на основе общего цифрового представления физических и функциональных характеристик объекта [1]. Данная технология повышает уровень диспетчеризации и коммуникации при эксплуатации зданий.

Цифровой двойник здания предполагает сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей информации о здании со всеми ее взаимосвязями и зависимостями. При этом здание и все, что имеет к нему отношение, рассматриваются как единый цифровой двойник. Информационное моделирование зданий позволяет создавать 7D цифровые модели зданий (объектов). Важно то, что основные удобства таких моделей заключаются в возможности их корректировки в онлайн-режиме, т. е. такие модели являются динамичными. При изменении любого параметра объекта автоматически корректируются все связанные элементы, например, чертежи, дизайн, календарный график, расположение проводки, трубопроводы водоотведения и водоснабжения. Такой подход значительно упрощает взаимодействие с моделью и повышает эффективность управления объектом.

Известные примеры применения информационного моделирования в Республике Беларусь:

- строительство жилого комплекса в Минске – использование информационного моделирования позволило сократить сроки строительства и затраты на материалы на 20 % [2] за счет автоматизации проектирования (учета материалов) и координации работ между подрядчиками;

- реконструкция исторического здания в Гродно – трехмерная модель помогла точно спланировать восстановительные работы, избежав ошибок и сохранив архитектурные особенности. Таких примеров много – Дворец культуры в Мозыре, дворцово-парковый комплекс в Ружанах, Свято-Духов кафедральный собор в Минске, Шуховская башня в Борисове и др.;

- строительство энергоэффективного дома в Могилеве – использовались цифровые двойники для моделирования систем отопления и вентиляции. Известно, что это позволило снизить энергопотребление на 30 % [3, 4].

Эти примеры демонстрируют, как информационное моделирование не только ускоряет процесс строительства, но и повышает качество и долговечность объектов.

Цель исследований авторов статьи – выявление особенностей применения BIM-технологий в мировой практике и реализация существующего опыта для условий Республики Беларусь. При этом изучались как мировой опыт внедрения цифровых технологий, так и этапы осуществления BIM-технологий. Были проанализированы мировые практики применения схемы зрелости BIM-моделирования, повышения диспетчеризации эксплуатируемого здания.

Основные этапы внедрения информационного моделирования

На каждом этапе выполнения информационного моделирования происходит решение конкретной задачи. Рассмотрим все этапы внедрения.

На первом этапе осуществляется создание цифровой модели проекта с использованием специализированного программного обеспечения для работы с трехмерными объектами. В зависимости от специфики задачи подбираются соответствующие инструменты. Например, для проектирования металлических конструкций оптимальным выбором будет Tekla Structures, а при разработке железобетонных конструкций – Autodesk Revit. Архитектурные бюро, занимаю-

щиеся частным строительством и небольшими объектами, могут отдать предпочтение Graphisoft ArchiCAD. Выбор программного продукта определяется направленностью деятельности и функциональными возможностями программного обеспечения.

На втором этапе формируется детализированная плановая модель проекта. Этот процесс включает в себя перенос и адаптацию данных календарного графика, предварительно подготовленного в специализированном софте для планирования. Информация интегрируется в цифровую среду, где выполняются ее структурирование и настройка для дальнейшего использования в управлении проектом. Это позволяет упростить контроль над выполняемой работой каждого специалиста на объекте.

На третьем разрабатывается обновленная подлинная (аутентичная) модель, отражающая фактически выполненные строительные работы. В рамках этого процесса осуществляются регулярный сбор и документирование данных о ходе строительства за конкретные временные периоды с последующим внесением полученной информации в цифровую среду для актуализации проекта.

На четвертом этапе эксперт вносит необходимые данные в цифровую модель, дополняя ее актуальной информацией. После проведения фотофиксации выполненных работ собранные материалы передаются и обрабатываются на портативном компьютере для дальнейшего анализа и корректировки модели.

Пятым шагом является формирование комплексной модели проекта. Все три модели – начальная, плановая и фактическая (аутентичная) – объединяются в одну. При этом каждый объектный элемент располагает определенной информацией о материалах, сроках выполнения работ и о фактическом выполнении объема работ.

Завершающий этап предполагает структурирование и детальный анализ собранных данных. Определяя процентное соотношение запланированных и реально выполненных объемов, специалисты вносят актуализированные сведения в календарный график. Такой подход позволяет не только проанализировать ход выполнения работ, но и оценить текущее состояние строительного объекта, выявить возможные отклонения и скорректировать дальнейшие действия.

Следует подчеркнуть, что благодаря телекоммуникационным системам, «пронизывающим» окружающее нас пространство, мониторинг объемов информации через короткие, строго фиксированные временные интервалы (например, раз в неделю) дает возможность проводить обширный анализ статистических данных [5]. Системы связи позволяют передавать информацию и обмениваться любыми сведениями, используя различные каналы связи, как проводные, так и беспроводные. Информационная модель может быть создана в облачном хранилище, и все, кто имеет доступ к модели, находясь в любой точке мира, могут использовать эту информацию и наполнять модель данными.

Анализ мирового опыта внедрения BIM-технологий

Технология BIM начала внедряться в строительную отрасль в конце прошлого десятилетия. Это было обусловлено стремительным развитием информационных технологий, развитием сетей и телекоммуникаций, а также использованием компьютеров в качестве вспомогательного инструмента в различных областях человеческой деятельности. Однако консерватизм, низкая конкурентоспособность, нехватка квалифицированных кадров и высокая стоимость инноваций стали препятствиями для дальнейшего использования BIM-технологий в строительстве [6]. На трудности в этой области повлияли вопросы, связанные с документооборотом, национальными нормативными стандартами и отсутствием проектной базы.

Самый ранний опыт применения информационных моделей при строительстве был отмечен в Великобритании. Уже с 2007 г. в стране приняты официальные стандарты BIM. По данным статистики, около 70 % компаний в строительной отрасли применяют информационное моделирование для возведения жилых зданий.

Анализ уровня внедрения технологии информационного моделирования в строительных секторах десяти стран, включая Англию, Францию, США, Германию, Австрию, Польшу, Хорватию, Россию, Сингапур и Нидерланды, показал, что Великобритания лидирует по степени распространения BIM. Впервые эта технология была использована еще в 1980-х годах при реконструкции лондонского аэропорта «Хитроу». С 2007 г. в Великобритании официально введены стандарты BIM; согласно статистическим данным, 73 % строительных компаний осведомлены о технологии и активно ее применяют. На территории Республики Беларусь этот показатель равен 20 %, слабо

развито законодательство, направленное на обязательное внедрение информационного моделирования в строительную и эксплуатационную отрасли. Более того, начиная с 2016 г., использование BIM как минимум второго уровня стало обязательным требованием для всех государственных строительных контрактов, а также настоятельно рекомендуется для частных проектов.

Сравнительный анализ уровня внедрения BIM-технологий в строительной отрасли различных стран демонстрирует значительные различия в подходах и масштабах применения.

Хорватия сталкивается с наибольшими сложностями при внедрении BIM. Около четверти проектировщиков продолжают работать на нулевом уровне, используя исключительно двумерные CAD-чертежи. Проекты, реализуемые на первом уровне, встречаются крайне редко. Основное препятствие заключается в том, что заказчики пока не осознают экономическую выгоду от внедрения BIM.

Австрия с 2018 г. сделала BIM обязательным условием для проектирования общественных зданий, что позволило усилить контроль над бюджетом строительства. Такое условие является очень полезным, и его необходимо сделать обязательным и в нашем государстве. В стране разработаны передовые стандарты BIM, охватывающие все уровни технологии, однако на законодательном уровне их применение не закреплено. Внедрение BIM остается преимущественно прерогативой крупных объектов государственного значения, тогда как среди средних и малых строительных компаний его используют лишь 20 %.

Германия демонстрирует более высокий уровень адаптации BIM – около 70 % строительных компаний уже применяют эту технологию, причем 70–80 % из них ограничиваются этапом проектирования. В стране наиболее распространен второй уровень BIM, хотя и первый остается актуальным. Министерство транспорта и цифровой инфраструктуры (BMVI) запустило программу финансовой поддержки малых и средних предприятий для перехода на цифровое моделирование, а также инициировало пилотные проекты для поиска наиболее эффективных путей адаптации BIM [7].

Польша демонстрирует умеренный темп внедрения BIM. Примерно 20 % архитектурных и строительных компаний уже используют данную технологию в своих проектах. При этом 38 % специалистов хотя бы раз сталкивались с методологией BIM. В стране преобладает первый уровень BIM, но наблюдается переход к более продвинутому второму уровню.

Франция активно внедряет BIM в строительную отрасль. Около 35 % девелоперов, совмещающих функции инвесторов, проектировщиков и застройщиков, используют эту технологию. 50–60 % крупнейших строительных компаний уже интегрировали BIM в свою деятельность, а в 30 % конструкторских бюро работают BIM-менеджеры. Второй уровень BIM является наиболее распространенным. Однако отсутствие государственных стандартов и нормативных актов, а также разрозненность программных решений создают сложности в унификации процессов.

США ввели обязательное применение BIM в государственных проектах еще в 2008 г. Несмотря на отсутствие единого национального стандарта, разработка нормативной базы продолжается. Финансирование BIM-проектов осуществляется косвенно через правительственные программы с акцентом на объекты общественного назначения. Основными инициаторами развития технологии являются государственные учреждения.

Сингапур (город-государство) – один из лидеров использования BIM не только в Юго-Восточной Азии, но и в мире. Этому способствует то обстоятельство, что в Сингапуре раньше других поняли потенциал технологии информационного моделирования зданий, даже раньше появления самого термина BIM. А затем была смелая, хорошо продуманная и экономически поддержанная государственная политика по внедрению BIM. Управление строительной индустрией Сингапура осуществляет организация BCA (Building and Construction Authority). Это фактическое Министерство строительства не просто управляет, но и является инициативным генератором идей и подходов в освоении новых технологий, в том числе BIM. Одной из несомненных заслуг Сингапура, облегчающих переход на BIM и достойных повторения в других странах, является создание интернет-портала «BIM-справочник по Сингапуру» (Building Information Modeling in Singapore). Также существует специальный Фонд строительной продуктивности и способности (Construction Productivity and Capability Fund, CPCF), созданный в 2010 г. Любая организация, внедряющая у себя BIM, может в него обратиться и получить компенсацию в размере до 50 % расходов на закупку компьютеров и программ, обучение персонала и консультационные услуги, повысить уровень диспетчеризации на 20 % [8].

В Нидерландах нет правительственных указов, разработка стандарта BIM выставлена на тендер, финансирование производится косвенно через правительственные проекты. Первоначальный акцент – на частных зданиях, общественные проекты нацелены на инфраструктуру [9].

Россия за последние годы продемонстрировала значительное продвижение в области BIM. Если в 2020-м только 7 % строительных компаний применяли BIM, то к марту 2021-го этот показатель увеличился до 12 %. В стране преобладает первый уровень BIM, однако все больше проектов переходят на второй. Для возведения крупных спортивных объектов и сложных коммерческих сооружений уже применяется третий уровень BIM, сопровождаемый государственной финансовой поддержкой. Среди исследованных стран Россия выделяется наиболее активной политикой по стандартизации и обязательному внедрению BIM, а также значительным количеством принятых законодательных актов, направленных на цифровизацию строительной отрасли. Также данная политика дает расширенную возможность во внедрении электронной паспортизации зданий на государственном уровне, чего не хватает Республике Беларусь.

Значимость BIM: ключ к инновациям в строительной индустрии

Цифровая модель является революционной технологией, которая меняет подход к проектированию, строительству и управлению объектами. Значимость этой технологии выражается в следующих аспектах:

1) улучшение проектного процесса. BIM объединяет все этапы проектирования в единую цифровую среду, что обеспечивает:

- точность проектирования за счет моделирования сложных конструкций и их анализа;
- минимизацию ошибок благодаря проверке совместимости различных элементов проекта на ранних стадиях;

2) эффективность в управлении ресурсами. BIM предоставляет точные данные о необходимом количестве материалов, сроках и стоимости, что:

- оптимизирует затраты на строительство;
- уменьшает отходы и перерасход ресурсов, что соответствует принципам устойчивого строительства;

3) повышение скорости и качества строительства. Использование BIM позволяет синхронизировать действия всех участников процесса: архитекторов, проектировщиков, подрядчиков. Пример: на основе данных BIM можно составить точный календарный график, который значительно снижает риск простоев;

4) прозрачность и контроль процессов. Включение аутентичной модели (регулярное обновление данных о ходе строительства) обеспечивает:

- мониторинг выполнения работ в реальном времени;
- оперативное внесение изменений при обнаружении отклонений от плана;

5) повышение конкурентоспособности. Компании, активно использующие BIM, получают стратегическое преимущество:

- привлечение крупных заказчиков, предпочитающих работать с современными технологиями;
- соответствие международным стандартам, что открывает доступ к зарубежным проектам;

6) поддержка государственных инициатив в ряде стран (например, в Великобритании, Германии, Сингапуре), где внедрение BIM обязательно для государственных объектов, что:

- стимулирует развитие технологий в строительной отрасли;
- обеспечивает долгосрочное планирование и контроль за расходованием бюджетных средств;

7) снижение экологической нагрузки. BIM позволяет заранее моделировать экологические аспекты проектов:

- выбор энергоэффективных материалов;
- планирование минимального воздействия на окружающую среду.

В телекоммуникациях BIM может использоваться для создания моделей сетей, которые помогают понять, как данные передаются между различными устройствами. Это может включать в себя моделирование маршрутизации, коммутации, IoT-технологии и других аспектов сети. Также может использоваться для создания моделей систем управления, которые помогают управлять телекоммуникационными сетями. Это может включать в себя моделирование управления трафиком, управления ресурсами и других аспектов системы управления. Кроме того, BIM может

применяться для создания моделей приложений, которые работают на телекоммуникационных сетях: голосовые вызовы, видеоконференции и др.

Уровни BIM-зрелости

Сроки обязательного использования BIM-технологии на объектах капитального строительства в России неоднократно изменялись и уточнялись. Однако постановление Правительства от 5 марта 2021 г. № 331 закрепило положение, что с 1 марта 2022-го применение BIM становится обязательным для объектов, чье строительство финансируется из бюджета любого уровня – муниципального, регионального или федерального [10]. Диаграмма уровней зрелости BIM, созданная Mark Bew и Mervyn Rechards [11], переведена на русский и представлена на рис. 1.

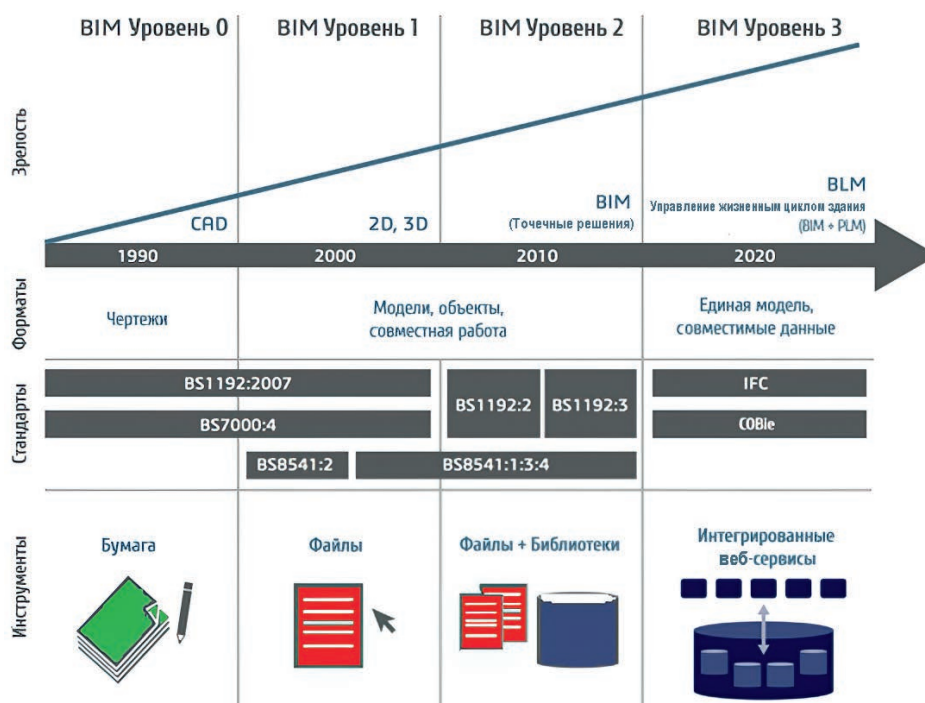


Рис. 1. Уровни зрелости BIM-моделирования
Fig. 1. Maturity levels of BIM modeling

В концепции BIM выделяют четыре уровня развития – от нулевого до третьего, которые отражают степень сложности используемой системы. Начальный уровень подразумевает работу с базовыми чертежами в CAD, тогда как наивысший уровень представляет собой комплексную интеграцию всех компонентов проекта в единую цифровую среду, обеспечивая полный контроль и взаимодействие на всех этапах жизненного цикла объекта.

Уровень 0: начальный (Ad Hoc)

- Описание: отсутствие формализованного подхода к моделированию. Использование 2D-чертежей и бумажных документов.

- Характеристики:

- нет взаимодействия между участниками проекта;
- обмен информацией в форме файлов CAD.

Уровень 1: частичный BIM (Managed)

- Описание: введение отдельных аспектов BIM, таких как 3D-моделирование или управление документацией.

- Характеристики:

- использование стандартных элементов, но без интеграции данных;
- ограниченное использование совместной работы через файлообменные сервисы.

Уровень 2: совместный BIM (Collaborative)

- Описание: полноценное внедрение BIM в процессы проектирования, строительства и эксплуатации.

- Характеристики:

- создание отдельных моделей для разных дисциплин, но с общими данными;
- использование общих файлов данных (COBie) для управления жизненным циклом здания;
- обязательное использование стандартов, таких как ISO 19650.

Уровень 3: интегрированный BIM (Integrated)

- Описание: полная интеграция данных и моделей в единую платформу, доступную для всех участников проекта в реальном времени.

- Характеристики:

- использование одной совместной модели, где все данные о проекте хранятся и обновляются централизованно;
- реальное время совместной работы и автоматизированное управление версиями;
- применение IoT и других технологий для мониторинга и управления объектом на протяжении всего жизненного цикла;
- стандартизация данных согласно глобальным стандартам, таким как IFC (Industry Foundation Classes), для обеспечения интероперабельности.

Уровень 4: интеллектуальный BIM (Intelligent)

- Описание: BIM становится не просто инструментом, но и интеллектуальной системой, которая самостоятельно анализирует, предсказывает и оптимизирует процессы.

- Характеристики:

- интеграция с искусственным интеллектом для автоматического анализа данных и предоставления рекомендаций по улучшению проекта, строительства и эксплуатации;
- использование машинного обучения для прогнозирования потенциальных проблем и оптимизации ресурсов;
- автономное управление энергопотреблением, безопасностью и техническим обслуживанием на основе данных, собранных в реальном времени;
- развитие цифровых двойников зданий, которые не только отражают текущее состояние, но и моделируют будущие сценарии.

Уровень 5: экосистемный BIM (Ecosystemic)

- Описание: BIM выходит за рамки отдельных проектов, становится частью городских и региональных экосистем.

- Характеристики:

- интеграция с умными городами и системами управления территориями для оптимизации городского планирования и развития;
- обмен данными между различными проектами и системами для создания эффективной инфраструктуры;
- использование BIM-данных для глобального мониторинга экологического воздействия, управления ресурсами и устойчивого развития;
- поддержка циркулярной экономики через отслеживание жизненного цикла материалов и продуктов в строительной отрасли.

Эти уровни представляют эволюцию от простого использования BIM как инструмента до его интеграции в более широкий контекст управления и развития окружающей среды. Понятия «Уровень 4» и «Уровень 5» в контексте зрелости BIM-моделирования не являются широко признанными или официально установленными в международных стандартах или руководствах, таких как ISO 19650 или BIM Level of Maturity от UK Government. Традиционно, как упоминалось ранее, уровни BIM зрелости варьируются от 0 до 3, где:

Уровень 0 – отсутствие BIM, использование 2D CAD;

Уровень 1 – частичное использование BIM с отдельными 3D-моделями;

Уровень 2 – совместная работа с отдельными моделями, но с общим стандартом обмена данными. На данном уровне подключаются дополнительные параметры, такие как время и стоимость (4D и 5D), они и раскрывают эффективность информационной модели;

Уровень 3 – полная интеграция в одну модель, доступную для всех участников проекта.

Таким образом, если говорить об Уровнях 4 и 5 как о концепции (экосистемный BIM), они не существуют в официальных стандартах на момент 2024 г. [12]. Теоретически это обсуждается в последние несколько лет, особенно с развитием технологий в 2020-х годах, что указывает на возможное появление этой идеи в дискурсах около 5–10 лет назад, но без конкретной «даты рождения». Упоминания об уровнях, выше 3, как Уровни 4 или 5, часто относятся к теоретичес-

ким или будущим концепциям, где BIM интегрируется с элементами умного города, IoT, большими данными и т. д. Эти уровни обсуждаются в академических или исследовательских кругах, но не имеют официального статуса или широко принятых определений. Поэтому стоит расписать уровни зрелости по ISO 19650, который широко применяется по всему миру, а его наработки используются и на территории Республики Беларусь.

Уровень 0 по ISO 19650

- Описание: отсутствие формализованного подхода к BIM. Используются традиционные методы проектирования и строительства.

- Характеристики:

- 2D CAD: проекты создаются с использованием двумерного черчения;
- бумажные документы: обмен информацией происходит через бумажные чертежи и документы;
- отсутствие совместной работы: нет структурированного взаимодействия между участниками проекта через цифровые средства.

Уровень 1 по ISO 19650

- Описание: введение отдельных элементов BIM, но без полной интеграции.

- Характеристики:

- 3D-моделирование: включает использование 3D-моделей для отдельных дисциплин (архитектура, инженерия, строительство);
- управление документами: использование стандартизированных файлов для обмена информацией, но без интеграции данных;
- файлообменные сервисы: информация может обмениваться через файлообменные платформы, но нет единого центра управления данными;
- частичная координация: координация между различными дисциплинами остается на базовом уровне.

Уровень 2 по ISO 19650

- Описание: внедрение полноценного BIM на уровне отдельных проектов с акцентом на совместную работу.

- Характеристики:

- совместные модели: создание отдельных моделей для разных дисциплин, но с общими стандартами данных (например, COBie);
- управление информацией: использование общих данных для управления жизненным циклом здания, что требует стандартов, таких как ISO 19650;
- централизованное хранение данных: введение CDE для хранения и обмена данными, но модели все еще могут быть отдельными;
- совместная работа: улучшение координации между участниками проекта через совместное использование моделей и данных;
- мониторинг и контроль: более эффективное управление качеством, рисками и временными рамками проекта благодаря лучшей доступности информации.

Уровень 3 по ISO 19650

- Описание: полная интеграция данных и моделей в единую платформу для всех участников проекта в реальном времени.

- Характеристики:

- единая модель: все данные проектирования, строительства и эксплуатации интегрированы в одну общую модель, доступную для всех;
- реальное время совместной работы: изменения в модели отражаются немедленно для всех участников, что улучшает координацию и снижает ошибки;
- централизованное управление данными: использование CDE для централизованного хранения, доступа и управления всеми данными проекта;
- автоматизация и оптимизация: автоматизация процессов проверки, координации, расчетов стоимости, планирования и управления строительством;
- управление жизненным циклом: информация в модели используется на всех этапах жизненного цикла объекта: от проектирования до демонтажа;
- совместимость с другими системами: интеграция с ERP и другими системами управления для полного цикла управления ресурсами и операциями;

– управление рисками и качеством: улучшенная возможность анализа данных для выявления рисков, оптимизации качества и безопасности.

Работу с файлами IFC поддерживают такие программы, как Graphisoft Archi CAD, Autodesk Auto CAD, FreeCAD и др. [13]. Сегодня концепция BIM 4D стала модным трендом. Это соответствует использованию данных BIM для анализа сроков, что позволяет визуализировать последовательность строительных работ в онлайн-режиме. Далее появляется возможность работать в 5D, что дает возможность управлять затратами на основе BIM-модели, интегрируя в нее информацию о стоимости. И, наконец, 6D – когда BIM-модель становится основой для управления активами и обслуживания зданий, что обеспечивает оптимизированное использование и поддержание инфраструктуры на протяжении всего ее жизненного цикла. Данную концепцию можно увидеть на рис. 2.

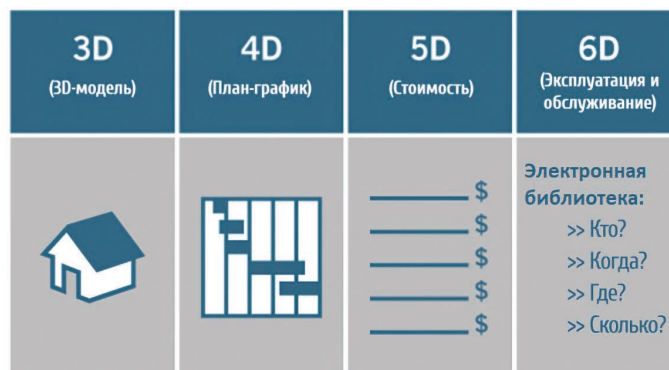


Рис. 2. Виды BIM-моделей

Fig. 2. Types of BIM models

Преимущества и сложности внедрения BIM-технологии

Для успешного внедрения BIM-технологий ключевым фактором является активная и стратегически выверенная государственная политика, которая не только поддерживает, но и инициирует инновационные подходы в освоении новых технологий. Государство должно принимать ключевую роль, стимулируя развитие BIM через комплекс мер, включающих технологические стандарты (такие, как высокоскоростной интернет и доступ к данным), нормативно-правовую базу, финансовые стимулы, образовательные программы, маркетинговые кампании, реализацию пилотных проектов и поощрение передовых практик.

Программные решения, используемые в BIM, охватывают все этапы жизненного цикла объекта – от проектирования и строительства до эксплуатации. Они обеспечивают взаимодействие всех участников процесса, включая заказчиков, проектировщиков, строителей и управляющие компании. Такой подход позволяет повысить эффективность работы, минимизировать ошибки и оптимизировать затраты на всех этапах реализации проекта. Успешное внедрение BIM требует не только технологической базы, но и системного подхода, включающего поддержку со стороны государства, развитие инфраструктуры и вовлечение всех заинтересованных сторон.

BIM представляет собой обзор дизайна и оптимизации строительства. Более того, совместное использование моделей обеспечивает полное понимание макета владельцем (конечным пользователем) и выполнение всех его запросов. В настоящее время BIM-технология продолжает внедряться в строительную сферу России и Беларуси, но в нашей республике пока что она более развита только в области архитектурной застройки. Технология является необходимым инструментом для интеграции трехмерных моделей и предотвращения пространственных конфликтов при строительстве зданий. Анализ показал, что немногие страны разработали план финансового стимулирования через выделенные фонды BIM. Необходимо подчеркнуть, что во всех государствах с развитым информационным моделированием BIM возглавляется правительственными инициативами.

Анализ современных практик внедрения BIM-технологий выявил, что лишь ограниченное число стран реализовало программы финансового стимулирования, такие как создание специализированных фондов для поддержки BIM. При этом важно отметить, что в государствах с высоким уровнем развития информационного моделирования ключевую роль играют именно го-

сударственные инициативы. Правительства этих стран активно продвигают BIM, разрабатывая стратегии, нормативные акты и программы поддержки, что способствует ускоренному внедрению технологий в строительную отрасль. Таким образом, успешное развитие BIM невозможно без активного участия государства, которое выступает основным драйвером изменений, обеспечивая как финансовую, так и нормативную поддержку.

Сегодня психологический барьер пройден, мы переживаем третий этап эволюции. Так, ОАО «Институт Белгоспроект» ставит своей целью уже в 2025 г. перейти исключительно на проектирование с использованием BIM-технологий, а также активно способствовать развитию цифрового строительства в Беларуси [14]. Основные преимущества и сложности внедрения информационного моделирования таковы:

- преимущества:
 - ускорение проектирования и строительства;
 - снижение рисков за счет точного планирования;
 - возможность интеграции данных в реальном времени;
- сложности:
 - высокая стоимость внедрения;
 - недостаток квалифицированных специалистов;
 - проблемы стандартизации и форматов обмена данными.

Заключение

1. В целом информационное моделирование может быть очень полезным инструментом для понимания и управления телекоммуникационными системами. Оно позволяет создавать модели, которые помогают понять, как работает система и как ее можно улучшить. В процессе выполнения аналитического обзора мировых практик использования, внедрения BIM-технологий в ЖКХ-объектах выявлено, что мировыми лидерами в данной сфере являются Сингапур, Англия, США и Россия. Этому способствует тот факт, что BIM финансируется за счет государства, и в данных странах широко распространено обучение в этом направлении.

2. Плюсы эволюции BIM очевидны и объясняются способностью единой динамичной управляемой виртуальной модели охватывать все стадии проектирования, включая создание визуальных образов, выявление перекрытий в пространстве, автоматизированное цифровое производство, стратегическое планирование строительных фаз, проектирование телекоммуникационных систем в модели и мн. др. Эта модель доступна для совместного использования и модификации всеми участниками стройки: от создателей архитектурных концепций и технических консультантов до исполнителей работ и инвесторов. Наличие цифровых моделей на гаджетах ускоряет процесс осуществления экспертизы проектов и выдачи разрешений на строительство, модернизацию и реконструкцию строительных объектов, а также позволяет оперативно принимать решения в ходе авторского надзора.

3. Результаты исследования показывают, что в строительной отрасли России BIM-технологии внедряются пока не так широко, как могли бы, однако РФ демонстрирует одни из самых прогрессивных государственных инициатив по ускорению их принятия среди всех проанализированных стран. В Беларуси есть ряд проблем, которые являются преградой для развития и использования BIM-технологий в сфере строительства, – это отсутствие достаточного количества кадров, финансирования, необходимой техники и программного обеспечения.

Список литературы

1. Моделирование процессов эксплуатации, технического обслуживания, ремонта жилых зданий. Методологическое сопровождение эксплуатации жилищного фонда на принципах информационного моделирования зданий для снижения эксплуатационных затрат и повышения уровня диспетчеризации: отчет о НИР (промежуточный, этап 2, подэтап 2.2) / Ин-т жилищ.-коммун. хоз-ва НАН Беларуси. Минск, 2022. № ГР 20210656.
2. «ТЕХНОСТРОЙ–XXI век» до 20 % сократил расходы на материалы от стоимости объекта благодаря автоматизации учета материалов с БИТ.СТРОИТЕЛЬСТВО [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.lcbt.ru/blog/business-cases/tekhnostroy-xxi-vek-do-20-sokratil-raskhody-na-materialy-ot-stoimosti-obekta-blagodarya-avtomatizatsii-ucheta-materialov-s-bit-stroitelstvo/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F. Дата доступа: 15.05.2025.

3. Журнал «Энергоэффективность», октябрь 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.energoeffect.gov.by/downloads/publishing/archive_journal/2021/En_10_2021.pdf?utm_source=chatgpt.comhttps://www.energoeffect.gov.by/downloads/publishing/archive_journal/2021/En_10_2021.pdf?utm_source=chatgpt.com. Дата доступа: 15.05.2025.
4. Департамент по энергоэффективности. В Могилеве завершается строительство электродома [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://energoeffect.gov.by/news/news_2020/20200608_news1?utm_source=chatgpt.com. Дата доступа: 15.05.2025.
5. Мамаев, А. Е. Методика мониторинга календарного графика строительства на основе BIM технологии / А. Е. Мамаев // Фундаментальные исследования. 2017. № 8–2. С. 270–275.
6. BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры [Электронный ресурс] // Матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. Режим доступа: https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyuzvm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC_2023.pdf. Дата доступа: 26.10.2022.
7. Состояние внедрения BIM в 2021 году: сравнение 7 стран [Электронный ресурс] // Журнал ИКС. Режим доступа: <https://www.iksmedia.ru/news/5847181-Sostoyanie-vnedreniya-BIM-v-2021.html>. Дата доступа: 11.11.2022.
8. Внедрение BIM: впечатляющий опыт Сингапура [Электронный ресурс] // Портал для специалистов архитектурно-строительной отрасли. Режим доступа: <https://ardexpert.ru/article/5160>. Дата доступа: 25.08.2023.
9. BIM Adoption BENELUX [Электронный ресурс] // bimspot. Режим доступа: <https://www.bimspot.io/blogs/bim-adoption-benelux/>. Дата доступа: 24.08.2023.
10. Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства: постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331 [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573842519>. Дата доступа: 02.11.2024.
11. Research Gate. Search for Publications, Researches, or Questions [Electronic Resource]. Mode of access: https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-Building-Information-Modeling-Maturity-Levels-The-image-is-re-diagramed_fig2_282650955. Date of access: 04.11.2024.
12. BIM Уровни [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://prorubim.com/ru/2015/07/bim-levels/>. Дата доступа: 07.11.2024.
13. Файл с расширением .ifc [Электронный ресурс] / Интернет портал openfile. Режим доступа: <https://open-file.ru/types/ifc>. Дата доступа: 05.11.2024.
14. Первое в Беларуси BIM-мероприятие состоялось в Минске [Электронный ресурс] // Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Режим доступа: http://mas.gov.by/ru/news_ru/view/pervoe-v-belarusi-bim-meroprijatie-sostojalos-v-minske-1536/. Дата доступа: 16.11.2024.

Поступила 06.02.2025

Принята в печать 16.05.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

References

1. Baranovsky I. V. (2022) Modeling of Processes for Operation, Maintenance, and Repair of Residential Buildings. Methodological Support for Housing Fund Operation Based on the Principles of Building Information Modeling to Reduce Operating Costs and Increase the Level of Dispatching. *Interim R&D Report (Stage 2, Substage 2.2), Institute of Housing and Public Utilities of the National Academy of Sciences of Belarus*. Minsk, GR No 20210656 (in Russian).
2. “TEKHNOSTROY–XXI Vek” Reduced Material Costs by Up to 20 % of the Project’s Total Cost Through Automated Material Accounting with BIT.STROITELSTVO. Available: https://www.1cbit.ru/blog/business-cases/tekhnostroy-xxi-vek-do-20-sokratil-raskhody-na-materialy-ot-stoimosti-obekta-blagodarya-avtomatizatsii-ucheta-materialov-s-bit-stroitelstvo/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (Accessed 15 May 2025) (in Russian).
3. *Energy Efficiency Magazine, October 2021*. Available: https://www.energoeffect.gov.by/downloads/publishing/archive_journal/2021/En_10_2021.pdf (Accessed 15 May 2025) (in Russian).
4. *Department of Energy Efficiency. Construction of an Electric House is Nearing Completion in Mogilev*. Available: https://energoeffect.gov.by/news/news_2020/20200608_news1 (Accessed 15 May 2025) (in Russian).
5. Mamaev A. E. (2017) Methodology for Monitoring the Construction Schedule Based on BIM Technology. *Fundamental Research*. (8–2), 270–275 (in Russian).
6. BIM in Construction & Architecture. *Proceedings of VI International Conference*. Available: https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/345/hndzmlrvxjyuzvm75r16pbs2w06m3hwa/BIMAC_2023.pdf. (Accessed 26 October 2022).

7. State of BIM Implementation in 2021: 7 Countries Compared. *IKS Media Journal*. Available: <https://www.iksmmedia.ru/news/5847181-Sostoyanie-vnedreniya-BIM-v-2021.html> (Accessed 11 November 2022) (in Russian).
8. BIM Implementation: Singapore's Impressive Experience. *Portal for Specialists in the Architectural and Construction Industry*. Available: <https://ardexpert.ru/article/5160> (Accessed 25 August 2023) (in Russian).
9. BIM Adoption in Benelux. *bimspot*. Available: <https://www.bimspot.io/blogs/bim-adoption-benelux/> (Accessed 24 August 2023).
10. On Establishing a Case in Which the Developer, Technical Customer, Person Providing or Preparing Investment Justification, and (or) Person Responsible for the Operation of a Capital Construction Project Ensure the Formation and Maintenance of an Information Model of a Capital Construction Project. *Resolution of the Government of the Russian Federation of 05.03.2021 No 331. Official Internet Portal of Legal Information*. Available: <https://docs.cntd.ru/document/573842519> (Accessed 2 November 2024) (in Russian).
11. *Research Gate. Search for Publications, Researches, or Questions*. Available: https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-Building-Information-Modeling-Maturity-Levels-The-image-is-re-diagramed_fig2_282650955 (Accessed 4 November 2024).
12. *BIM Levels*. Available: <http://prorubim.com/ru/2015/07/bim-levels/> (Accessed 7 November 2024) (in Russian).
13. File with extension .ifc. *Internet Portal Openfile*. Available: <https://open-file.ru/types/ifc> (Accessed 5 November 2024) (in Russian).
14. The First BIM Event in Belarus Took Place in Minsk. *Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus*. Available: http://mas.gov.by/ru/news_ru/view/pervoe-v-belarusi-bim-meroprijatie-sostojalos-v-minske-1536/ (Accessed 16 November 2024) (in Russian).

Received: 6 February 2025

Accepted: 16 May 2025

Available on the website: 10 October 2025

Вклад авторов

Барановский И. В. выполнил концептуализацию, написал текст введения и заключения.

Тимошкевич И. В. написал текст аннотации и основного раздела, проанализировал данные, оформил рукопись статьи.

Authors' contribution

Baranovsky I. V. carried out conceptualization, wrote the introduction and conclusion text.

Tsimashkevich I. V. wrote the text of the abstract and the main section, analyzed the data, and formatted the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Барановский И. В., канд. техн. наук, зам. дир. по науч. работе, Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси

Тимошкевич И. В., магистр экономики, асп. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; науч. сотр. Института жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси

Адрес для корреспонденции

220084, Республика Беларусь,
Минск, ул. Академика Купревича, 10, корп. 3
Институт жилищно-коммунального хозяйства
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 25 929-93-03
E-mail: tim6iv@gmail.com
Тимошкевич Иван Валерьевич

Information about the authors

Baranovsky I. V., Cand. Sci. (Tech.), Deputy Director for Scientific Work, Institute of Housing and Public Utilities of the National Academy of Sciences of Belarus

Tsimashkevich I. V., Master of Economics, Post-graduate at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; Researcher at the Institute of Housing and Public Utilities of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220084, Republic of Belarus,
Minsk, Academician Kuprevich St., 10, Body 3
Institute of Housing and Public Utilities
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 25 929-93-03
E-mail: tim6iv@gmail.com
Tsimashkevich Ivan Valerievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-66-75>

УДК 004.891.2

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ АВТОГЕНЕРАЦИИ ТЕСТОВ ДЛЯ СТУДЕНТОВ В СИСТЕМЕ MOODLE НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

К. С. КУРОЧКА, Ю. С. БАШАРИМОВ

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(Гомель, Республика Беларусь)*

Аннотация. Представлена система автоматизированной генерации тестовых заданий для студентов на основе анализа методических материалов с использованием больших языковых моделей (LLM). Разработана и опробована система, способная автоматически создавать качественные тестовые материалы, сокращая трудозатраты преподавателей и повышая эффективность контроля знаний студентов. Для достижения цели решались следующие задачи: разработка архитектуры системы, включающей модули предобработки текста, генерации вопросов, валидации и фильтрации, а также формирования итогового теста; исследование методов промптинга (точной и структурированной формулировки запросов, определяющих задачу для LLM) и дообучения LLM для генерации и оценки качества тестовых заданий; апробация системы в реальном учебном процессе и оценка ее эффективности. В результате исследования разработаны модульная система, использующая две LLM: основную для генерации вопросов и систему LLM-эксперта для оценки их качества. Показана эффективность методов настройки и дообучения для адаптации LLM к задачам автоматической генерации тестов.

Ключевые слова: большие языковые модели, автоматическая генерация вопросов, обработка естественного языка, промптинг, дообучение, Moodle, автоматизация оценки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Курочка, К. С. Нейросетевая модель автогенерации тестов для студентов в системе Moodle на основе анализа методических материалов / К. С. Курочка, Ю. С. Башаримов // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 66–75. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-66-75>.

NEURAL NETWORK MODEL FOR AUTOMATED TEST GENERATION FOR STUDENTS IN THE MOODLE SYSTEM BASED ON THE ANALYSIS OF METHODOLOGICAL MATERIALS

KONSTANTIN S. KUROCHKA, YURY S. BASHARYMAU

Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents a system for automated generating of test tasks for students based on the analysis of methodological materials using large language models (LLM). A system capable of automatically generating high-quality test materials has been developed and tested, reducing teachers' labor costs and increasing the efficiency of student knowledge monitoring. To achieve this goal, the following tasks were solved: developing a system architecture that includes modules for text preprocessing, question generation, validation and filtering, and forming a final test; studying the methods of prompting (precise and structured formulation of queries that define a task for LLM) and additional training of LLM for generating and assessing the quality of test items; testing the system in a real educational process and assessing its effectiveness. As a result of the study, a modular system has been developed that uses two LLMs: the main one for generating questions and the LLM expert system for assessing their quality. The effectiveness of the customization and additional training methods for adapting LLM to the tasks of automatic test generation is shown.

Keywords: large language models, automated question generation, natural language processing, prompting, fine-tuning, Moodle, automated assessment.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kurochka K. S., Basharymau Y. S. (2025) Neural Network Model for Automated Test Generation for Students in the Moodle System Based on the Analysis of Methodological Materials. *Digital Transformation*. 31 (3), 66–75. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-66-75> (in Russian).

Введение

В условиях современной образовательной парадигмы, характеризующейся интенсификацией учебного процесса и необходимостью оперативной оценки знаний обучающихся, особую актуальность приобретает проблема автоматизации создания тестовых материалов и контроля знаний обучающихся. Традиционные методы разработки тестовых заданий, как правило, отличаются трудоемкостью и требуют значительных временных затрат со стороны педагогических работников [1]. Согласно отчету UNESCO (2023)¹, 78 % вузов внедрили ИИ-инструменты для поддержки учебного процесса, а рынок EdTech к 2033 г. составит около 810,3 млрд долл. США по сравнению с 220,5 млрд долл. США в 2023-м, увеличившись в среднем на 13,9 % в течение прогнозируемого периода с 2024 по 2033 год².

В связи с этим перспективными направлениями исследований являются разработка и внедрение автоматизированных систем [2], способных генерировать тестовые вопросы по учебным материалам, проверять выполненные задания и формировать отзыв на ответ студента [3]. Один из наиболее эффективных подходов к решению данной задачи – использование технологий обработки естественного языка (Natural Language Processing, NLP) и, в частности, применение больших языковых моделей (Large Language Models, LLMs). LLM, обладая способностью к глубокому семантическому анализу текста и генерации связных и грамматически корректных высказываний, могут быть успешно использованы для автоматического создания тестовых вопросов различных типов: с множественным выбором, открытых вопросов, заданий на сопоставление и др.

Применение LLM для автоматизации создания тестов позволяет не только существенно сократить время и усилия, затрачиваемые на разработку контрольно-измерительных материалов, но и повысить их качество за счет возможности генерации большого количества разнообразных и релевантных вопросов. Более того, автоматизированные системы могут адаптировать сложность и содержание тестов к индивидуальным потребностям и уровню подготовки обучающихся, способствуя тем самым персонализации образовательного процесса [4].

Предлагаемая система автоматизированной генерации тестовых заданий построена по модульному принципу и включает в себя модули: предобработки текста методических материалов, выбора метода генерации, генерации вопросов с использованием основной LLM, валидации и фильтрации, в котором в качестве эксперта выступает другая LLM, формирования итогового теста и пользовательский интерфейс. Такая архитектура с использованием отдельной LLM в роли эксперта для оценки качества сгенерированных вопросов позволяет повысить объективность и надежность процесса автоматизированного создания тестов, а также гибко настраивать систему, выбирая наиболее подходящий метод генерации.

Архитектура системы автоматизированной генерации тестовых заданий

Для построения системы автоматизированной генерации тестовых заданий применим принцип декомпозиции с разбивкой сложной задачи создания качественного теста на несколько подзадач. Предлагаемая схема продемонстрирована на рис. 1.

На первом этапе LLM получает текстовый фрагмент из методических материалов (например, абзац) и инструкцию для создания вопроса. Эта инструкция определяет тип требуемого вопроса (например, вопрос с выбором одного ответа, открытый вопрос, вопрос на сопоставление), его уровень сложности и другие параметры. LLM, основываясь на предоставленной информации, формирует тестовый вопрос [3].

¹ 2023 Генеративный искусственный интеллект и будущее образования [Электронный ресурс] // Generative AI and the Future of Education, UNESCO. Mode of access: https://ai.gov.ru/knowledgebase/obrazovanie-i-kadry-ii/2023_generativnyy_iskusstvennyy_intellekt_i_budushee_obrazovaniya_generative_ai_and_the_future_of_education_unesco/?ysclid=m96my5fw2t680773960/. Date of access: 10.02.2025.

² EdTech Market Size, Share, Trends [Electronic Resource] // Market.us – One Stop Shop for Market Research Reports. Mode of access: <https://market.us/report/edtech-market/>. Date of access: 10.02.2025.

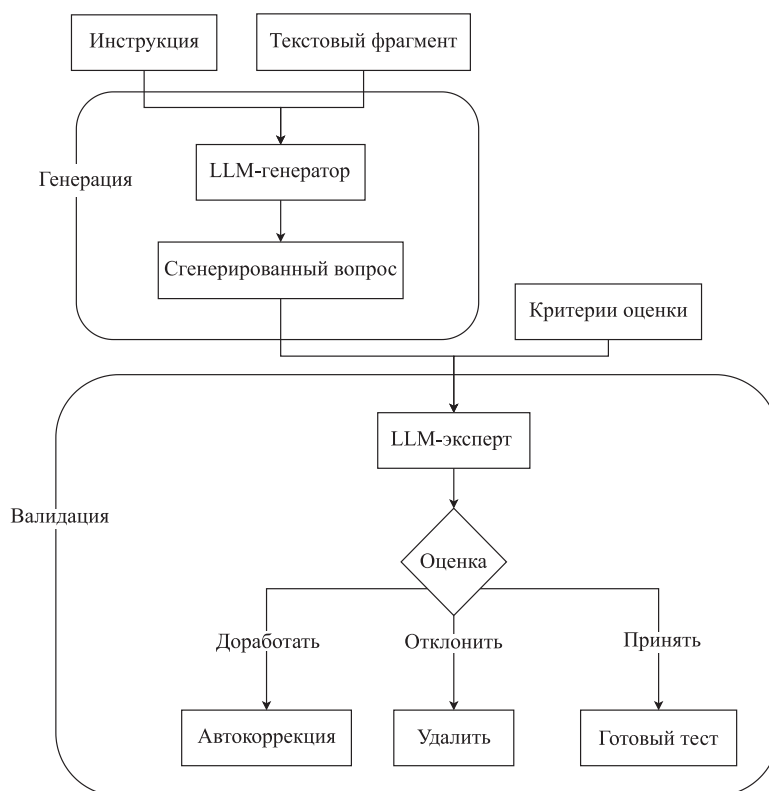


Рис. 1. Схема системы автоматизированной генерации тестовых заданий
Fig. 1. Scheme of the automated test generation system

Для каждого сгенерированного вопроса система также обрабатывает соответствующие ответы, что критически важно для дальнейшей автоматической оценки знаний. В зависимости от типа вопроса, этот процесс включает следующие:

- для вопросов с одиночным или множественным выбором: основная LLM не только формулирует сам вопрос, но и генерирует набор вариантов ответов. Среди них обязательно присутствует один или несколько правильных ответов (для вопросов с множественным выбором), а также несколько правдоподобных, но неверных вариантов, называемых дистракторами. Качество дистракторов (их правдоподобность и привлекательность, чтобы избежать легкого исключения) тоже является критерием оценки;

- для открытых вопросов: LLM генерирует ожидаемый или эталонный правильный ответ. Этот эталонный ответ используется в дальнейшем для сопоставления с ответами студентов, представленными в естественном языке;

- для вопросов на заполнение пропуска: система определяет правильное слово или фразу, которая должна быть вставлена в пропуск;

- для вопросов на сопоставление: LLM создает пары элементов (например, понятия и их определения) и указывает их правильное соответствие.

Далее для повышения качества предлагается использовать архитектуру с экспертом, где в роли эксперта выступает другая LLM (или та же, но в иной роли). LLM-эксперт получает не только сгенерированный вопрос, но и все связанные с ним варианты ответов, дистракторы или эталонные ответы. LLM-эксперт оценивает их качество, основываясь на таких критериях, как качество дистракторов (для вопросов с выбором ответа: правдоподобность и привлекательность неправильных вариантов) и наличие правильного ответа (для закрытых вопросов). Это обеспечивает объективность и надежность процесса автоматизированного создания тестов.

LLM-эксперт оценивает качество сгенерированных вопросов, основываясь на следующих критериях:

- релевантность (насколько вопрос соответствует заданной теме и исходному тексту);
- корректность (отсутствие фактических, логических и грамматических ошибок в формулировке вопроса);

- однозначность (отсутствие двусмысленности и нескольких возможных интерпретаций вопроса);
- сложность (соответствие вопроса заданному уровню);
- тип вопроса (соответствие вопроса указанному типу);
- качество дистракторов (для вопросов с выбором ответа: правдоподобность и привлекательность неправильных вариантов);
- наличие правильного ответа (для закрытых вопросов).

По результатам оценки LLM-эксперт выставляет оценку или дает заключение о качестве вопроса (например, «принять», «отклонить», «требует доработки»). Если вопрос не соответствует заданным критериям качества, он может быть автоматически отклонен, отправлен на ручную доработку преподавателю, или же система может предпринять попытку автоматической корректировки вопроса с повтором генерации. Отобранные и одобренные LLM-экспертом вопросы поступают далее в модуль формирования теста, где из них составляется итоговый тест в соответствии с заданными параметрами (количество вопросов, распределение по темам и типам и т. д.).

После того как студент предоставляет ответ на вопрос, сформулированный на естественном языке, происходит процесс его сопоставления с эталонным, «правильным» ответом (рис. 2). Для этого используется модель Word2Vec³, которая позволяет преобразовывать слова и фразы в числовые векторы. Сопоставление ответов осуществляется путем измерения сходства между вектором ответа пользователя и вектором правильного ответа.

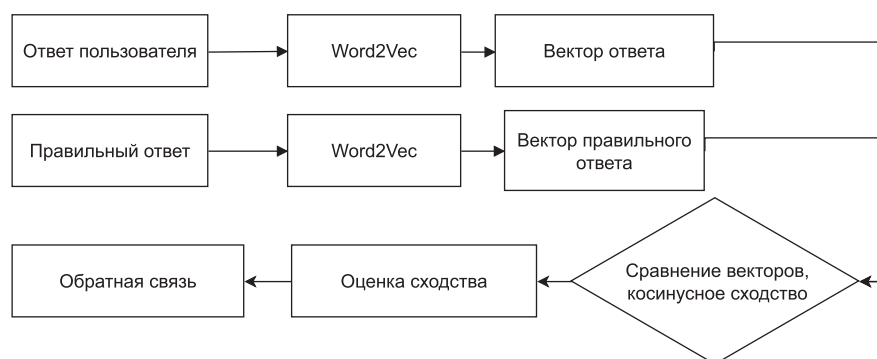


Рис. 2. Схема сопоставления предлагаемого ответа с эталонным
Fig. 2. Scheme of comparison of the proposed answer with the standard one

Такой подход позволяет не только определить точность ответа, но и оценить его смысловую близость к эталонному, обеспечивая более гибкую и точную автоматическую проверку знаний, особенно в случаях, когда требуется понимание нюансов естественного языка.

Промптинг для генерации и оценки вопросов

Автоматизированное создание тестовых материалов с помощью больших языковых моделей базируется на искусстве промптинга – это метод взаимодействия с большой языковой моделью путем предоставления ей конкретных текстовых инструкций (промптов) и фрагментов учебного материала для целенаправленной генерации тестовых вопросов и оценки их качества, без необходимости изменения внутренних параметров модели [5]. Эффективный промпт в контексте генерации тестов должен содержать текст учебного материала (или его фрагмент), четкие указания на желаемый тип вопроса (например, с выбором ответа, открытый, на сопоставление), уровень сложности, количество вопросов и другие необходимые параметры [6]. Важно, что промпт также включает инструкции для LLM по генерации соответствующих ответов или вариантов ответов для каждого типа вопроса. Такой подход обладает рядом существенных преимуществ: экономит время педагогических работников, позволяет генерировать вопросы различных форматов, индивидуализировать тестовые задания, повышать объективность оценки за счет исключения человеческого фактора, а также обеспечивает масштабируемость и возможность быстрого создания большого количества тестовых материалов. При этом от педагога не требуется глубоких знаний и навыков в области программирования и машинного обучения.

³ Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space / T. Mikolov [et al.] // arXiv Preprint arXiv:1301.3781. 2013. Vol. 3781.

С целью достижения наилучших результатов необходимо формулировать ясные и конкретные запросы, экспериментировать с различными вариантами промптов, использовать ключевые слова и фразы из учебного материала, а главное – тщательно проверять сгенерированные вопросы на соответствие исходному тексту, корректность формулировок и наличие/правильность ответов. Для генерации вопроса LLM получает промпт, содержащий инструкцию по созданию вопроса определенного типа на основе предоставленного текстового фрагмента (обычно абзаца). Чем четче и конкретнее сформулирован промпт, тем выше вероятность получить релевантный и качественный вопрос. Важно явно указывать, что вопрос должен быть основан именно на данном абзаце/тексте, ограничивая тем самым область поиска для LLM и способствуя созданию более релевантных вопросов. Ниже представлены примеры промптов для генерации вопросов.

Вопрос с выбором одного правильного ответа: *«Сформулируй вопрос с выбором одного правильного ответа по следующему абзацу: [Текст абзаца]. Предложи четыре варианта ответа, один из которых должен быть верным. Укажи правильный ответ среди предложенных, а остальные три должны быть правдоподобными дистракторами».*

Открытый вопрос: *«Сформулируй открытый вопрос, требующий развернутого ответа, на основе следующего абзаца: [Текст абзаца]. Предоставь также подробный эталонный ответ на этот вопрос, который может быть использован для автоматической оценки».*

Вопрос на заполнение пропуска: *«Сформулируй предложение с пропуском для заполнения пропуска на основе следующего абзаца: [Текст абзаца]. Укажи правильное слово или фразу для заполнения пропуска».*

Вопрос на сопоставление: *«Придумай вопрос на сопоставление, используя следующие понятия и определения: [Список понятий и определений], и укажи правильные пары для сопоставления» (если сопоставление делается внутри одного абзаца). Или: «Используя следующий текст, составь задание на сопоставление, включающее [количество] пар элементов: [текст], и предоставь их правильное соответствие».*

Вопрос с несколькими вариантами ответов: *«Создай вопрос с несколькими вариантами ответов по следующему тексту: [Текст учебного материала] и укажи все правильные варианты ответа, а также несколько правдоподобных дистракторов».*

Вопрос на тип проверяемых знаний: *«Сформулируй вопрос, проверяющий понимание причинно-следственных связей на основе следующего абзаца: [Абзац]».*

Вопрос с форматом вопроса: *«Придумай вопрос, требующий краткого ответа, по следующему тексту: [Текст]».*

После генерации вопроса необходимо убедиться в его адекватности и соответствии исходному материалу. Для этого используется второй промпт, в котором LLM выступает в роли «эксперта», оценивающего качество сгенерированного вопроса и его сопутствующих ответов. Он может оценивать сложность, релевантность, корректность вопросов, генерировать дистракторы (правдоподобные, но неверные варианты ответов) и верифицировать правильность указанных ответов, а также адекватность эталонных ответов для открытых вопросов. Пример промпта для проверки соответствия:

«Оцени, насколько следующий вопрос соответствует данному абзацу текста: Абзац: [абзац текста]. Вопрос: [сгенерированный вопрос]».

«Оцени качество следующего вопроса с точки зрения его сложности, релевантности и корректности: [вопрос]».

Или более формализованный вариант:

«Оцени по шкале от 1 до 10, насколько точно следующий вопрос отражает содержание данного абзаца:

Вопрос: [Сгенерированный вопрос]

Абзац: [Текст абзаца]

Оценка:»

Схема промптинга приведена на рис. 3.

Дальнейшее развитие подхода к автоматизированному созданию тестовых вопросов с помощью промптинга связано с несколькими направлениями. Усложнение промптов, можно добавлять дополнительные параметры, такие как уровень сложности вопроса, тип проверяемых знаний (факты, понимание, применение, анализ, синтез, оценка), количество вариантов ответа,

формат вопроса и т. д. Пример: «Создай сложный вопрос с четырьмя вариантами ответа, проверяющий умение анализировать причинно-следственные связи, на основе следующего абзаца: [Текст абзаца]».

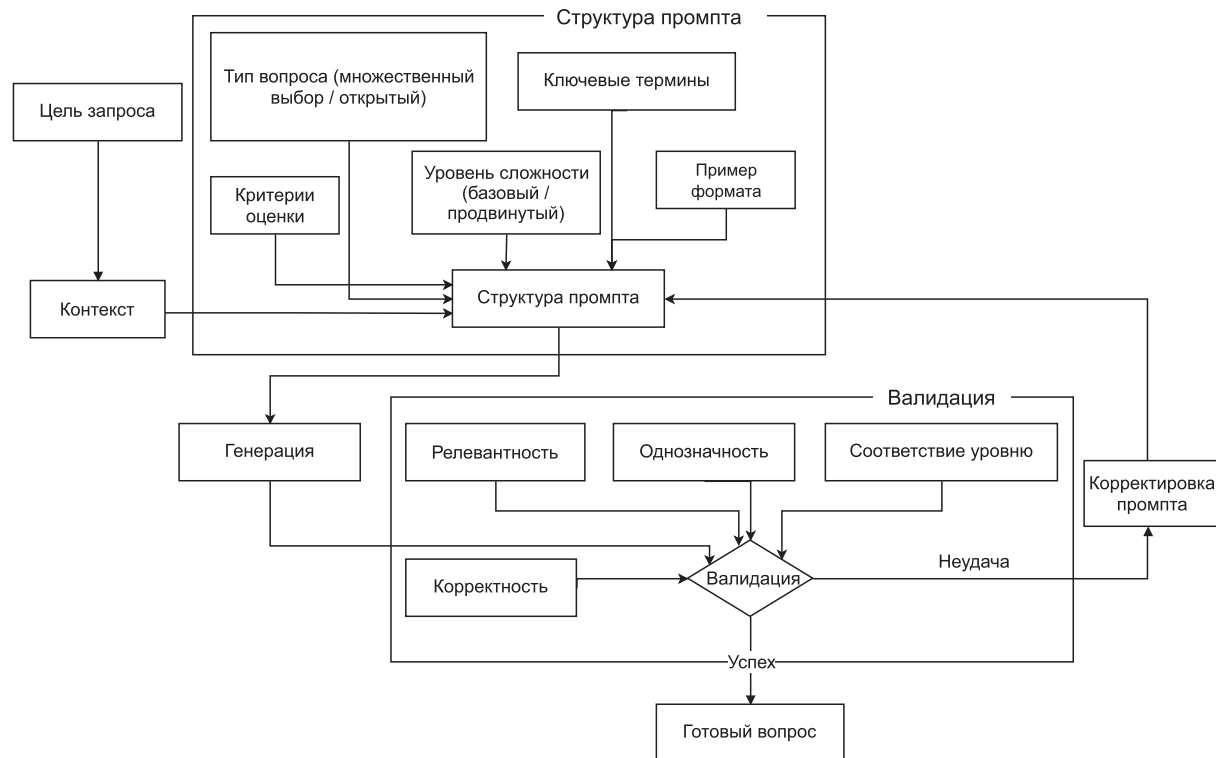


Рис. 3. Схема промптинга
Fig. 3. Prompting scheme

LLM можно комбинировать с другими инструментами обработки естественного языка, например, для автоматического выделения ключевых слов и понятий из текста, что позволит создавать более точные и релевантные вопросы. Инструменты классификации могут использоваться для автоматической категоризации вопросов.

Дообучение (fine-tuning)

Для адаптации больших языковых моделей к автоматическому созданию тестовых материалов, наряду с промптингом, эффективен метод дообучения (fine-tuning). Дообучение представляет собой процесс дополнительного обучения предобученной LLM на специализированном наборе данных, где входные данные – это учебные материалы (тексты, фрагменты, абзацы), а выходные – соответствующие им тестовые вопросы (и, опционально, ответы) [7].

В отличие от промптинга, который полагается на общие языковые способности LLM и явные инструкции, дообучение корректирует внутренние параметры модели, чтобы минимизировать ошибку предсказания вопросов по заданным текстам. Таким образом, модель не просто выполняет инструкцию из промпта, а учится генерировать вопросы, аналогичные представленным в обучающем наборе и соответствующие специфике предметной области, и, как правило, включает несколько ключевых этапов. Схема процесса дообучения приведена на рис. 4.

Подготовка данных является критически важным шагом: необходимо создать размеченный набор, состоящий из пар «текст – вопрос», или при необходимости «текст – вопрос – ответ», где тексты репрезентативны для целевой предметной области, а вопросы соответствуют желаемым типам и уровням сложности. Качество и объем этого набора данных напрямую влияют на результат. Далее выбирается предобученная LLM, которая станет основой для дообучения (например, Qwen⁴, DeepSeek⁵ и др.) исходя из доступных ресурсов, требований к качеству и специфики задачи.

⁴ Qwen Technical Report / Jinze Bai [et al.] // arXiv Preprint arXiv:2309.16609. 2023.

⁵ Deepseek-v3 Technical Report / Aixin Liu [et al.] // arXiv Preprint arXiv:2412.19437. 2024.

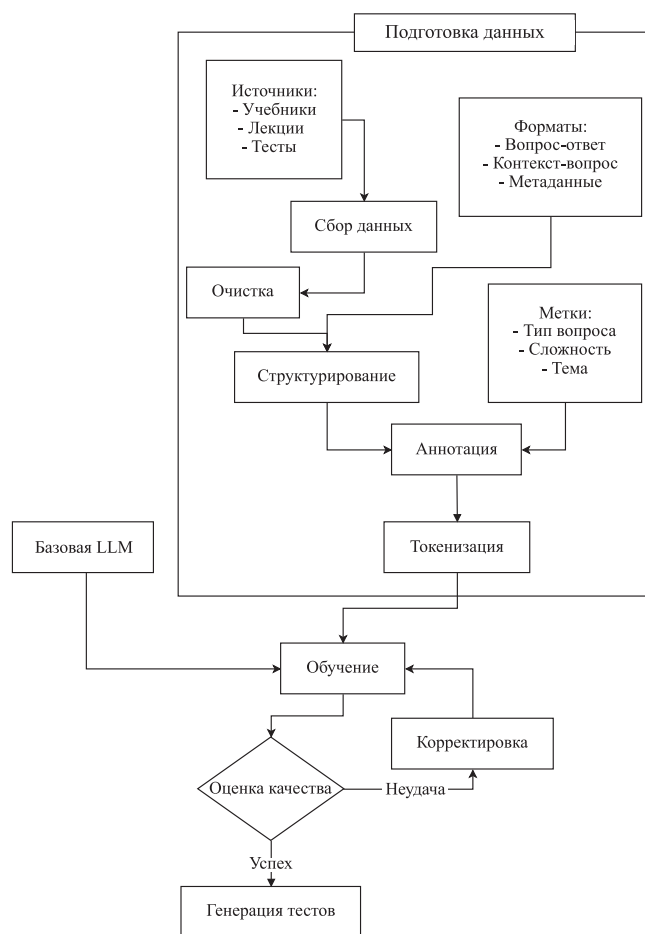


Рис. 4. Схема процесса дообучения
Fig. 4. Scheme of the process of additional training

Наконец, после дообучения проводится оценка качества работы модели на отдельном тестовом наборе данных, который не участвовал в обучении. Это позволяет проверить обобщающую способность модели и ее умение генерировать качественные вопросы для новых текстов. Используются как автоматические метрики (точность, полнота, F1-мера, BLEU, ROUGE) [8], так и экспертная оценка.

Основываясь на предлагаемой схеме, предлагается дообучать только одну LLM для генерации вопросов на специализированном наборе данных. Для оценки качества сгенерированных вопросов также можно использовать дообученную LLM-эксперт (рис. 1). LLM-эксперт дообучается на наборе данных, содержащем примеры вопросов с оценками качества (например, «релевантный», «нерелевантный», «требуется доработка»). В процессе обучения LLM-эксперт учится оценивать качество вопросов на основе заданных критериев, таких как релевантность, корректность, однозначность, сложность и др. Такой подход позволяет автоматизировать не только генерацию, но и оценку качества тестовых заданий, повышая объективность и надежность процесса.

Дообучение при правильном применении предоставляет ряд значительных преимуществ перед промптингом в контексте создания тестов.

Во-первых, повышаются качество и релевантность сгенерированных вопросов. Модель, «настроенная» на конкретную предметную область и тип заданий, способна создавать вопросы, более точно отражающие содержание учебного материала и соответствующие требуемому уровню сложности.

Во-вторых, снижается зависимость от качества формулировки промпта. При использовании дообученной модели достаточно подать на вход текст, и модель сгенерирует вопрос, основываясь на усвоенных в процессе обучения закономерностях. Это упрощает процесс создания тестов и делает его менее чувствительным к вариациям в формулировках запросов.

В-третьих, дообучение позволяет генерировать более сложные и нестандартные вопросы, выходящие за рамки простых инструкций, которые можно задать с помощью промпта. Если в обучающем наборе данных присутствовали примеры вопросов, требующих анализа, синтеза, сравнения или оценки информации, дообученная модель сможет воспроизводить подобные типы вопросов.

Однако важно учитывать и ограничения дообучения. Основным препятствием является необходимость в большом объеме качественных размеченных данных. Сбор и разметка такого набора данных могут быть трудоемкими и дорогостоящими процессами. Кроме того, дообучение требует значительных вычислительных мощностей, особенно при работе с большими LLM. Существует риск переобучения модели, когда она слишком хорошо «запоминает» обучающие данные и плохо работает на новых, незнакомых текстах. Также дообучение требует значительных вычислительных ресурсов (мощные GPU или TPU).

В целом дообучение представляет собой мощный, но требующий значительных ресурсов и экспертизы инструмент, который целесообразно использовать при наличии достаточно большого объема данных и необходимости создания высококачественных, специализированных тестов.

Результаты исследований и их обсуждение

Предлагаемая система автоматизированной генерации тестов была апробирована в Гомельском государственном техническом университете имени П. О. Сухого с целью оценки ее эффективности и удобства использования для создания тестовых материалов в реальном учебном процессе. В процессе апробации (рис. 5) система была развернута на сервере университета с использованием контейнеризации (Docker). В качестве LLM использовалась модель Qwen, доступ к которой осуществлялся через API. Для пользовательского интерфейса была выбрана платформа Open WebUI⁶, обеспечивающая удобное взаимодействие преподавателей с системой. Взаимодействие с TabbyAPI⁷ использовалось для расширения функциональности LLM.

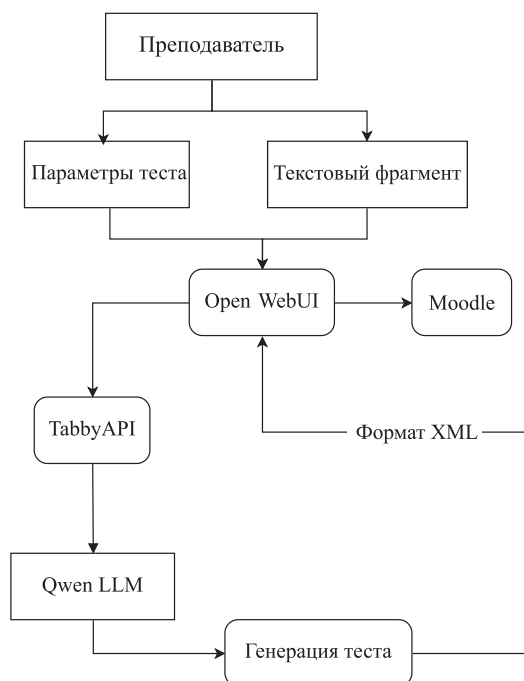


Рис. 5. Схема развертывания системы автоматизированной генерации тестов

Fig. 5. Deployment scheme of the automated test generation system

Для удобства применения сгенерированных тестов в учебном процессе была реализована возможность их экспорта в формате XML, что позволило легко импортировать тесты в систему управления обучением Moodle, которая широко используется в университете. Преподаватели

⁶ Home [Electronic Resource] // Open WebUi. Mode of access: <https://docs.openwebui.com/>. Date of access: 10.02.2025.

⁷ An OAI Compatible Exllamav2 API That's Both Lightweight and Fast [Electronic Resource] // GITHUB. Mode of access: <https://github.com/theroyallab/tabbyAPI>. Date of access: 10.02.2025.

кафедры применяли систему для генерации тестов по дисциплине «Компьютерные сети». Проводилось сравнение качества сгенерированных тестов с тестами, разработанными традиционным способом. Результаты показали, что сгенерированные тесты не уступают по качеству традиционным, а время их создания значительно сократилось. В частности, отмечено, что система позволяет генерировать разнообразные варианты тестовых заданий на основе одного и того же исходного материала, что полезно для создания индивидуальных тестов для студентов.

Для преподавателей были проведены обучающие семинары по использованию системы автоматизированной генерации тестов, в ходе которых рассматривались основные функции системы, примеры использования и лучшие практики создания промптов для получения качественных результатов. После использования системы преподавателями проводился сбор обратной связи. Большинство преподавателей отметили удобство и простоту системы, а также высокое качество сгенерированных тестов. Высказывались предложения по дальнейшему развитию системы, такие как добавление новых типов вопросов и улучшение пользовательского интерфейса.

В целом результаты апробации подтвердили эффективность и удобство использования системы автоматизированной генерации тестов. Она позволяет значительно сократить время, необходимое для создания тестовых материалов, и обеспечивает высокое качество генерируемых вопросов.

Заключение

1. Создана и реализована система автоматизированной генерации тестовых заданий, основанная на применении больших языковых моделей (LLM) к анализу методических материалов. Система построена по модульному принципу, ключевой особенностью которого является использование отдельной LLM в качестве эксперта для валидации сгенерированных вопросов, что повышает объективность и надежность итоговых тестов.

2. Разработаны подходы к использованию LLM: определены и апробированы эффективные стратегии промптинга и параметры дообучения моделей с целью повышения качества и релевантности генерируемых тестовых заданий и их автоматической оценки. Это позволило гибко настраивать процесс генерации под конкретные образовательные задачи.

3. Практическая значимость разработанной системы подтверждена успешной апробацией в реальном учебном процессе Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. Преподаватели университета использовали систему для создания тестовых материалов по своим дисциплинам.

4. Результаты апробации показали высокую эффективность предложенного решения: система позволяет значительно сократить временные затраты на подготовку тестов по сравнению с традиционными методами, обеспечивая при этом высокое качество и релевантность генерируемых вопросов, что было подтверждено отзывами преподавателей.

5. Исследование демонстрирует практическую ценность применения LLM для автоматизации процесса создания средств оценки знаний. Разработанная система представляет собой готовый инструмент, который может быть внедрен в образовательную практику для повышения эффективности работы преподавателей и стандартизации контроля знаний студентов.

Список литературы

1. Курочка, К. С. Применение информационных технологий в учебном процессе инженерного вуза / К. С. Курочка, В. И. Токачков // Вестник Хакасского государственного университета имени Н. Ф. Катанова. 2017. № 20. С. 117–120.
2. Kurachka, K. The Introduction of Soft Skills in the Study of Disciplines of the Second Stage of Higher Education at the Sukhoi State Technical University of Gomel / K. Kurachka, U. Kamrakou, V. Zakharenko // International Journal of Pedagogy, Innovation and New Technologies. 2023. Vol. 9. P. 84–94.
3. Adapting Large Language Models for Education: Foundational Capabilities, Potentials, and Challenges / Qingyao Li [et al.] // arXiv:2401.08664. 2024.
4. Maity, S. The Future of Learning in the Age of Generative AI: Automated Question Generation and Assessment with Large Language Models / S. Maity, A. Deroy // arXiv:2405.09576. 2024.
5. Al Faraby, S. Review on Neural Question Generation for Education Purposes / S. Al Faraby, A. Adiwijaya, A. Romadhony // International Journal of Artificial Intelligence in Education. 2024. Vol. 34, No 3. P. 1008–1045.

6. Maity, S. Exploring the Capabilities of Prompted Large Language Models in Educational and Assessment Applications / S. Maity, A. Dero, S. Sarkar // arXiv:2405.11579. 2024.
7. Fine-Tuning a Large Language Model with Reinforcement Learning for Educational Question Generation / S. Lamsiyah [et al.] // International Conference on Artificial Intelligence in Education. 2024. P. 424–438.
8. Соснин, А. В. Взаимосвязь экспертных категорий и автоматических метрик, используемых для оценки качества перевода / А. В. Соснин, Ю. В. Балакина, А. Н. Кащихин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Язык и литература. 2022. Т. 19, № 1. С. 125–148.

Поступила 06.05.2025

Принята в печать 02.07.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

References

1. Kurachka K., Tokochakov V. (2017) Application of Information Technologies in the Educational Process of Engineering University. *Bulletin of the NF Katanov Khakass State University*. (20), 117–120 (in Russian).
2. Kurachka K., Kamrakou U., Zakharenko V. (2023) The Introduction of Soft Skills in the Study of Disciplines of the Second Stage of Higher Education at the Sukhoi State Technical University of Gomel. *International Journal of Pedagogy, Innovation and New Technologies*. 9, 84–94.
3. Qingyao Li, Lingyue Fu, Weiming Zhang, Xianyu Chen, Jingwei Yu, Wei Xia, et al. (2024) Adapting Large Language Models for Education: Foundational Capabilities, Potentials, and Challenges. *arXiv:2401.08664*.
4. Maity S., Dero A. (2024) The Future of Learning in the Age of Generative AI: Automated Question Generation and Assessment with Large Language Models. *arXiv:2405.09576*.
5. Al Faraby S., Adiwijaya A., Romadhony A. (2024) Review on Neural Question Generation for Education Purposes. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 34 (3), 1008–1045.
6. Maity S., Dero A., Sarkar S. (2024) Exploring the Capabilities of Prompted Large Language Models in Educational and Assessment Applications. *arXiv:2405.11579*.
7. Lamsiyah S., El Mahdaouy A., Nourbakhsh A., Schommer C. (2024) Fine-Tuning a Large Language Model with Reinforcement Learning for Educational Question Generation. *International Conference on Artificial Intelligence in Education*. 424–438.
8. Sosnin A. V., Balakina Y. V., Kashchikhin A. N. (2022) Interrelation of Expert Categories and Automatic Metrics Used to Assess Translation Quality. *Vestnik of St. Petersburg University. Language and Literature*. 19 (1), 125–148 (in Russian).

Received: 6 May 2025

Accepted: 2 July 2025

Available on the website: 10 October 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Курочка К. С., канд. техн. наук, доц., зав. каф. информационных технологий, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Башаримов Ю. С., магистр, ассист. каф. информационных технологий, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Адрес для корреспонденции

246029, Республика Беларусь,
Гомель, просп. Октября, 48
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого
Тел.: +375 232 22-46-36
E-mail: basharymauyury@gmail.com
Башаримов Юрий Сергеевич

Information about the authors

Kurochka K. S., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Chief of Department of the Information Technologies, Sukhoi State Technical University of Gomel

Basharymau Y. S., Master, Assistant at the Department of Information Technologies, Sukhoi State Technical University of Gomel

Address for correspondence

246029, Republic of Belarus,
Gomel, October Ave., 48
Sukhoi State
Technical University of Gomel
Tel.: +375 232 22-46-36
E-mail: basharymauyury@gmail.com
Basharymau Yuri Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-76-83>

УДК 004.946

РАЗВИТИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ АНАТОМИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ ПРАКТИКИ В МЕДИЦИНСКОМ ОБРАЗОВАНИИ

ШАН ВЭНЬЛИ, Е. И. КОЗЛОВА

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрены аспекты применения иммерсивных технологий при создании виртуальной анатомической студенческой лаборатории, такие как разработка и оптимизация пространственных моделей, практическая реализация системы и перспективы на будущее. Предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию и оптимизации виртуальных анатомических лабораторий, отмечены перспективы применения технологий виртуальной реальности в медицинском образовании и клинической практике.

Ключевые слова: иммерсивные технологии, виртуальная реальность, анатомия, Unity3D, моделирование, сценарии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шан, Вэньли. Развитие виртуальных анатомических лабораторий на примере практики в медицинском образовании / Шан Вэньли, Е. И. Козлова // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-76-83>.

DEVELOPMENT OF VIRTUAL ANATOMY LABORATORIES IN PRACTICE IN MEDICAL EDUCATION

SHANG WENLI, E. I. KOZLOVA

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The aspects of using immersive technologies in creating a virtual anatomical student laboratory are considered, such as the development and optimization of spatial models, practical implementation of the system and future prospects. Recommendations for further improvement and optimization of virtual anatomical laboratories are proposed, and the prospects for using virtual reality technologies in medical education and clinical practice are noted.

Keywords: immersive technologies, virtual reality, anatomy, Unity3D, modeling, scenarios.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Shang Wenli, Kozlova E. I. (2025) Development of Virtual Anatomy Laboratories in Practice in Medical Education. *Digital Transformation*. 31 (3), 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-76-83> (in Russian).

Введение

Технологии виртуальной реальности (VR) благодаря своим иммерсивным интерактивным возможностям активно завоевывают позиции в различных областях [1]. Путем моделирования формы, размера и движения реальных объектов VR-технология может обеспечить визуальный опыт, близкий к реальности, в цифровом мире [2]. В медицинской сфере применение VR-технологии особенно перспективно. В настоящее время по всему миру реализуется множество проектов, исследующих применение VR-технологий в медицинском образовании, и рыночная стоимость медицинского VR-обучения неуклонно растет [3–7]. В традиционном анатомическом обучении существуют определенные ограничения, такие как невозможность завершения полного экспериментального процесса и наблюдение за каждым органом в здоровом состоянии, ограничение времени обучения или исследования, недостаток исследовательского или обучающего анатомического материала. Кроме того, некоторые органы, например, сосуды, имеют сложную структуру, которую трудно показать отдельно и восстановить в исходное состояние. Используя VR-технологии, можно создать реалистичные модели сцен и соответствующие экспериментальные действия, позволяя студентам получать знания и опыт, аналогичные реальной лаборатории, и многократно наблюдать и манипулировать этими структурами в виртуальной среде. В отличие от реальной среды, где все операции и действия зачастую не могут быть выполнены повторно, в виртуальной или операционной лаборатории модель может быть восстановлена в исходное состояние. Обучающиеся могут наблюдать весь процесс, отслеживать состояние органов и получать практический опыт в ходе операций. Это не только экономит учебные ресурсы, но и позволяет достигать лучших образовательных результатов.

В статье рассмотрена виртуальная учебная анатомическая лаборатория и исследован ее потенциал для улучшения интерактивного изучения анатомии. Представлена разработанная модель виртуальной учебной лаборатории, предназначенной для визуализации и интерактивного изучения анатомической структуры человека.

Эволюция и оптимизация виртуальных анатомических лабораторий

Развитие виртуальных анатомических лабораторий можно проследить с ранних достижений в области компьютерной графики и виртуальной реальности. Этот процесс включает несколько ключевых этапов [8–11]:

- первоначальные исследования и формирование концепции – 1970-е гг.;
- трехмерное моделирование и визуализация – 1980–1990-е гг.;
- внедрение технологий виртуальной реальности – конец 1990-х – начало 2000-х гг. – создание иммерсивных виртуальных анатомических моделей и организация взаимодействия пользователя с ними в виртуальной среде;
- высокоточные модели и интерактивность в реальном времени: с конца 2000-х по настоящее время. Более детализированные и реалистичные анатомические модели, интерактивные технологии в реальном времени, что позволяет пользователям выполнять сложные и детализированные анатомические эксперименты, включая моделирование хирургических процессов и патологических изменений.

Ранние технологии моделирования использовали простые геометрические формы и ручные анатомические рисунки [12]. Затем трехмерная реконструкция на основе изображений прибегла к обработке и объединению большого количества изображений с помощью алгоритмов сегментации изображений и трехмерной реконструкции, что позволяло создавать более детализированные анатомические модели [13]. Последовавший переход к высокоточным анатомическим моделям [14] потребовал применения данных высокоразрешающей визуализации, передовых алгоритмов моделирования и графической обработки. Развитие технологий рендеринга в реальном времени, в том числе на основе физических явлений (PBR) [15], позволило пользователям взаимодействовать с высокоточными анатомическими моделями в виртуальной среде в режиме реального времени. В последние годы в дизайне виртуальных анатомических моделей широко используются технологии слияния многомодальных данных [16]. Объединяя данные визуализации из разных источников (таких как КТ, МРТ, УЗИ и т. д.), исследователи могут создавать более полные и точные анатомические модели. Кроме того, функциональные данные, такие как электроэнцефалограммы, электрокардиограммы и т. д., также интегрируются в модели, позволяя виртуальной анатомической лаборатории не только демонстрировать анатомические структуры, но и моделировать физиологические функции.

Последние разработки в области дизайна и оптимизации моделей включают использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения [17]. Эти технологии могут автоматически обрабатывать и анализировать большое количество медицинских изображений, улучшая эффективность и точность создания моделей. Алгоритмы машинного обучения могут автоматически выполнять сегментацию изображений, извлечение признаков и оптимизацию моделей, значительно сокращая количество ручных вмешательств и ошибок. Кроме того, технологии дополненной реальности на основе глубокого обучения позволяют моделям динамически взаимодействовать и адаптироваться в реальном времени. Благодаря этим технологическим достижениям виртуальные анатомические лаборатории могут предоставлять более реалистичные и всесторонние учебные и исследовательские платформы, способствуя развитию медицинского образования и научных исследований.

Процесс разработки виртуальных анатомических лабораторий

Создание систем виртуальной реальности неразрывно связано с поддержкой компьютеров, специализированного оборудования, прикладного программного обеспечения и баз данных [18]. Для реализации взаимодействия между виртуальным и реальным мирами требуются устройства ввода/вывода, такие как манипуляторы. В настоящее время распространены захватные устройства для жестового управления, системы обработки и синтеза звука для голосового взаимодействия, шлемы или очки для визуального взаимодействия и т. д.

Для создания виртуальной среды необходимо использовать специальное программное обеспечение для формирования моделей, сцен и материалов в них. Для этого применяются 3ds Max, Maya и другие приложения для создания виртуальных моделей, Photoshop для настройки текстур. При организации пользовательского взаимодействия используются, например, такие программные средства, как AU [19] для создания аудиоматериалов и Adobe Premiere [20] для создания видеоматериалов. Далее с использованием специального движка необходимо сформировать систему виртуальной реальности. В настоящее время наиболее распространенными среди таких виртуальных движков являются Unity3D, Converse3D, Virtools, UE4, UE5. Все данные этих систем должны храниться в базе данных, как показано на рис. 1.

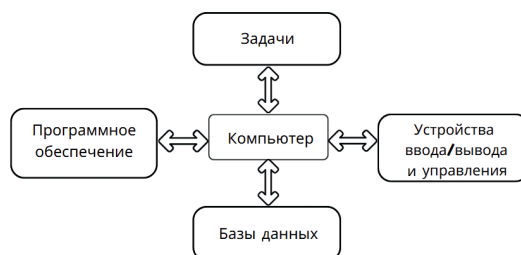


Рис. 1. Компоненты системы виртуальной реальности
Fig. 1. Components of a virtual reality system

Один из важных элементов VR-приложения – качественная система просмотра, способная обеспечить пользователям реалистичный опыт [21, 22], поскольку именно она является своеобразным мостом между виртуальной средой и реальным миром. Другой важнейший компонент – чувствительная система отслеживания, которая способна быстро распознавать движения человека и обеспечивать более полный и реалистичный опыт погружения в виртуальную среду.

Пользовательский опыт в виртуальной анатомической лаборатории является важным показателем эффективности построенной среды. Его ключевые факторы – интерактивность и глубина погружения, эргономичность пользовательского интерфейса, обратная связь и возможность оказания помощи пользователю, мультимодальное взаимодействие со средой, возможность коллективного обучения, получение пользователем персонализированного опыта. В начальной стадии создания виртуальной анатомической технологии пользователи в основном взаимодействуют с моделью через настольный компьютер или проекционное оборудование. Способы взаимодействия ограничены, в основном используются мышь и клавиатура, и уровень погружения пользователя низок. С развитием VR-системы пользователи могут взаимодействовать с виртуальной анатомической моделью более наглядно и иммерсивно с помощью гарнитуры виртуальной реальности (HMD) и устройств отслеживания движения. Этот иммерсивный опыт существенно повышает уровень участия и эффективность обучения пользователей. Хорошо спроектированный

пользовательский интерфейс имеет решающее значение для пользовательского опыта. Дизайн пользовательского интерфейса в виртуальной анатомической лаборатории должен быть простым и интуитивно понятным, чтобы пользователи могли легко выполнять операции и навигацию.

Предоставление обширных пользовательских функций, таких как масштабирование моделей, их вращение, изменение формы, разрезание и т. д., позволяет пользователям настраивать вид и параметры в соответствии с их учебными потребностями, что повышает эффективность обучения. Предоставление реальной обратной связи от системы в процессе взаимодействия помогает пользователям понять сложные анатомические структуры и процессы. Например, когда пользователь выбирает определенный орган или структуру, система предоставляет соответствующую детальную информацию о выбранном объекте и объяснения. Некоторые виртуальные анатомические лаборатории внедряют функцию виртуального наставника, который с помощью технологий искусственного интеллекта предоставляет пользователям персонализированное руководство и рекомендации, помогая им лучше понять и освоить учебный материал. Применение технологий распознавания речи позволяет пользователям управлять операциями с помощью голосовых команд, что повышает удобство и естественность взаимодействия.

Помимо визуальной и звуковой обратной связи, тактильная обратная связь также является важным средством улучшения пользовательского опыта. С помощью устройств обратной связи пользователи могут чувствовать текстуру и сопротивление виртуальной модели, что повышает реализм взаимодействия.

Виртуальные анатомические лаборатории также могут поддерживать одновременное онлайн-взаимодействие нескольких пользователей, способствуя коллективному обучению. Пользователи могут вместе изучать и анализировать модели виртуальной среды, обмениваться опытом и знаниями. Функция виртуального класса позволяет преподавателям проводить реальные занятия в виртуальной среде, а студентам выполнять анатомические эксперименты и упражнения под руководством наставника. Система может также отслеживать прогресс обучения пользователя и записывать его действия, предоставляя персонализированные учебные планы и рекомендации, что помогает пользователям более эффективно овладеть анатомическими знаниями, а посредством регулярной оценки и обратной связи система может помочь пользователям определить слабые моменты в обучении и предложить целевые упражнения и рекомендации по повторению.

Методы разработки систем

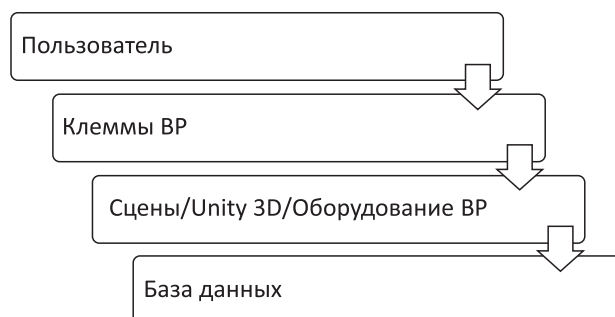
Структура предлагаемой виртуальной анатомической системы включает три основных компонента: платформу виртуальной реальности, удаленную базу данных и оконечные устройства. Эти компоненты взаимодействуют друг с другом, обеспечивая эффективную работу системы.

Платформа виртуальной реальности является ядром данной системы и отвечает за управление работой приложения виртуальной анатомии. С помощью движка Unity3D можно создавать реалистичные виртуальные среды и реализовывать взаимодействие пользователя с окружающей средой.

Для обеспечения хранения и обновления данных используется удаленная база данных. Она содержит различные анатомические модели, данные об окружающей среде и другую информацию, необходимую для системы, чтобы пользователи могли получить доступ к данным в любое время.

Пользователи взаимодействуют с системой через VR-устройства, чтобы получить доступ к виртуальной анатомической среде и выполнить необходимые операции. Эти оконечные устройства подключаются к платформе виртуальной реальности через движок Unity3D, позволяя пользователям погружаться в процесс обучения. Структура виртуальной анатомической системы представлена на рис. 2.

Рис. 2. Структура виртуальной анатомической системы
Fig. 2. Structure of the virtual anatomical system



Исходя из потребностей обычных анатомических экспериментов и технических характеристик виртуальной реальности, для реализации обучающего приложения были выбраны восемь систем человеческого тела (нервная, опорно-двигательная, кровеносная и т. д.) в качестве отправной точки для демонстрации анатомических процессов и состояний различных его систем. Весь процесс производства проводился в несколько этапов.

Проектирование среды и создание управляющих элементов. С использованием программы Photoshop были разработаны карты среды, входные кнопки и восемь кнопок переключения систем. На этом этапе важно проводить наблюдение за реальной лабораторной средой, включая ее площадь, внутреннее расположение и т. д. Это позволяет понять общую структуру и компоновку лаборатории и обеспечить эталон для последующего моделирования [23].

Исследования подтверждают, что выбор цвета и текстуры влияет на удобство взаимодействия с виртуальной средой. Яркие цвета, такие как красный и оранжевый, привлекают внимание, тогда как синий и зеленый способствуют концентрации [24]. В интерфейсах VR наибольшее внимание пользователей привлекают интерактивные элементы, поэтому их цвет должен контрастировать с фоном, а текстура – визуально выделяться для удобной навигации [25]. Кроме того, правильный подбор цвета снижает зрительное утомление, а текстурирование помогает восприятию глубины сцены.

Помимо цветовых решений, важную роль играет точность виртуальной реконструкции лаборатории. Использование специализированного программного обеспечения, такого как AutoCAD, 3ds Max и другие, позволяет воссоздать структуру и детали лаборатории с высокой точностью. Это касается моделирования стен, пола, потолка и других элементов, а также учета расположения мебели в лаборатории.

Управление разрешением и качеством изображения. Были выбраны такие показатели разрешения (1024×1024 px для текстур, 2448×2448 px на глаз для HTC Vive Pro 2, 90/120 Гц – частота обновления), чтобы изображения, используемые для дизайна среды, не отображались размытыми из-за низкого разрешения, но и не вызывали задержек в процессе иммерсии из-за высокой нагрузки на систему. Проведенные исследования показали, что во многих учреждениях образования учебные компьютерные классы укомплектованы оборудованием средней мощности, что также выдвигает свои требования к предлагаемым виртуальным обучающим системам. При разработке данной системы учитывались требования к построению моделей с минимально возможным разрешением и скоростью обработки данных при перестроении сцен, при этом обращалось внимание на корректность отображения и его реалистичность.

Создание моделей среды. После создания моделей среды всей лаборатории проводились отладка отображения среды и настройка освещения. Это включало моделирование стен, пола и других элементов лаборатории, а также настройку освещения для обеспечения реализма и комфорта среды. Далее разрабатывались модели восьми систем человеческого тела с учетом требований высокой точности и реализма, чтобы пользователи могли точно изучать и понимать структуру и функции человеческого тела, а также снижения разрешения для экономии ресурсов компьютера. После завершения создания всех моделей особое внимание обращалось на правильное их размещение в виртуальной среде. Расположение моделей в пространстве виртуальной лаборатории, их положение друг относительно друга и пользователя в процессе обучения оказывают существенное влияние на самочувствие пользователя, вплоть до потери им ориентации, возникновения головокружения и симптомов морской болезни, других нежелательных эффектов. Во избежание нежелательных последствий необходимо точно соблюдать линии и углы поворотов как самих анатомических моделей, так и смоделированного помещения – лаборатории, окон, мебели в ней и т. д.

Проектирование интерактивных действий. Добавление интерактивных действий в систему позволяет пользователям выполнять определенные действия с анатомическими моделями с помощью шлема HTC VIVE и контроллеров. Эти действия включают перетаскивание, масштабирование, вращение и т. д., чтобы усилить иммерсию и участие пользователя.

Тестирование и отладка системы. Проведение функционального тестирования и тестирования производительности системы, чтобы гарантировать стабильную работу и соответствие ожидаемым функциональным требованиям, является необходимым этапом проектирова-

ния VR-систем. В дальнейшем на основе результатов тестирования вносятся изменения и проводится оптимизация системы. Это может включать в себя исправление ошибок программного обеспечения, повышение производительности, улучшение пользовательского опыта и т. д.

Схема процесса разработки модели виртуальной учебной анатомической лаборатории приведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема процесса разработки модели виртуальной учебной анатомической лаборатории
Fig. 3. Flow chart of the development process of a virtual anatomy teaching laboratory model

Интерактивный дизайн системы включает в себя процессы реализации движений, создания и реализации управляющих элементов, в данном случае – кнопок. В разработанной виртуальной лаборатории все движения в сценах представлены от первого лица. Для отображения движений использованы готовые префабы в Unity и ограничено автоматическое вращение объектов. Скрипты полностью контролируют вращение префаба, предотвращая его опрокидывание из-за физических эффектов. Затем главная камера должна быть установлена как дочерний элемент объекта, чтобы можно было настроить позицию камеры для достижения наилучшего эффекта – точного соответствия ее положения и угла обзора движений пользователя, исключая смещение и рассинхронизацию. Главная цель – установить вид от первого лица, а затем подключить скрипт для его размещения на префабе. Движение объектов в сцене можно реализовать с помощью операций интерполяции Vector3 среды Unity.

Для осуществления перехода между интерфейсами системы виртуальной реальности необходимы управляющие элементы, реализованные в данном случае в виде кнопок, такие как вход, выход, переключение на любой интерфейс и т. д. Большинство функций кнопок реализуются следующим образом: кнопки привязываются к событиям, чтобы реализовать их функции; кнопки создаются в панели иерархии (UI > Button), определяется закрытый метод OnClick(), и в методе Start() добавляется «прослушиватель событий» (щелчка мыши или манипулятора), передавая OnClick в качестве параметра объекту Button для привязки ClickHandler.

После создания и отладки всего содержимого виртуальной среды следует добавить шлем виртуальной реальности и контроллеры для создания истинного погружающего эффекта для пользователя. После запуска сцены определяется начальное положение пользователя путем регулировки позиции OVRPlayerController.

Заключение

1. Интеграция анатомического наблюдения восьми систем человеческого тела и демонстрации формы органов позволила реализовать цифровое и трехмерное представление анатомии человека. В процессе разработки системы выявлен ряд проблем и задач, вытекающих из вариантов решения. Среди главных – высокая стоимость устройств виртуальной реальности и необходимость специальной аппаратной поддержки, что ограничивает распространение и продвижение

систем виртуальной реальности в учреждениях образования, а также в личном пользовании. Найденное и опробованное решение этих проблем – наложение ограничений на требования к производительности компьютера и разрешения изображений в системе. Далее – вопрос точности и реалистичности моделей. Неточность в отображении анатомических структур влияет на пользовательский опыт и эффективность обучения. Также среди проблем следует отметить необходимость обновления и поддержки контента. Анатомические модели и методическое сопровождение системы требуют постоянного обновления и поддержки, чтобы они оставались согласованными с актуальными медицинскими знаниями. Это требует значительных затрат времени и человеческих ресурсов и может увеличить затраты на поддержание работоспособности системы на этапе ее использования.

2. Несмотря на указанные проблемы, предложенная реализация виртуальной учебной анатомической лаборатории имеет потенциал применения и перспективы развития как обучающей системы. Кроме того, на ней можно отрабатывать подходы к решению вышеописанных проблем и к проведению различных тестов ее эффективности в реальном обучении.

3. Будущие исследования должны сосредоточиться на решении текущих проблем и задач совершенствования системы, на постоянном улучшении и расширении ее функциональности и производительности, чтобы соответствовать потребностям медицинского образования и клинической практики.

Список литературы / References

1. Hua J., Zhang B., Wang D. (2019) Application of Virtual Reality Technology in Library Visual Information Retrieval. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 569. DOI: 10.1088/1757-899X/569/3/032062.
2. Ivanova A. V. (2018) VR & AR Technologies: Opportunities and Application Obstacles. *Strategic Decisions and Risk Management*. (3), 88–107. <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-3-88-107> (in Russian).
3. Slavin O. A., Grin E. C. (2019) Overview of Virtual and Augmented Reality Technology. *Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences*. Available: <http://www.isa.ru/proceedings/images/documents/2019-69-3/42-54.pdf>.
4. Honey M. L. L., Diener S., Connor K., Veltman M., Bodily D. (2009) Teaching in Virtual Space: Second Life Simulation for Haemorrhage Management. *Proceedings Ascilite Auckland*. 1222–1224.
5. Riener R., Harders M. (2012) *Virtual Reality in Medicine*. London, Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-1-4471-4011-5_1.
6. Kouijzer M. M. T. E., Kip H., Bouman Y. H. A., Kelders S. M. (2023) Implementation of Virtual Reality in Healthcare: A Scoping Review on the Implementation Process of Virtual Reality in Various Healthcare Settings. *Implement Sci Commun.*, Jun. 16. 4 (1). DOI: 10.1186/s43058-023-00442-2.
7. Zhu T. (2019) *Research on the Application of Human-Computer Interaction Interface Based on VR Technology*. China, Southeast University.
8. Bouknight W. J. (1970) A Procedure for Generation of Three-Dimensional Half-Toned Computer Graphics Presentations. *Communications of the ACM*. 13 (9), 527–536.
9. Fuchs H., Levoy M., Pizer S. M. (1989) Interactive Visualization of 3D Medical Data. *Computer*. 22 (8).
10. Nieder G. L., Scott J. N., Anderson M. D. (2000) Using QuickTime Virtual Reality Objects in Computer-Assisted Instruction of Gross Anatomy: Yorick – the VR Skull. *Clinical Anatomy*. 13 (4), 287–293.
11. Izard S. G., Torres R. S., Plaza O. A., Méndez J. A. J., García-Peñalvo F. J. (2000) Nextmed: Automatic Segmentation, 3D Reconstruction, and 3D Model Visualization Platform Using Augmented and Virtual Reality. *Sensors*. 20 (10).
12. Proykova A. (2021) Virtual Science Laboratories: Will They Replace the Physical Laboratories. *The Twelfth International Conference on e-Learning*. Belgrade, Belgrade Metropolitan University.
13. Calhoun P. S., Kuszyk B. S., Heath D. G., Carley J. C., Fishman E. K. (1999) Three-Dimensional Volume Rendering of Spiral CT Data: Theory and Method. *Radiographics*. 19 (3), 745–764.
14. Rezk-Salama C. (2003) Volume Rendering Techniques for General-Purpose Graphics Hardware (Deutsche Kurzfassung). *Ausgezeichnete Informatikdissertationen*.
15. Dai P., Li Z., Zhang Y., Liu S., Zeng B. (2020) PBR-Net: Imitating Physically Based Rendering Using Deep Neural Network. *IEEE Transactions on Image Processing*. 29, 5980–5992.
16. Uechi J., Tsuji Y., Konno M., Hayashi K., Shibata T., Nakayama E., et al. (2015) Generation of Virtual Models for Planning Orthognathic Surgery Using a Modified Multimodal Image Fusion Technique. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 44 (4), 462–469.
17. Hameduh T., Haddad Y., Adam V., Heger Z. (2020) Homology Modeling in the Time of Collective and Artificial Intelligence. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 18, 3494–3506.

18. Hu X. (2009) Virtual Reality Technology Fundamentals and Applications. *Beijing University of Posts and Telecommunications Press*.
19. Adobe Inc. (2024) Adobe Audition Release Notes. *Adobe Inc. Retrieved Sept. 15*. Available: <https://helpx.adobe.com/audition/audition-releasenotes.html>.
20. Adobe Inc. (2024) Adobe Premiere Pro System Requirements. *Adobe Inc. Retrieved March 6, 2025*. Available: <https://helpx.adobe.com/premiere-pro/system-requirements.html>.
21. Zhang Qian, Wang Ke, Zhou Sheng (2020) Application and Practice of VR Virtual Education Platform in Improving the Quality and Ability of College Students. *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3019262.
22. Ellaway R. H. (2010) Virtual Reality in Medical Education. *Medical Teacher*. 32 (9), 791–793.
23. Ways of Unity UGUI Event Binding. (n.d.). *Retrieved October 7, 2020*. Available: <https://blog.csdn.net/xinzhilinger/article/details/108434303>.
24. Saleeb N., Dafoulas G. (2010). Effect of Student Emotion-Associations on Architectural Color Design of Educational Spaces in 3D Virtual Learning Environments. *20th International Conference on Computer Theory and Applications*.
25. LaViola Jr. J., Kruijff E., McMahan R., Bowman D., Poupyrev I. (2017) 3D User Interfaces: Theory and Practice. *Addison-Wesley Professional*.

Поступила 12.05.2025

Принята в печать 01.07.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

Received: 12 May 2025

Accepted: 1 July 2025

Available on the website: 10 October 2025

Вклад авторов

Шан Вэньли провела литературный обзор и анализ литературных данных, осуществила разработку модели и подготовила рукопись статьи.

Козлова Е. И. разработала концепцию и провела критический анализ содержания статьи, подготовила окончательный вариант для публикации.

Authors' contribution

Shang Wenli conducted a literature review and analysis of literature data, developed the model and prepared the manuscript of the article.

Kozlova E. I. developed the concept and conducted a critical analysis of the content of the article, prepared the final version for publication.

Сведения об авторах

Шан Вэньли, асп., Белорусский государственный университет

Козлова Е. И., канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. интеллектуальных систем, Белорусский государственный университет

Адрес для корреспонденции

220000, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 25 703-12-23
E-mail: wenlishang128@gmail.com
Шан Вэньли

Information about the authors

Shang Wenli, Postgraduate, Belarusian State University

Kozlova E. I., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Department of the Intelligent Systems, Belarusian State University

Address for correspondence

220000, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 25 703-12-23
E-mail: wenlishang128@gmail.com
Shang Wenli

This image shows a full page of blank, lined paper. It features approximately 28 horizontal blue or grey lines spaced evenly apart, typical of notebook paper. The lines extend across the entire width of the page, leaving small margins at the top and bottom. There are no vertical lines, text, or other markings on the page.