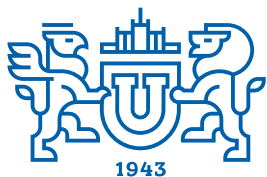


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2026
Т.26, № 2

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

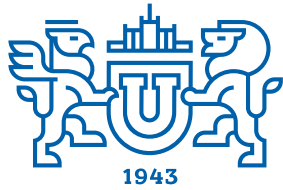
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

Редакционная коллегия:

Логиновский О.В., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*гл. редактор*) (г. Челябинск);
Мельников А.В., д.т.н., проф. (*зам. гл. редактора*) (г. Ханты-Мансийск);
Голлай А.В., д.т.н., доц. (*зам. гл. редактора*) (г. Челябинск);
Захаров В.В., *отв. секретарь* (г. Челябинск);
Баркалов С.А., д.т.н., проф. (г. Воронеж);
Березанский Л., PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);
Болодурина И.П., д.т.н., проф. (г. Оренбург);
Джапаров Б.А., д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);
Дранко О.И., д.т.н., доц. (г. Москва);
Ефанов В.Н., д.т.н., проф. (г. Уфа);
Затонский А.В., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Максимов А.А., д.т.н. (г. Новокузнецк);
Прангишвили А.И., д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);
Щепкин А.В., д.т.н., проф. (г. Москва);
Ячиков И.М., д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

Редакционный совет:

Шестаков А.Л., д.т.н., проф. (*председатель*) (г. Челябинск);
Браверман Е., PhD, проф. (г. Калгари, Канада);
Дегтярь В.Г., д.т.н., проф., академик РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);
Казаринов Л.С., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Кибалов Е.Б., д.э.н., проф. (г. Новосибирск);
Лясковская Е.А., д.э.н., доц. (г. Челябинск);
Новиков Д.А., д.т.н., проф., академик РАН (г. Москва);
Панферов В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Слинько А., PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);
Столбов В.Ю., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Ушаков В.Н., д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);
Шестаков И., д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);
Ширяев В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Шнайдер Д.А., д.т.н., доц. (г. Челябинск);
Штессель Ю., PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL
STATE UNIVERSITY

2026

Vol. 26, no. 2

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.
Seriya “Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika”

South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

Editorial Board:

Loginosvkiy O.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Melnikov A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*deputy editor-in-chief*), Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;

Hollay A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Zakharov V.V., *executive secretary*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Barkalov S.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;

Berezansky L., PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;

Bolodurina I.P., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation;

Dzhaparov B.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan;

Dranko O.I., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Efanov V.N., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;

Zatonskiy A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;

Maksimov A.A., Dr. of Sci. (Eng.), State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation, Novokuznetsk, Russian Federation;

Prangishvili A.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;

Shchepkin A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Yachikov I.M., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

Editorial Council:

Shestakov A.L., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*chairman*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Braverman E., PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;

Degtyar' V.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;

Kazarinov L.S., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Kibalov E.B., Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;

Lyaskovskaya E.A., Dr. of Sci. (Econ.), Ass. Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Novikov D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Panferov V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Slinko A., PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;

Stolbov V.Yu., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;

Ushakov V.N., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;

Shestakov I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;

Shiryaev V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Schneider D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Shtessel Yu., PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

ИСМАГУЛОВ М.Е., МЕЛЬНИКОВ А.В. Алгоритм сегментации сцен видеолекций на основе сравнения визуальных эмбеддингов кадров 5

Управление в технических системах

ЗАМЫШЛЯЕВА А.А., КУЗНЕЦОВ А.А. Адаптивный гибридный алгоритм локализации ключевых точек для навигации летательного аппарата с оценкой качества изображения 16

Инфокоммуникационные технологии и системы

ВОРОБЬЕВ М.С., КУДРИН Л.П., ХАШИМОВ А.Б. Формирование диаграммы направленности панельных антенн на мачтах и башнях 30

Управление в социально-экономических системах

ФРЕЙМАН В.И., ЮЖАКОВ А.А. Проектирование образовательных программ в современных условиях: практический подход 40

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ТОПОЛЬСКИЙ Д.В., ТОПОЛЬСКИЙ Н.Д., ТОПОЛЬСКАЯ И.Г. Методы и алгоритмы проактивного управления цифровыми подстанциями в активно-адаптивных электроэнергетических системах 54

ГИЛЁВ Д.В. Алгоритм интегрированного контура управления диагностическим процессом и ресурсами медицинской организации 64

БАРКАЛОВ С.А., АВЕРИНА Т.А., ПИСАРЕВА А.А. Цифровая трансформация бизнес-процессов строительной компании 74

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ГОРДЕЕВ И.К. Разработка концепции автоматизации внутризаводской логистики на основе мобильных роботов для предприятия огнеупорной промышленности 95

Краткие сообщения

КОЛЕСНИКОВА О.В., МОЙСУК А.Д. Метод оптимизации нагрузки турбоагрегатов 109

CONTENTS

Informatics and computer engineering

- ISMAGULOV M.E., MELNIKOV A.V. An algorithm for video lecture scene segmentation based on visual frame embedding comparison 5

Control in technical systems

- ZAMYSHLYAEVA A.A., KUZNETSOV A.A. Assessment of the accuracy of localization of key points of reference markers by a neural network algorithm when analyzing video from on-board cameras of an aircraft 16

Infocommunication technologies and systems

- VOROBEV M.S., KUDRIN L.P., KHASHIMOV A.B. Formation of the radiation pattern of panel antennas on masts and towers 30

Control in social and economic systems

- FREYMAN V.I., YUZHAKOV A.A. Designing of educational programs in modern conditions: A practical approach 40

- LOGINOVSKIY O.V., TOPOLSKII D.V., TOPOLSKII N.D., TOPOLSKAIA I.G. Methods and algorithms for proactive control of digital substation in active-adaptive electric power systems 54

- GILEV D.V. Algorithm for integrated management of the diagnostic process and resources of a medical organization 64

- BARKALOV S.A., AVERINA T.A., PISAREVA A.A. Digital transformation of business processes in a construction company 74

Automated process control systems

- LOGINOVSKIY O.V., GORDEEV I.K. Development of a concept for automation of internal logistics based on mobile robots for the fire-resistant industry 95

Brief reports

- KOLESNIKOVA O.V., MOISUK A.D. Method of turbine operating modes optimization 109

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.855

DOI: 10.14529/ctcr260201

АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ СЦЕН ВИДЕОЛЕКЦИЙ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ ВИЗУАЛЬНЫХ ЭМБЕДДИНГОВ КАДРОВ

М.Е. Исмагулов¹, m_ismagulov@ugrasu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3280-5259>

А.В. Мельников^{1, 2}, melnikovav@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1073-7108>

¹ Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

² Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия

Аннотация. В условиях роста объема учебных материалов в формате видеолекций актуальной является задача их автоматического преобразования в письменный формат, который обеспечивает в ряде случаев лучшее усвоение. Использование для решения этой задачи ручной разметки видеолекций характеризуется высокой трудоемкостью, что обуславливает необходимость разработки алгоритмических методов разграничения видеолекций на смысловые фрагменты на основе анализа визуальной информации. **Цель исследования:** разработка алгоритма сегментации видеолекций на сцены, основанного на сравнении визуальных эмбеддингов кадров. Предлагаемый подход направлен на выявление границ временных интервалов видеолекции, внутри которых сохраняется устойчивость визуального содержания, что позволяет интерпретировать такие интервалы, как сцены, соответствующие логически завершенным фрагментам изложения учебного материала. **Материалы и методы.** В современных исследованиях задачи автоматизированной обработки видеолекций часто решаются с использованием мультимодальных больших языковых моделей, способных учитывать взаимосвязи между аудиальной и визуальной информацией. Вместе с тем применение подобных моделей сопровождается рядом ограничений, связанных с интерпретируемостью результатов, вычислительной сложностью и требованиями к объему обучающих данных. В рамках исследования используется метод многомодельной обработки видеоданных, основанный на раздельном анализе модальностей видеолекции с применением специализированных моделей. Такой подход позволяет учитывать особенности каждого типа данных и повышать точность обработки. Для анализа визуальной информации применяются модели трансформерных эмбеддингов, в частности DINOv2 и CLIP, обеспечивающие получение устойчивых и семантически информативных представлений кадров, используемых для их последующего сравнения и выявления границ сцен. **Результаты.** В результате проведенного исследования был разработан многоступенчатый алгоритм разграничения видеолекций на сцены, основанный на использовании визуальных эмбеддингов кадров. Лучшим результатом обладают алгоритмы, основанные на модели DINOv2. Качество разграничения оценивалось путем сравнения предсказанных границ сцен с эталонной разметкой на основе метрик precision, recall и F1-score. **Заключение.** Значения указанных метрик подтверждают эффективность предложенного алгоритма при решении задачи автоматического разграничения видеолекций на сцены.

Ключевые слова: видеолекция, разграничение сцен, сегментация видеоданных, визуальные эмбеддинги, многомодельная обработка данных, трансформерные модели, анализ визуального содержания, автоматизированная обработка образовательного контента

Для цитирования: Исмагулов М.Е., Мельников А.В. Алгоритм сегментации сцен видеолекций на основе сравнения визуальных эмбеддингов кадров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr260201

AN ALGORITHM FOR VIDEO LECTURE SCENE SEGMENTATION BASED ON VISUAL FRAME EMBEDDING COMPARISON

M.E. Ismagulov¹, m_ismagulov@ugrasu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3280-5259>
A.V. Melnikov^{1, 2}, melnikovav@uriit.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1073-7108>

¹ Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

² Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

Abstract. With the rapid growth of educational content in the form of video lectures, the task of their automatic transformation into a written format often providing better comprehension has become increasingly relevant. Manual annotation of video lectures is highly labor-intensive, which necessitates the development of algorithmic methods for segmenting video lectures into semantically meaningful fragments based on visual analysis. **Objective.** To develop an algorithm for segmenting video lectures into scenes based on the comparison of visual embeddings of frames. The proposed approach is aimed at identifying temporal boundaries within a video lecture where visual content remains stable, allowing such intervals to be interpreted as scenes corresponding to logically complete fragments of instructional material. **Materials and Methods.** In modern research, automated processing of video lectures is often addressed using multi-modal large language models capable of capturing relationships between audio and visual information. However, the use of such models is associated with limitations related to interpretability, computational complexity, and data requirements. In this study, a multi-model video processing approach is employed, based on the separate analysis of lecture modalities using specialized models. This approach enables more accurate processing by accounting for the specific characteristics of each data type. For visual analysis, transformer-based embedding models, specifically DINOv2 and CLIP, are used to obtain stable and semantically informative representations of frames, which are then compared to detect scene boundaries. **Results.** As a result of the study, a multi-stage algorithm for segmenting video lectures into scenes based on visual frame embeddings was developed. The best performance was achieved by methods based on the DINOv2 model. The segmentation quality was evaluated by comparing predicted scene boundaries with ground truth annotations using precision, recall, and F1-score metrics. **Conclusion.** The obtained metric values confirm the effectiveness of the proposed algorithm for automatic segmentation of video lectures into scenes.

Keywords: video lecture, scene segmentation, video data segmentation, visual embeddings, multi-model data processing, transformer models, visual content analysis, automated processing of educational content

For citation: Ismagulov M.E., Melnikov A.V. An algorithm for video lecture scene segmentation based on visual frame embedding comparison. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(2):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260201

Введение

Задача автоматизированного мультимодального преобразования видеолекции в текстовый документ является актуальной в условиях роста объема цифрового образовательного контента и распространения дистанционного обучения [1, 2]. Видеолекция представляет собой сложный информационный объект, включающий аудио, визуальные материалы (слайды, записи на доске, демонстрации) и их временную динамику [3]. Существенная часть содержания распределена между различными модальностями и не может быть полноценно извлечена средствами одномодального анализа [4]. Существующие подходы, ориентированные преимущественно на автоматическую транскрипцию речи, не обеспечивают согласованную интеграцию аудиальных и визуальных данных, что приводит к потере семантической связности формируемого текста [5].

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенного метода для автоматизированной генерации структурированных текстовых представлений онлайн-курсов, подготовки учебно-методических материалов, а также протоколирования вебинаров, конференций и иных научно-образовательных мероприятий [6]. С учетом достигнутого уровня развития методов и моделей машинного и глубокого обучения, продемонстрировавших высокую эффективность при решении задач обработки речи, изображений и их совместного ана-

лиза, актуальной становится задача построения прикладных систем, интегрирующих данные модели в единый алгоритмический контур и обеспечивающих их согласованное функционирование в рамках конвейера [7].

В работе конвейера одной из ключевых задач является разделение видеолекции на сцены – временные интервалы, характеризующиеся семантической однородностью и отражающие завершённый этап изложения учебного материала [8]. Корректная сегментация на сцены обеспечивает локализацию смысловых фрагментов и формирует основу для последующего структурирования и иерархической организации текстового документа [9, 10].

В рамках исследования планируется обработка трех форматов видеолекций, на основе которых будет формироваться соответствующий набор данных. Выбор форматов основан на наиболее распространенных типах образовательных видеороликов, доступных на открытых видеохостингах:

- видеолекция «Лектор и сопровождающая презентация» – формат, в котором примерно 1/3 кадра занимает лектор, а оставшаяся часть отведена презентационным или иллюстративным материалам, отображающим краткое содержание речи лектора в данный момент времени;
- видеолекция «Презентация и закадровый голос» – один из наиболее популярных форматов на видеохостингах, поскольку он прост в реализации и не требует сложного оборудования для съемки. Такой формат основан на концепции «скринкаста» – записи рабочего стола компьютера с помощью специализированных программ;
- видеолекция «Лектор и маркерная или меловая доска» – формат, характерный для записи очных лекций, где основное внимание уделяется преподавателю и его работе с доской.

В статье представлена разработка алгоритмов сегментации видеолекций на сцены, адаптированных к трем различным по структурной организации форматам представления материала. Предложенные алгоритмы включают методы, основанные на анализе визуальных эмбеддингов [10, 11], применении адаптивных пороговых критериев [12], сравнении гистограмм изображений [13, 14], использовании перцептивных хешей [15] и других инструментов количественной оценки межкадровых различий, что позволяет учитывать как низкоуровневые визуальные признаки, так и более абстрактные семантические изменения сцены.

1. Математическая постановка задачи разграничения сцен видеолекции

Формализация данных. Пусть видео состоит из N кадров:

$$V = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}, f_i \in \mathbb{R}^{H \times W \times C},$$

где H, W, C – высота, ширина и количество каналов (обычно RGB). Каждый кадр можно преобразовать в вектор признаков через цветовые гистограммы или эмбеддинги.

Таким образом, видео представляется как последовательность признаков:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}, x_i \in \mathbb{R}^d.$$

Определение задачи. Разграничение на сцены – это поиск индексов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$, где каждый s_j – граница сцены (кадр, после которого начинается новая сцена). Цель: найти такие S , что кадры внутри сцены максимально похожи друг на друга, а кадры между сценами максимально различны.

Тогда функции сходства можно определить отдельно для каждого типа:

$$d_h(i, j) = \text{dist}_h(h_i, h_j), \quad d_e(i, j) = \text{dist}_e(e_i, e_j).$$

Для гистограмм в данном исследовании используется метрика «расстояния χ^2 »:

$$d_h(i, j) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \frac{(h_i^k - h_j^k)^2}{h_i^k + h_j^k}.$$

Для визуальных эмбеддингов в данном исследовании – евклидово расстояние или косинусное сходство:

$$d_e(i, j) = \|e_i - e_j\|_2^2 \quad \text{или} \quad d_e(i, j) = 1 - \cos(e_i, e_j).$$

Критерий сцены. Сцена изменяется там, где сходство резко падает:

$$s_j = \arg \max_i d(i, i + 1)$$

или с порогом θ :

$$s_j = \{i: d(i, i + 1) > \theta\}.$$

В качестве порога различимости используется адаптивный порог MAD (Median Absolute Deviation), применение которого позволяет сделать алгоритм более устойчивым к выбросам и шуму в кадрах. То есть задача сводится к определению порога различия или нахождению локальных максимумов функции различий.

Пусть у нас есть последовательность различий между соседними кадрами:

$$D = \{d_{\text{total}}(1,2), d_{\text{total}}(2,3), \dots, d_{\text{total}}(N-1, N)\}.$$

Тогда медианная абсолютная девиация вычисляется как

$$\text{MAD} = \text{median}(|D_i - \text{median}(D)|).$$

Порог можно задать как кратное MAD:

$$\theta = \text{median}(D) + k \cdot \text{MAD}, k \geq 1,$$

где k – коэффициент, регулирующий чувствительность детектора границ. При этом малое k значит больше границ, чувствительно к мелким изменениям, если большое k , то менее чувствительно, выделяются только резкие изменения.

Тогда формула границы сцены принимает вид:

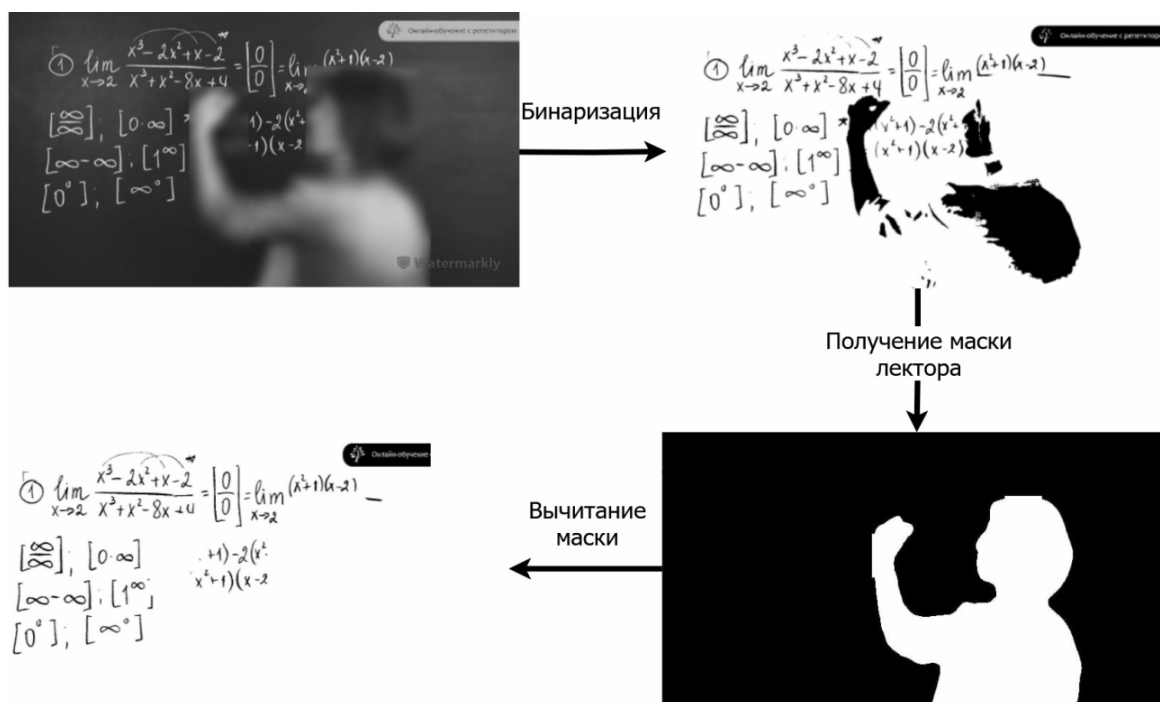
$$s_j = \{i: d_{\text{total}}(i, i+1) > \text{median}(D) + k \cdot \text{MAD}\}.$$

В рамках исследования коэффициент k взят по самому низкому порогу, так как это нивелируется особенностями многоступенчатого алгоритма, что будет подробно изложено в следующих разделах.

2. Методы и модели решения задачи

В качестве методологической основы исследования использованы алгоритмы, методы и модели машинного и глубокого обучения в сочетании с методом абстрагирования данных, направленным на выделение устойчивых компонент визуального содержания видеолекции.

Абстрагирование реализовано посредством исключения динамически изменяемых объектов сцены (в частности, фигуры лектора) с целью формирования целостного и инвариантного представления ключевой информационной области – доски или презентационного материала (рис. 1). Это позволило минимизировать влияние несущественных изменений и снизить внутрисценную дисперсию признаков.



Источник: видео TutorOnline (<https://youtu.be/I9TSR9rrwxQ>), авторские права принадлежат TutorOnline

Рис. 1. Схема процесса абстрагирования лектора
Fig. 1. Lecturer abstraction process scheme

Для извлечения семантически значимых признаков кадров применялись предобученные модели визуальных трансформеров – DINOv2 и CLIP, формирующие эмбеддинги в латентном пространстве высокой размерности. Обнаружение границ сцен осуществлялось посредством анализа расстояний между эмбеддингами соседних кадров, что позволило формализовать задачу разграничения как задачу детекции значимых изменений распределения визуальных признаков во времени.

3. Описание конвейеров, адаптированных под разные форматы видеолекции

Архитектура конвейера обработки видеолекций носит адаптивный характер и конфигурируется в зависимости от структурного формата исходного видеоматериала. Для различных типов видеолекций ядро конвейера включает различный набор моделей и алгоритмических процедур.

Для видеолекции формата «Лектор и презентация» конфигурация конвейера обработки определяется совокупностью этапов, представленных на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм разграничения сцен для видеолекции «Лектор и презентация»
Fig. 2. Scene segmentation algorithm for the “Lecturer and presentation” video lecture

На первом этапе применяется модель детекции объектов YOLOv8 Small, обеспечивающая локализацию области лектора в кадре с целью последующего абстрагирования. Далее в качестве ядра конвейера используется алгоритм сравнения гистограмм изображений из библиотеки PySceneDetect с пониженным пороговым коэффициентом, что позволяет выполнить грубое первичное определение границ сцен. На втором этапе применяется алгоритм перцептивного хеширования pHash, предназначенный для выявления и объединения дублирующих сцен, а также выбора уникального репрезентативного кадра.

Алгоритм обработки видеолекций типа «Презентация и закадровый голос» структурно идентичен конвейеру, применяемому для формата «Лектор и презентация», за исключением этапа сегментации и последующего абстрагирования лектора (рис. 3). Отсутствие визуального присутствия докладчика в кадре исключает необходимость использования модели сегментации, что упрощает вычислительную схему и снижает совокупную сложность обработки без изменения логики последующих этапов детектирования и уточнения границ сцен.

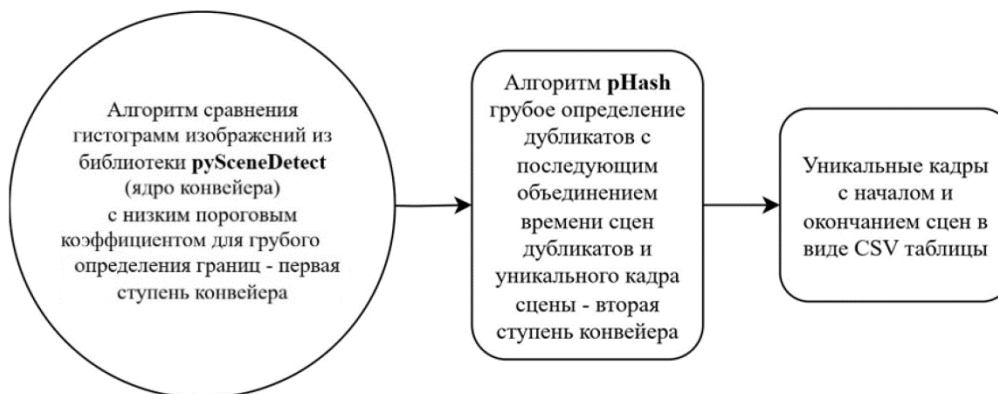


Рис. 3. Алгоритм разграничения сцен для видеолекции «Презентация и закадровый голос»
Fig. 3. Scene segmentation algorithm for the “Presentation and voice-over” video lecture

В рамках предложенного конвейера обработки видеоданных на первом этапе применяется модель сегментации YOLOv8 Seg Small для выделения контурной маски лектора с целью последующего абстрагирования его области в кадре (рис. 4). Далее осуществляется грубое детектирование границ сцен на основе визуальных эмбедингов DINOv2 с использованием адаптивного порога, вычисляемого по метрике MAD. На следующем этапе выполняется уточнение сцен за счет сглаживания сигнала отношения эмбедингов методом медианной фильтрации, что позволяет подавить локальные флуктуации и стабилизировать процедуру пороговой сегментации. Завершающим шагом является дедупликация кадров алгоритмом перцептивного хеширования (pHash), в результате чего формируется таблица уникальных сцен с указанием временных интервалов их начала и окончания в формате CSV.

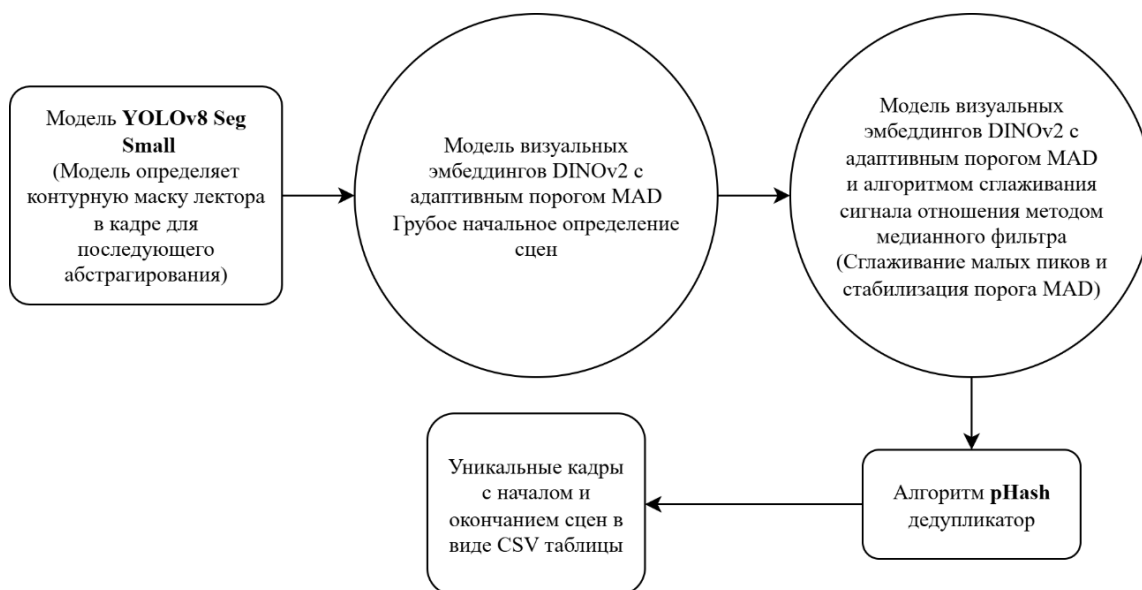


Рис. 4. Алгоритм разграничения сцен для видеолекции «Лектор и доска» на основе визуальных эмбедингов модели DINOv2
Fig. 4. Scene segmentation algorithm for the “Lecturer and board” video lecture based on visual embeddings of the DINOv2 model

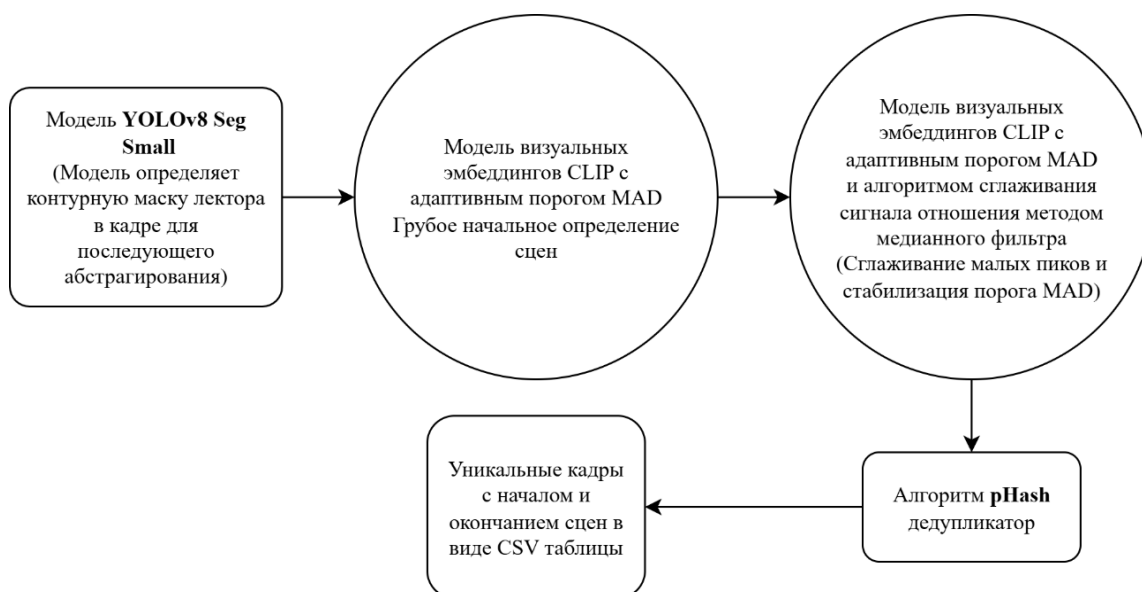


Рис. 5. Алгоритм разграничения сцен для видеолекции «Лектор и доска» на основе визуальных эмбедингов модели CLIP
Fig. 5. Scene segmentation algorithm for the “Lecturer and board” video lecture based on visual embeddings of the CLIP Model

Конвейер с использованием модели CLIP реализован в структурно идентичной конфигурации по отношению к варианту на основе DINOv2 (рис. 5). Сохранение неизменной архитектуры обработки, включая методы расчета сигнала сходства, адаптивного порога (MAD) и процедуры сглаживания, необходимо для обеспечения корректности сравнительного анализа. Такой подход позволяет изолировать влияние типа визуальных эмбедингов на итоговые метрики качества сегментации.

4. Набор данных

В качестве экспериментального корпуса были отобраны видеоматериалы нескольких онлайн-курсов, размещенных на платформах массовых открытых онлайн-курсов – Coursera и Stepik, а также на открытых видеохостингах, включая RuTube и VK Video. Совокупный объем выборки составляет 20 видеозаписей, из которых 10 относятся к формату «Лектор и презентация» со средним хронометражем порядка 15 мин, 8 – к формату «Лектор и доска» со средним хронометражем около 30 мин, и 2 – к формату «Презентация и закадровый голос» продолжительностью свыше 1 ч. Такой состав выборки обеспечивает вариативность визуальной структуры видеоряда и позволяет провести сопоставимый анализ эффективности алгоритмов для различных типов лекционного контента.

5. Результаты и обсуждение

Анализ сигналов изменения динамики кадров показывает, что при отсутствии медианной фильтрации (рис. 6) наблюдаются выраженные высокоамплитудные пики и повышенная частота их возникновения. Это приводит к росту оценки дисперсии сигнала и, как следствие, к увеличению адаптивного порога, вычисляемого по метрике MAD. Включение медианного фильтра (рис. 7) подавляет локальные выбросы и снижает влияние кратковременных флуктуаций, что приводит к стабилизации сигнала и формированию более выраженной квазипрямоугольной структуры на участках смены сцен. В результате кластеры, соответствующие границам сцен, становятся более компактными и однородными, а значение порога MAD снижается, повышая чувствительность алгоритма к устойчивым структурным изменениям видеоряда при одновременном подавлении шумовых переходов.

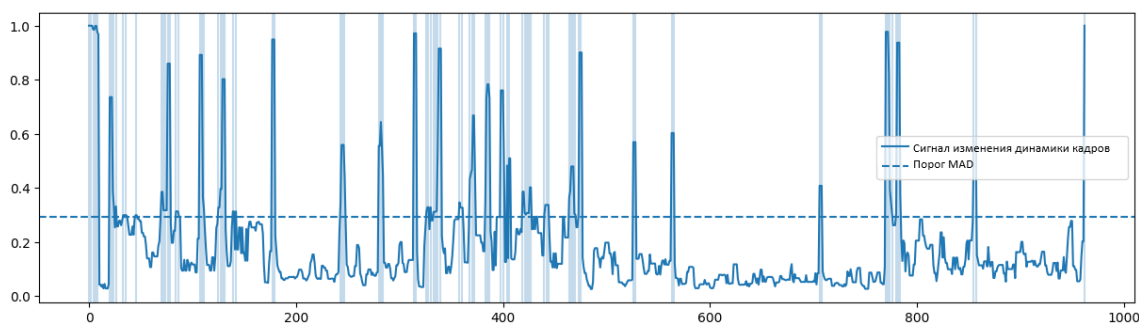


Рис. 6. Сигнал визуальных эмбедингов DINOv2 без медианного сглаживания, с более высоким порогом MAD

Fig. 6. DINOv2 visual embedding signal without median smoothing, with a higher MAD threshold

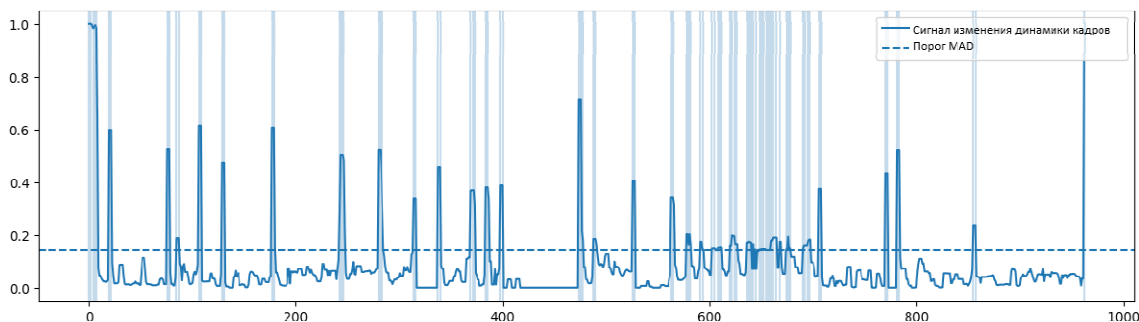


Рис. 7. Сигнал визуальных эмбедингов DINOv2 с наличием медианного сглаживания, с более низким порогом MAD

Fig. 7. DINOv2 visual embedding signal with median smoothing, with a lower MAD threshold

Для эмбедингов CLIP также наблюдается эффект стабилизации сигнала при применении медианной фильтрации, что подтверждается прямым сравнением графиков (рис. 8, 9). Однако в отличие от DINOv2, подавление мелких пиков выражено слабее. Это обусловлено большей чувствительностью эмбедингов CLIP к локальным визуальным и семантическим изменениям (текст на слайде, мелкие объекты, незначительные перестройки композиции), что приводит к сохранению части высокочастотных флуктуаций даже после сглаживания [16]. В результате вклад выбросов в оценку разброса остается выше, а снижение адаптивного порога MAD оказывается менее выраженным по сравнению с вариантом на основе DINOv2 [17].

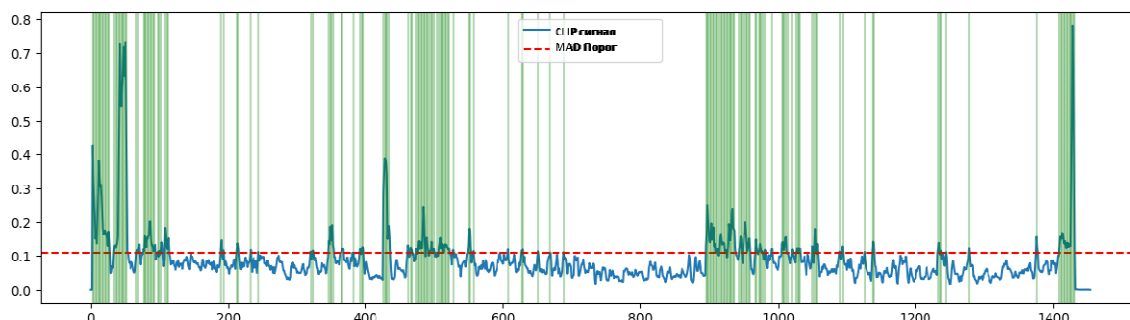


Рис. 8. Сигнал визуальных эмбедингов CLIP без медианного сглаживания, с более высоким порогом MAD

Fig. 8. CLIP visual embedding signal without median smoothing, with a higher MAD threshold

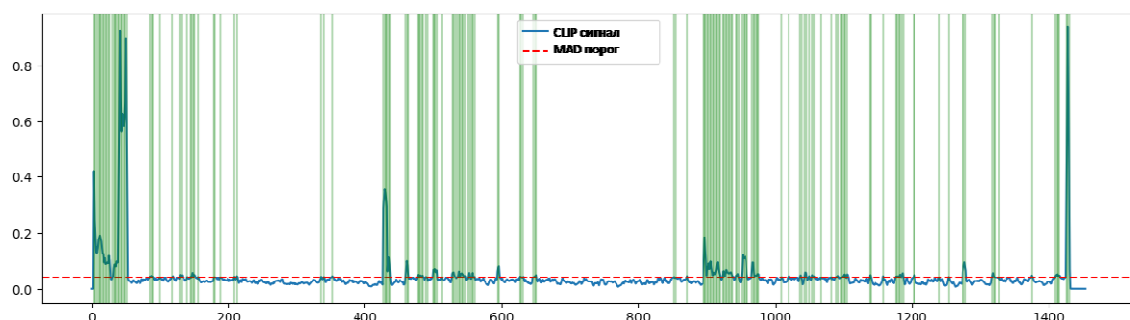


Рис. 9. Сигнал визуальных эмбедингов CLIP с наличием медианного сглаживания, с более низким порогом MAD

Fig. 9. CLIP visual embedding signal with median smoothing, with a lower MAD threshold

Сравнительный анализ распределения границ сцен показывает, что для DINOv2 (голубые вертикальные маркеры) характерно формирование более устойчивых и компактных кластеров без выраженных разрывов. Границы сцен группируются в плотные интервалы, соответствующие устойчивым структурным изменениям видеоряда. В случае CLIP (зеленые маркеры) наблюдается большая фрагментация: внутри одного и того же перехода фиксируются дополнительные срабатывания, что приводит к разреженности кластеров и появлению промежуточных разрывов. Данное различие указывает на более высокую устойчивость DINOv2 к локальным и семантически несущественным вариациям изображения, что положительно сказывается на стабильности детектирования сцен.

Для оценки качества детектирования сцен использовались стандартные метрики precision, recall и F1-score. Сравнительный анализ проводился на основе сопоставления предсказанных моделью границ сцен с вручную размеченной эталонной разметкой. Для нивелирования неточности ручной разметки была введена разница времени, равная 2 с. Истинно положительными считались детекции, совпадающие с размеченными переходами в пределах заданного временного допуска; ложноположительные и ложноотрицательные срабатывания определялись соответственно как избыточные или пропущенные границы. Такой подход позволяет количественно оценить как точность локализации переходов, так и полноту их обнаружения.

Результаты количественной оценки демонстрируют принципиально различный характер поведения моделей.

Для конвейера обработки видеолекций формата «Лектор и презентация» получены следующие значения показателей качества: $precision = 0,948$, $recall = 0,987$ и $F1 - score = 0,967$. Достиженные результаты указывают на высокую корректность выделения временных границ сцен, что объясняется сравнительно простой и структурно однородной визуальной композицией видеоматериала данного типа.

Для формата «Презентация и закадровый голос» зафиксированы значения $precision = 0,963$, $recall = 0,977$ и $F1 - score = 0,971$. Максимальные показатели качества в данном случае обусловлены упрощённой архитектурой конвейера, поскольку отсутствует необходимость обработки и сегментации образа лектора, что снижает вариативность визуальных данных и упрощает задачу детектирования сцен.

Для CLIP при $\Delta t = 2,0$ с получены следующие значения:
 $precision = 0,214$; $recall = 0,949$; $F1 - score = 0,349$.

Высокое значение $recall$ указывает на то, что модель практически не пропускает реальные границы сцен. Однако крайне низкий $precision$ свидетельствует о значительном числе ложноположительных срабатываний. Это означает, что модель чрезмерно чувствительна к локальным визуальным и семантическим изменениям, вследствие чего происходит избыточное дробление сцен. На практике это проявляется в формировании большого количества коротких фрагментов и мелких кластеров кадров.

Для DINOv2 при том же допуске $\Delta t = 2,0$ с получены:
 $precision = 0,653$; $recall = 0,821$; $F1 - score = 0,727$.

Здесь наблюдается более сбалансированное соотношение метрик. Незначительное снижение $recall$ компенсируется существенным ростом $precision$, что приводит к двукратному увеличению меры $F1$ по сравнению с CLIP. Практически это означает, что модель реже генерирует ложные границы, формируя более устойчивые и укрупненные кластеры сцен, соответствующие реальным структурным переходам видеоряда.

Заключение

В ходе исследования разработаны и экспериментально апробированы конвейеры детектирования сцен для различных форматов видеолекций, основанные на использовании визуальных эмбеддингов CLIP и DINOv2 с адаптивной пороговой сегментацией (MAD) и процедурой медианного сглаживания сигнала. Проведенный аналитический и численный анализ показал, что применение медианной фильтрации снижает влияние локальных выбросов и стабилизирует сигнал изменения эмбеддингов, что положительно влияет на устойчивость выделения границ сцен. Сравнительная оценка по метрикам $precision$, $recall$ и $F1$ продемонстрировала принципиальные различия моделей: при высокой полноте CLIP характеризуется значительным числом ложноположительных срабатываний и избыточным дроблением сцен ($F1 - score = 0,349$), тогда как DINOv2 обеспечивает более сбалансированное соотношение точности и полноты ($F1 - score = 0,727$), формируя устойчивые и структурно согласованные кластеры сцен.

К достоинствам предложенного решения относится модульная архитектура конвейера, инвариантность к формату видеолекции, адаптивность пороговой процедуры и возможность корректного сравнительного анализа различных типов эмбеддингов в идентичных условиях. Практическая значимость работы заключается в повышении качества автоматической структуризации видеоконтента, что может быть использовано при формировании конспектов лекций, индексировании образовательных видеоматериалов и построении систем мультимодального поиска. Перспективы дальнейших исследований связаны с гибридизацией эмбеддингов и интеграцией сценной сегментации в более сложные мультимодальные пайплайны анализа видеоданных.

Список литературы/References

1. Коробкин Д.М. Система автоматического субтитрования видеофайлов // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2022. № 2. С. 23–27. [Korobkin D.M. System of automatic subtitling of video files. *System Analysis in Science and Education*. 2022;(2):23–27. (In Russ)]. Available at: <http://sanse.ru/download/469>.
2. Market.us. Digital Education Content Market Size: CAGR of 26.1%. Available at: <https://market.us/report/digital-education-content-market/> (accessed 25 February 2026).

3. Lee D.W., Ahuja C., Liang P.P., Natu S., Morency L.-P. Lecture Presentations Multimodal Dataset: Towards Understanding Multimodality in Educational Videos. In: *2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Paris, France, 2023. P. 20030–20041. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.01838
4. Mayer R.E. *Multimedia Learning*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. 416 p.
5. Khosravi H., Denny P., Moore S., Stamper J. Learnersourcing in the Age of AI: Student, Educator and Machine Partnerships for Content Creation. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2023;5:100151. DOI: 10.1016/j.caeai.2023.100151
6. Freisinger S., Schneider F.P., Herygers A., Georges M., Bocklet T., Riedhammer K. Unsupervised Multilingual Topic Segmentation of Video Lectures: What can Hierarchical Labels tell us about the Performance? In: *Conference: SLATE 2023 (9th Workshop on Speech and Language Technology in Education)*. Dublin, Ireland, 2023. DOI: 10.21437/SLATE.2023-27
7. Kubala F., Colbath S., Liu D., Srivastava A., Makhoul J. Integrated Technologies for Indexing Spoken Language. *Communications of the ACM*. 2000;43(2):48–56. DOI: 10.1145/328236.328146
8. Tseng S.M., Yeh Z.T., Wu C.Y., Chang J.B., Norouzi M. Video Scene Detection Using Transformer Encoding Linker Network (TELNet). *Sensors*. 2023;23(16):7050. DOI: 10.3390/s23167050
9. Chen S., Nie X., Fan D., Zhang D., Bhat V., Hamid R. Automatically Identifying Scene Boundaries in Movies and TV Shows. *Amazon Science*. Available at: <https://www.amazon.science/blog/automatically-identifying-scene-boundaries-in-movies-and-tv-shows> (accessed 26 February 2026).
10. Mun J., Shin M., Han G., Lee S., Ha S.J., Lee J., Kim E.S. Boundary-Aware Self-Supervised Learning for Video Scene Segmentation. *ArXiv preprint: arXiv:2201.05277*. 2022. Available at: <https://arxiv.org/abs/2201.05277> (accessed 26 February 2026).
11. Berman N., Botach A., Ben-Baruch E., Hakimi S.H., Gendler A., Naiman I., Yosef E., Kviatkovsky I. Scene-VLM: Multimodal Video Scene Segmentation via Vision-Language Models. *ArXiv preprint: arXiv:2512.21778*. 2025. Available at: <https://arxiv.org/abs/2512.21778> (accessed 26 February 2026).
12. Raja Suguna M., Kalaivani A., Anusuya S. The Detection of Video Shot Transitions Based on Primary Segments Using the Adaptive Threshold of Colour-Based Histogram Differences and Candidate Segments Using the SURF Feature Descriptor. *Symmetry*. 2022;14(10):2041. DOI: 10.3390/sym14102041
13. Kar T., Kanungo P., Mohanty S.N. et al. Video Shot-Boundary Detection: Issues, Challenges and Solutions. *Artificial Intelligence Review*. 2024;57:104. DOI: 10.1007/s10462-024-10742-1
14. Zhou S., Wu X., Qi Y. et al. Video Shot Boundary Detection Based on Multi-Level Features Collaboration. *Signal, Image and Video Processing*. 2021;15:627–635. DOI: 10.1007/s11760-020-01785-2
15. PySceneDetect. Detection Algorithms. *PySceneDetect Documentation*. Available at: <https://www.scenesdetect.com/docs/latest/api/detectors.html> (accessed 26 February 2026).
16. Lavoie M.A., Mahmoud A., Zaimi A. et al. CLIP Is Shortsighted: Paying Attention Beyond the First Sentence. *ArXiv preprint: arXiv:2602.22419*. 2026. Available at: <https://arxiv.org/abs/2602.22419> (accessed 2 March 2026).
17. Oquab M., Darcet T., Moutakanni T. et al. DINOv2: Learning Robust Visual Features without Supervision. *ArXiv preprint: arXiv:2304.07193*. 2024. Available at: <https://arxiv.org/abs/2304.07193> (accessed 2 March 2026).

Информация об авторах

Исмагулов Милан Ерикович, аспирант 3-го года обучения по направлению 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», Инженерная школа цифровых технологий, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; m_ismagulov@ugrasu.ru.

Мельников Андрей Витальевич, д-р техн. наук, проф., Инженерная школа цифровых технологий, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; директор, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; melnikovav@uriit.ru.

Information about the authors

Milan E. Ismagulov, 3rd year postgraduate student in the field of 2.3.1 “Systems analysis, management and information processing, statistics”, Engineering School of Digital Technologies, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; m_ismagulov@ugrasu.ru.

Andrey V. Melnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Engineering School of Digital Technologies, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; Director, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; melnikovav@uriit.ru.

Вклад авторов: авторы принимали участие во всех этапах подготовки статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors participated in all stages of the preparation of the manuscript.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.03.2026

The article was submitted 03.03.2026

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья
УДК 004.032.26
DOI: 10.14529/ctcr260202

АДАПТИВНЫЙ ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ ЛОКАЛИЗАЦИИ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ОЦЕНКОЙ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.А. Замышляева, zamyshliaevaaa@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4530-4820>

А.А. Кузнецов, kuznetsovaa@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В условиях повышения требований к точности и надежности навигации летательных аппаратов (ЛА) при наличии в видеопотоке шумов различной природы актуальной является задача разработки алгоритмов, сочетающих высокую работоспособность нейросетевых методов в сложных условиях видеосъемки с высокой точностью классических подходов в благоприятных условиях. **Цель исследования:** разработать и валидировать адаптивный гибридный алгоритм. Данный алгоритм должен комбинировать помехоустойчивую нейросетевую детекцию (на базе LND-Net) с субпиксельным уточнением классическими методами (алгоритм Canny) на основе анализа локального качества изображения, повышая надежность навигации в сложных условиях. **Материалы и методы.** Предложен гибридный подход, в котором первичные координаты ключевых точек (углов маркеров) определяются нейронной сетью (LND-Net). Для оценки качества изображения в окрестности каждой точки (область 10×10 пикселей) применяется критерий бимодальности гистограммы яркости. При наличии выраженной бимодальности активируется классический контур: применяются адаптивные пороги по методу Otsu и детектор границ Canny для уточнения координат. В зашумленной среде (унимодальное распределение) координаты от нейросети используются без изменений. Для инвариантной к масштабу оценки точности локализации введена метрика SIOKS. Валидация проводилась на наборах данных, включающих эталонные изображения и кадры с синтетическими помехами (гауссов шум, размытие, туман), а также в условиях частичного перекрытия маркера. **Результаты.** Проведен анализ влияния качества изображения на локализационные ошибки (с использованием метрики SIOKS). Показано, что предложенный гибридный алгоритм сохраняет точность, близкую к классическим методам в идеальных условиях (средняя SIOKS $\sim 0,010-0,013$), и сохраняет работоспособность в зашумленных средах, где классические методы отказывают, полагаясь на помехоустойчивый нейросетевой компонент. **Заключение.** Разработанный адаптивный алгоритм успешно разрешает фундаментальный компромисс между субпиксельной точностью классических методов компьютерного зрения и высокой помехоустойчивостью нейронных сетей. Предложенный критерий бимодальности гистограммы доказал свою эффективность в качестве быстрого и надежного триггера для переключения режимов обработки в реальном времени. Обоснована методика валидации, связывающая пиксельную точность с анализом локального качества изображения, что имеет критическое значение для корректной работы бортовых систем видеонаблюдения и навигации летательных аппаратов.

Ключевые слова: оценка точности, нейронные сети, компьютерное зрение, летательный аппарат, навигация, графические маркеры, ключевые точки, бортовые системы видеонаблюдения

Для цитирования: Замышляева А.А., Кузнецов А.А. Адаптивный гибридный алгоритм локализации ключевых точек для навигации летательного аппарата с оценкой качества изображения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 16–29. DOI: 10.14529/ctcr260202

ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF LOCALIZATION OF KEY POINTS OF REFERENCE MARKERS BY A NEURAL NETWORK ALGORITHM WHEN ANALYZING VIDEO FROM ON-BOARD CAMERAS OF AN AIRCRAFT

A.A. Zamyshlyayeva, zamyshliaevaaa@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4530-4820>

A.A. Kuznetsov, kuznetsovaa@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. In the context of increasing requirements for the accuracy and reliability of aircraft navigation in the presence of various types of noise in the video stream, the problem of developing algorithms that combine the high performance of neural network methods in complex video shooting conditions with the high accuracy of classical approaches in favorable conditions is highly relevant. **Aim.** To develop and validate an adapted hybrid algorithm. This algorithm should combine noise-robust neural network detection (based on LND-Net) with subpixel refinement of classical methods (the Canny algorithm) based on local image quality analysis, increasing detection reliability in challenging conditions. **Materials and methods.** A hybrid approach is proposed in which the primary coordinates of keypoints (marker corners) are determined by a neural network (LND-Net). A bimodality criterion for the brightness histogram is used to assess image quality in the vicinity of each point (a 10×10 pixel region). In the presence of pronounced bimodality, a classical contour is activated: adaptive thresholds based on the Otsu method and a Canny edge detector are used to refine the coordinates. In a noisy environment (unimodal distribution), the coordinates from the neural network are used unchanged. The SIOKS metric is introduced for scale-invariant localization accuracy assessment. Validation was conducted on datasets including reference images and frames with synthetic noise (Gaussian noise, blur, and fog), as well as under conditions of partial marker occlusion. **Results.** An analysis of the impact of image quality on localization errors (using the SIOKS metric) is conducted. It is shown that the proposed hybrid algorithm maintains accuracy close to that of classical methods under ideal conditions (average SIOKS ~ 0.010 – 0.013) and ensures robust operation in noisy environments where classical methods fail, relying on a robust neural network component. **Conclusion.** The developed adaptive algorithm successfully resolves the fundamental tradeoff between the subpixel accuracy of classical computer vision methods and the high noise immunity of neural networks. The proposed histogram bimodality criterion has proven its effectiveness as a fast and reliable trigger for switching processing modes in real time. A validation methodology linking pixel accuracy with local image quality analysis is substantiated, which is critical for the correct operation of onboard video surveillance and aircraft navigation systems.

Keywords: accuracy assessment, neural networks, computer vision, aircraft, navigation, graphic markers, key points, onboard video surveillance systems

For citation: Zamyshlyayeva A.A., Kuznetsov A.A. Assessment of the accuracy of localization of key points of reference markers by a neural network algorithm when analyzing video from on-board cameras of an aircraft. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(2):16–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260202

Введение

В настоящее время бортовые системы видеонаблюдения летательных аппаратов становятся неотъемлемой частью современных систем навигации и стабилизации [1]. Одной из ключевых задач таких систем является точное определение положения и ориентации летательного аппарата относительно опорных графических маркеров, размещаемых на земле или на целевых объектах [2]. Традиционные методы (например, детекторы ArUco) теряют эффективность в условиях шумов, размытия и сложного освещения [3]. Напротив, нейросетевые подходы демонстрируют высокую работоспособность за счет возможности аппроксимировать сложные нелинейные зависимости [4, 5], однако часто уступают в точности локализации в идеальных условиях. Этим объясняется высокий интерес исследователей и разработчиков к использованию сверточных (CNN) и трансформерных архитектур нейронных сетей для решения задач компьютерного зрения на борту летательных аппаратов, в том числе для локализации объектов и ключевых точек [6]. В данном контексте под объектами понимаются целевые элементы сцены (например, визуальные маркеры),

относительно которых осуществляется навигация. Ключевыми точками называют характерные, локально уникальные особенности этих объектов (в данном исследовании – углы маркеров), корректная детекция которых на изображении позволит восстановить положение в пространстве летательного аппарата.

Однако применение нейросетевых алгоритмов порождает новую задачу – необходимость оценки погрешности определения координат ключевых точек [7]. Эта оценка критична для последующего использования координат маркеров при коррекции навигационной системы летательного аппарата. Ошибки в определении положения ключевых точек в видеопотоке напрямую трансформируются в ошибки навигационного решения, что может привести к недопустимым отклонениям от заданной траектории полета и нестабильности в контуре управления [8]. При этом степень влияния ошибок локализации маркеров на точность навигации зависит не только от абсолютной величины ошибок обнаружения, но и от их статистических характеристик, распределения ошибок по различным комбинациям условий съемки, а также от применяемых методов фильтрации и интеграции измерений на борту, таких как расширенный фильтр Калмана для комлексирования данных и видеосистемы [9, 10].

Целью исследования является повышение точности и надежности навигации БПЛА в сложных условиях посредством создания адаптивного гибридного алгоритма, комбинирующего нейросетевую детекцию [11] с уточнением классическими методами на основе анализа локального качества изображения. В статье рассмотрены вопросы формирования тестовых наборов данных, содержащих синтетические и реальные видеозаписи с маркерами [12], введена формализованная метрика для инвариантной к масштабу оценки точности детекции, проведена систематизация источников ошибок при обнаружении ключевых точек, а также обоснована необходимость и методика проведения валидации нейросетевого алгоритма применительно к задачам коррекции навигационной системы летательного аппарата.

1. Алгоритм анализа зашумленных видеоданных

Ранее в исследовании [11] авторами была продемонстрирована высокая работоспособность модифицированной сети YOLOv11 (LND-Net) при наличии сильных атмосферных помех. Однако анализ выявил, что данная помехоустойчивость достигается ценой снижения точности и появления систематического смещения в определении координат в идеальных условиях, где традиционные алгоритмы работают точнее, но теряют работоспособность при определенном уровне шума.

Очевидно, что ни один из подходов не является универсальным решением. Это подводит нас к необходимости разработки адаптивного гибридного алгоритма, который сочетал бы в себе сильные стороны обоих методов: высокую точность классических алгоритмов в благоприятных условиях и отказоустойчивость нейросетевой детекции в зашумленной среде. Идея состоит в том, чтобы делегировать принятие решения о выборе метода специализированному блоку оценки качества изображения. Однако глобальная оценка всего кадра малоэффективна, поскольку помехи могут быть локальными. Для принятия решения о переключении между нейросетевым и классическим режимом (уточнением) в реальном времени требуется быстрая и надежная метрика оценки локального качества изображения в окрестности ключевой точки. Сравнительный анализ метрик качества на валидационной выборке показал преимущество использования критерия бимодальности (анализ гистограммы яркости, надежность > 94 %) перед метриками резкости (лапласиан, ~ 85 %) и локального контраста (RMS, ~ 91 %), что и определило выбор метода. Предлагается проверка критерия бимодальности распределения в окрестности каждой потенциальной ключевой точки, детектированной нейронной сетью. Сеть, разработанная в [11], обладая высокой помехоустойчивостью, выступает в роли «постановщика задачи»: она предоставляет первоначальные, пусть и не всегда самые точные, координаты ключевых точек. Эти координаты затем используются как центры областей интереса для более детального анализа. Для оценки качества изображения в окрестностях ключевых точек предлагается использовать анализ формы гистограммы яркости. Функциональная схема разработанного гибридного метода, иллюстрирующая потоки данных и логику переключения между нейросетевым и классическим контурами обработки, представлена на рис. 1. Детальный алгоритм работы блока «Анализ гистограммы», основанный на проверке критериев бимодальности, подробно описан в разделе «Блок оценки качества изображения».

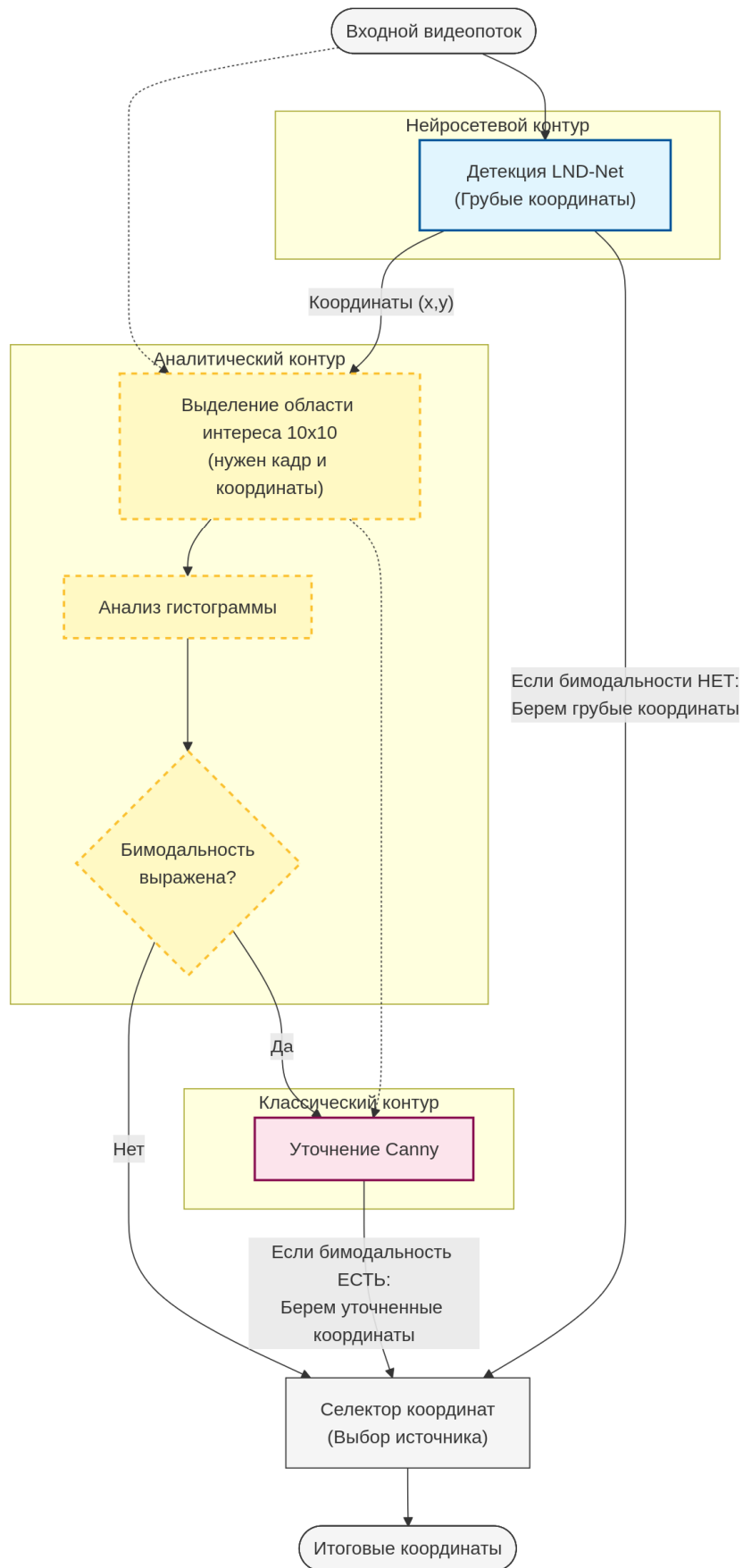


Рис. 1. Функциональная схема адаптивного гибридного алгоритма
Fig. 1. Functional diagram of the adaptive hybrid algorithm

Блок оценки качества изображения

В качестве примера, иллюстрирующего логику работы блока оценки качества изображения, рассмотрим этап детекции ключевых точек навигационного маркера. Под ключевыми точками в данной задаче понимаются углы контрастного маркера. Сам маркер необходим как референсный объект с заранее известными размерами, что позволит через решение задачи PnP (Perspective-n-Point) однозначно восстанавливать положение и ориентацию летательного аппарата в пространстве. На рис. 2 представлено исходное входное изображение высокого качества без помех, в центре которого расположен целевой навигационный маркер.

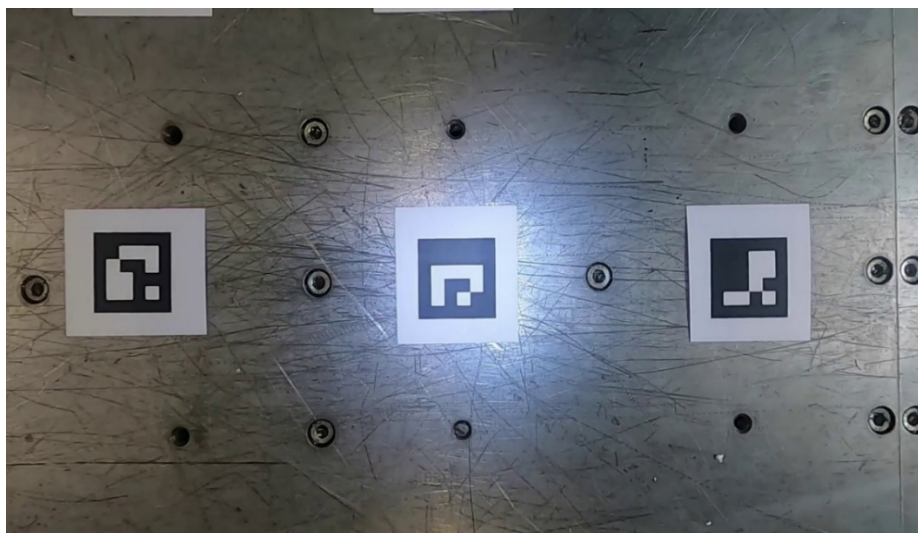


Рис. 2. Изображение без шумов
Fig. 2. Noise-free image

Для принятия решения о том, что изображение не имеет значительных помех и классические алгоритмы обеспечат более высокую точность, проводится анализ локальных областей вокруг ключевых точек (рис. 3), детектированных нейронной сетью. В качестве метрики используется анализ гистограммы яркости и текстуры в окрестности каждой точки.

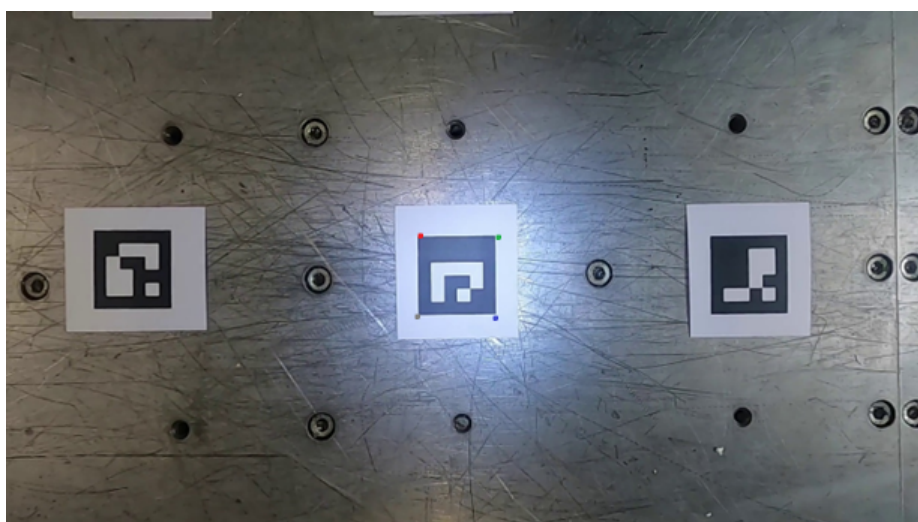


Рис. 3. Изображение с навигационными точками, полученные через нейросеть
Fig. 3. An image with navigation points obtained through a neural network

Вокруг координат, предсказанных нейросетью, формируется область интереса размером 10×10 пикселей, как проиллюстрировано на рис. 4 (верхние фрагменты). Данная размерность выбрана экспериментально как оптимум: выборка из 100 пикселей статистически достаточна для

формирования репрезентативной гистограммы и идентификации бимодальности, но при этом минимизирует вероятность захвата посторонних объектов фона, характерную для окон большего размера. Оценка вычислительных затрат на целевой платформе NVIDIA Jetson Orin NX показала, что анализ гистограммы для выбранной области занимает менее 10 мкс ($< 0,01$ мс). Это значение на три порядка меньше времени обработки одного кадра используемой нейросети LND-Net, которое составляет ~ 18 – 22 мс. Столь низкие накладные расходы (менее 0,1 % от времени обработки кадра) гарантируют работу алгоритма в реальном времени без внесения ощутимых задержек в контур управления бортового вычислителя.



Рис. 4. Окрестности ключевых точек
Fig. 4. The vicinity of key points

Как видно из нижних фрагментов, представленных на рис. 4, выделенные окрестности предварительно конвертируются в полутоновое представление для алгоритма оценки гистограммы яркости. Размер окна 10×10 также выполняет функцию неявного пространственного фильтра: если вследствие расфокусировки, смаза движения или других шумов ширина переходной зоны градиента становится сопоставимой с размером окна, более 3–5 пикселей, гистограмма теряет бимодальность, вырождаясь в унимодальное распределение «серых» тонов. В этом случае система классифицирует область как непригодную для классического уточнения и сохраняет нейросетевую оценку, избегая генерации ложных координат на размытых границах. Пример гистограммы яркости окрестности ключевой точки показан на рис. 5.

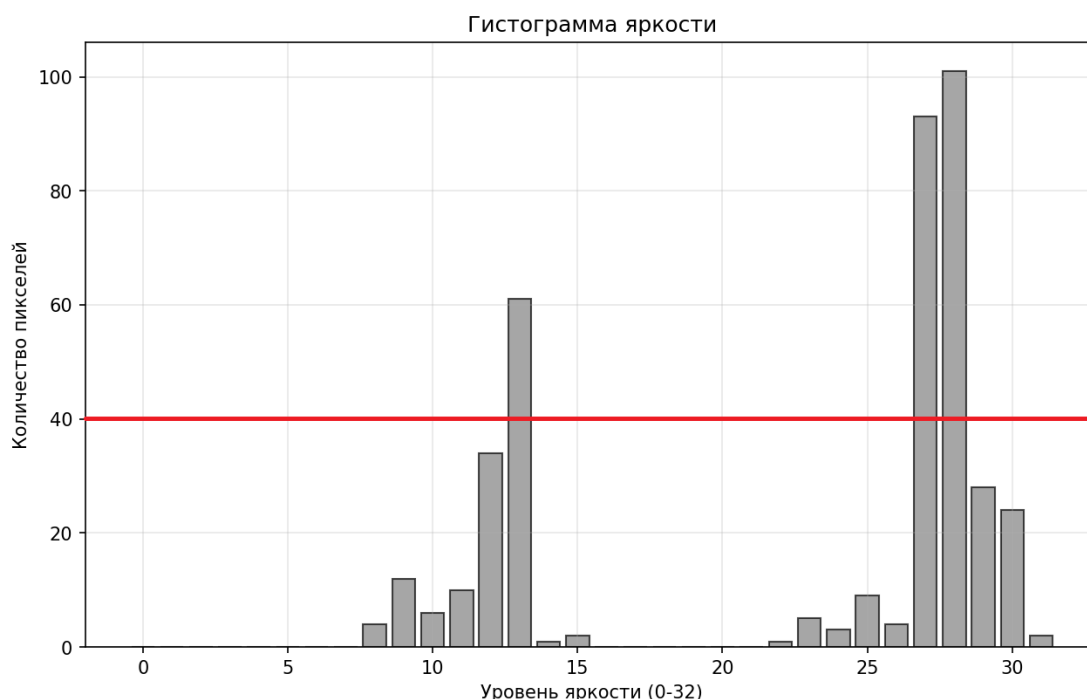


Рис. 5. Гистограмма яркости окрестности ключевой точки
Fig. 5. Histogram of the brightness of the key point neighborhood

Как показано на рис. 5, в благоприятных условиях гистограмма характеризуется выраженной бимодальностью: два пика (чёрная и светлая части маркера) четко разделены областью низких значений – «долиной». Для исключения шума квантования учитываются только локальные максимумы, превышающие адаптивный порог ($\frac{1}{5}$ от высоты гистограммы). Наличие глубокой доли-

ны между пиками подтверждает высокую контрастность границы, необходимую для работы классических алгоритмов.

Анализ гистограммы проводится следующим образом. Пусть $H(i)$ – количество пикселей с яркостью i . Для устранения шума квантования выполняется сглаживание гистограммы фильтром Гаусса ($\sigma = 3$). Далее проверяется выполнение следующих критериев бимодальности:

- 1) число локальных максимумов гистограммы $H(i)$, выделенных после сглаживания, равно 2;
- 2) $|p_1 - p_2| > T_{distance}$, где p_1, p_2 – позиции пиков (значения интенсивности), а $T_{distance} = 30\%$ – диапазон интенсивностей. Этот критерий гарантирует, что пики не слиплись;
- 3) $\min_{p_1 < i < p_2} (H(i)) < 0,3 \max (H(p_1), H(p_2))$. Данный критерий формализует требование к «глубине долины», гарантируя, что долина между пиками достаточно выражена.

При ухудшении условий съемки (размытие, туман) четкая граница размывается, вследствие чего бимодальное распределение гистограммы деградирует в унимодальное (одногорбое). Как показано на рис. 6, гистограмма имеет единственный, часто широкий, пик, обычно локализованный в области полутонов.

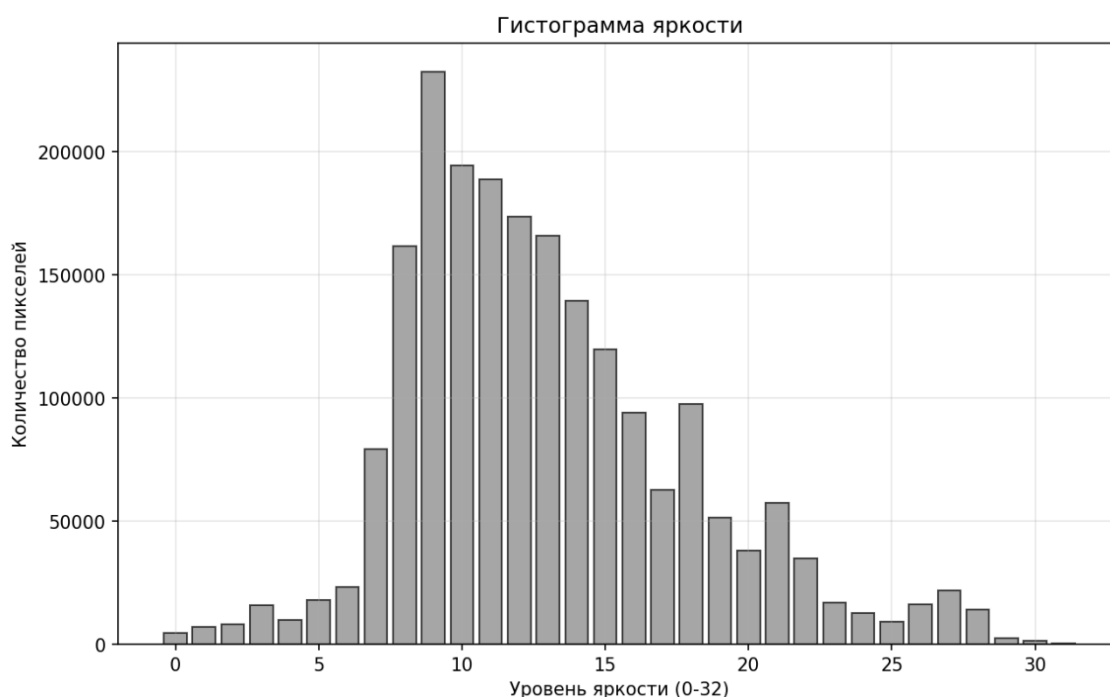


Рис. 6. Гистограмма яркости окрестности ключевой точки с зашумлением
Fig. 6. Histogram of the brightness of a noisy keypoint neighborhood

Для изображений, гистограмма яркости которых была классифицирована как выраженно бимодальная (согласно критериям, описанным выше), применяется автоматизированный подход к выбору порогов для алгоритма Кенни [13]. Метод Otsu [14] минимизирует межклассовую дисперсию и оптимален именно для бимодальных распределений. В условиях унимодального распределения (зашумленные сцены) метод может выдавать нестабильные пороги. Поэтому применение Otsu активируется только при подтверждении бимодальности через описанные выше критерии.

Для бимодальных гистограмм адаптивные пороги вычисляются на основе глобального порога Otsu (T_{otsu}). Значение нижнего порога $t_{low} = 0,5T_{otsu}$ выбрано экспериментально, показав максимальную F-меру (0,94).

Данная методология позволяет использовать статистические свойства самого изображения для определения границ и, соответственно, углов, где верхний порог идентифицирует достоверные «сильные» ребра, соответствующие границе между классами, а нижний порог обеспечивает трассировку и включение связанных с ними «слабых» ребер, повышая таким образом надежность и воспроизводимость детекции контуров.

Оценка погрешности поиска ключевых точек при различных параметрах зашумления

В рамках данного исследования для расчета погрешности, не зависящей от размера объекта на изображении, авторами предложена метрика $SIOKS_i$, которая имеет вид

$$SIOKS_i = \frac{a_i}{b_i},$$

где i – индекс ключевой точки; a_i – евклидово расстояние между предсказанной A_i и размеченной B_i ключевыми точками с индексом i ; b_i – евклидово расстояние между размеченной ключевой точкой с индексом i и противоположной ей относительно центра размеченной ключевой точкой (рис. 7).

Для оценки стабильности и надежности алгоритма недостаточно анализа единичных ошибок. Необходимо оценить статистические характеристики погрешности на репрезентативном наборе данных. Для этой цели вычисляется 95%-ный доверительный интервал для математического ожидания (истинного среднего) погрешности $SIOKS$.

Для установления базовых показателей точности и экспериментальной проверки тезиса о компромиссе между помехоустойчивостью и точностью был проведен анализ работы алгоритмов в идеальных условиях и в условиях с окклюзией ключевых точек маркера (случай, при котором классические методы не работают).

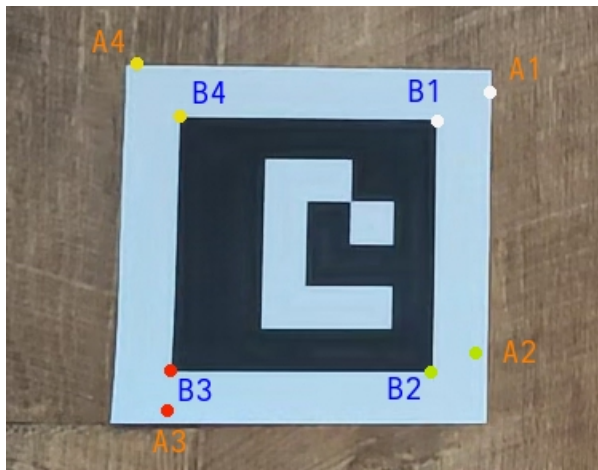


Рис. 7. Пример возможной работы нейронной сети
Fig. 7. An example of how a neural network might work

Использовались эталонные изображения высокого качества, не содержащие синтетических или естественных шумов, на которых навигационные маркеры четко различимы.

На рис. 8 представлены 95%-ные доверительные интервалы для относительной ошибки $SIOKS$, вычисленной для каждой из четырех ключевых точек маркера в идеальных условиях. Сравнение проводилось между классическим методом, реализованным в библиотеке OpenCV, и разработанной авторами нейросетевой архитектурой LND-Net (модификацией YOLOv11) [11].

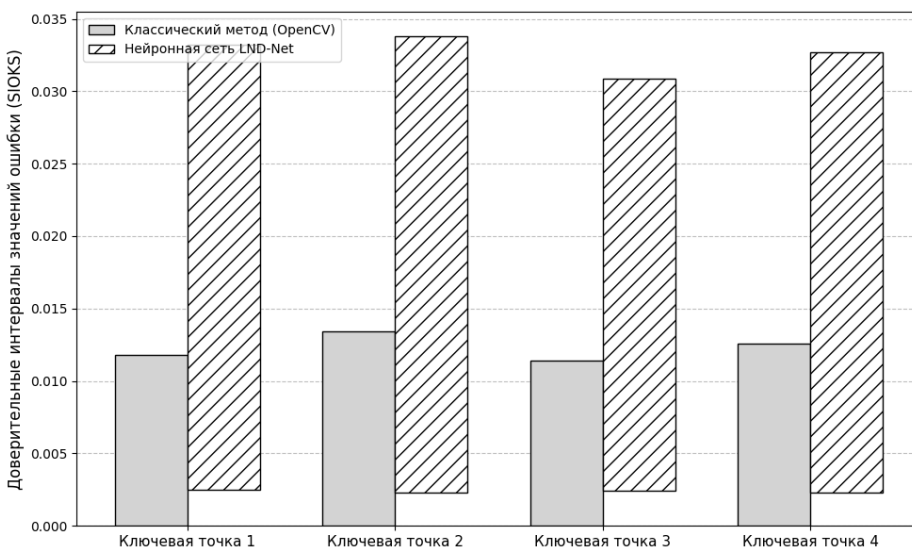


Рис. 8. Доверительные интервалы для ошибок детекции при идеальных условиях для нейросети и классических методов
Fig. 8. Confidence intervals for detection errors under ideal conditions for neural networks and classical methods

Рис. 8 демонстрирует явное преимущество классического метода в идеальных условиях: верхняя граница доверительного интервала ошибки не превышает ~0,013. Нейросетевой подход,

напротив, показывает в 2,5–3 раза более широкие интервалы (до $\sim 0,034$), что свидетельствует о существенно меньшей точности и стабильности позиционирования при отсутствии помех.

После анализа идеальных условий рассмотрим еще один критически важный для практического применения сценарий – частичную окклюзию маркера (рис. 9). В таких условиях классические методы, основанные на поиске замкнутых контуров или анализе углов (например, OpenCV), мгновенно перестают работать. Они либо не обнаруживают маркер вовсе, либо, что хуже, выдают ошибочные координаты, так как структура угла, которую они ищут, нарушена. Нейросетевой компонент, напротив, демонстрирует ключевое преимущество – помехоустойчивость. Нейросеть сохраняет функциональность при окклюзии одной из четырех ключевых точек.



Рис. 9. Пример маркера с перекрытием ключевой точки
Fig. 9. An example of a marker with a keypoint overlap

Однако анализ (рис. 10) показывает, что ошибка локализации для перекрытой точки возрастает до 15 % (с SIOKS от 0,034 до 0,039). При этом видимые точки показывают рост ошибки менее чем на 5 %, что указывает на относительную помехоустойчивость внутреннего представления маркера в сети.

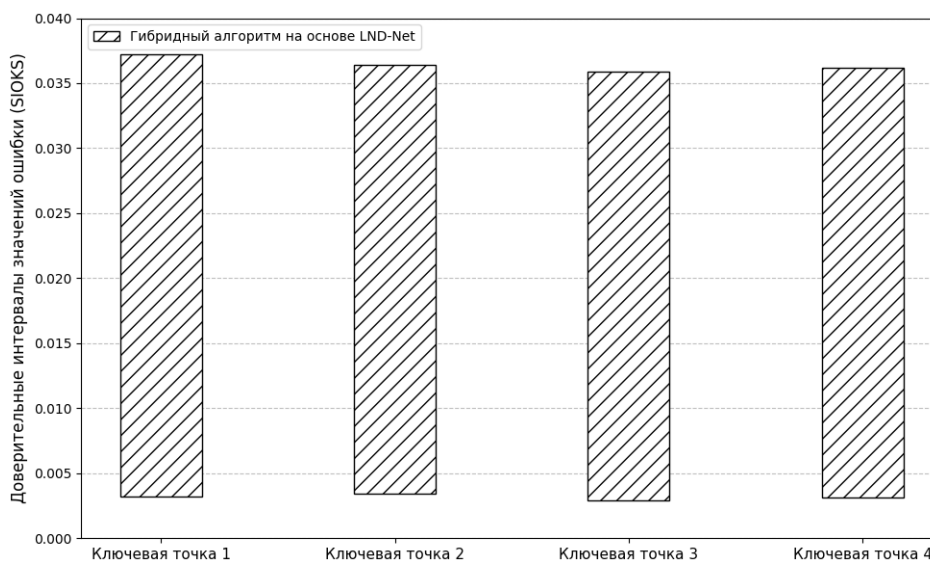


Рис. 10. Доверительные интервалы для ошибок детекции в условиях перекрытия ключевой точки маркера для нейросети и классических методов
Fig. 10. Confidence intervals for detection errors under conditions of overlapping marker keypoints for neural networks and classical methods

Это незначительное снижение точности (15 % для одной точки) является допустимой платой за сохранение полной работоспособности системы в сценарии, который является фатальным для классических подходов. Более того, эта ошибка может быть эффективно компенсирована на следующем этапе обработки (например, в расширенном фильтре Калмана) за счет использования временной когерентности и данных от трех других, точно локализованных, точек.

На рис. 11 представлены 95%-ные доверительные интервалы для относительной ошибки SIOKS, вычисленной для каждой из четырех ключевых точек маркера в идеальных условиях. Сравнение проводилось между классическим методом, реализованным в библиотеке OpenCV, и гибридным алгоритмом на основе LND-Net.

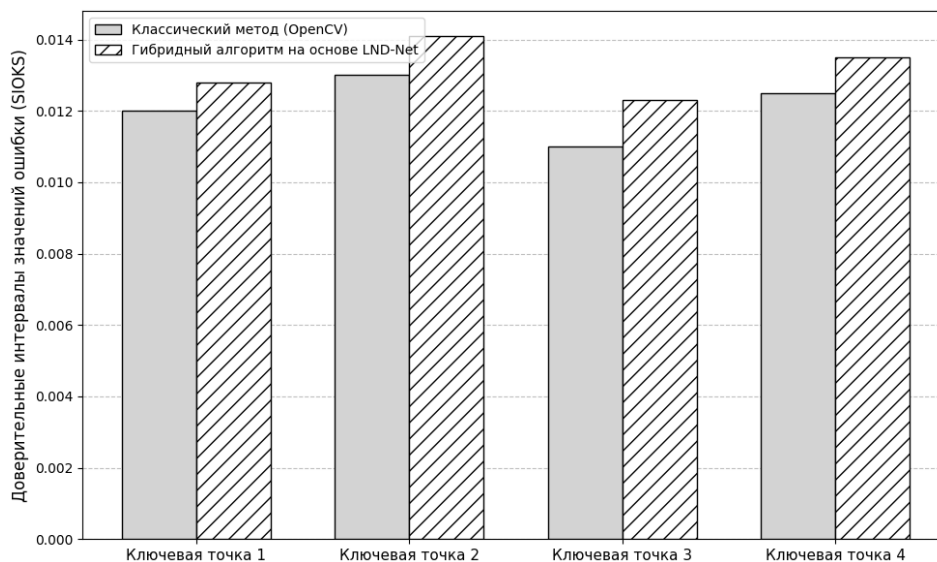


Рис. 11. Доверительные интервалы для ошибок детекции при идеальных условиях для гибридного метода с использованием LND-Net и классических методов
Fig. 11. Confidence intervals for detection errors under ideal conditions for a hybrid method using LND-Net and classical methods

Анализ рис. 11 показывает, что гибридный алгоритм в идеальных условиях достигает точности, близкой к классическому методу на основе OpenCV. Это закономерно, так как архитектура гибрида подразумевает прямое использование классического алгоритма для уточнения координат ключевых точек при идеальных условиях. Незначительное расхождение доверительных интервалов объясняется не качеством самого вычисления, а редкими ошибками модуля принятия решений, когда система ошибочно оставалась на базовой нейросетевой оценке (LND-Net), не переключившись на точный классический метод.

Результаты анализа базовых показателей точности наглядно демонстрируют, что использование исключительно нейросетевого метода для всех режимов работы нецелесообразно. Точность LND-Net в благоприятных условиях, уступающая классическим методам, может оказаться недостаточной для задач высокоточной навигации, где ошибки локализации напрямую транслируются в ошибки навигационного решения. Полученные данные подтверждают необходимость использования разработанной гибридной схемы: при выявлении «благоприятных» условий (на основе анализа гистограммы) активация модуля уточнения методом Санны позволяет компенсировать погрешность нейросети, обеспечивая точность, сопоставимую с классическими алгоритмами, без потери общей помехоустойчивости системы.

Для валидации эффективности предложенного гибридного алгоритма был проведен эксперимент на синтетически зашумленных данных. В качестве основы использовался фрагмент видео длиной в 100 кадров, записанный во время испытаний демонстратора двигательной установки. На исходное видео последовательно накладывались три типа слабовыраженных помех: аддитивный гауссов шум с низкой дисперсией, незначительное размытие по Гауссу и имитация легкого тумана. Важно подчеркнуть, что интенсивность всех помех умышленно подбиралась такой, чтобы визуальное качество изображения оставалось высоким, создавая, таким образом, условия, в кото-

рых стандартные алгоритмы компьютерного зрения демонстрируют максимальную точность и превосходят по этому показателю чисто нейросетевой подход из [1]. Это позволило проверить ключевое преимущество гибридной системы – способность корректно идентифицировать «благоприятную» среду и переключаться на более точный метод.

На рис. 12 (низкий уровень тумана) и рис. 13 (низкий уровень размытия) представлено прямое сравнение относительной ошибки SIOKS для двух методов: эталонного классического (OpenCV) и предлагаемого гибридного алгоритма.

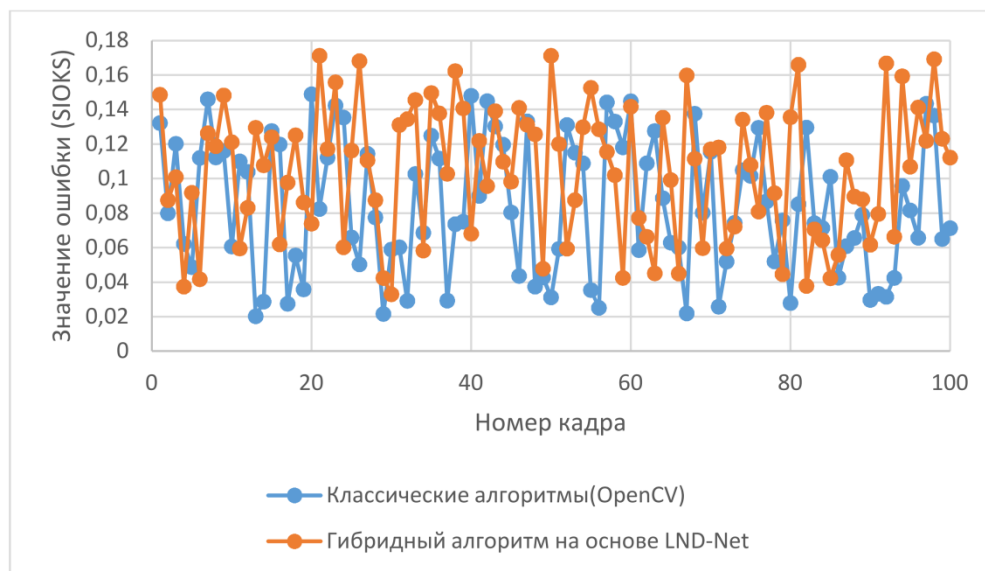


Рис. 12. Значения ошибки при низком уровне тумана
Fig. 12. Low fog level error values

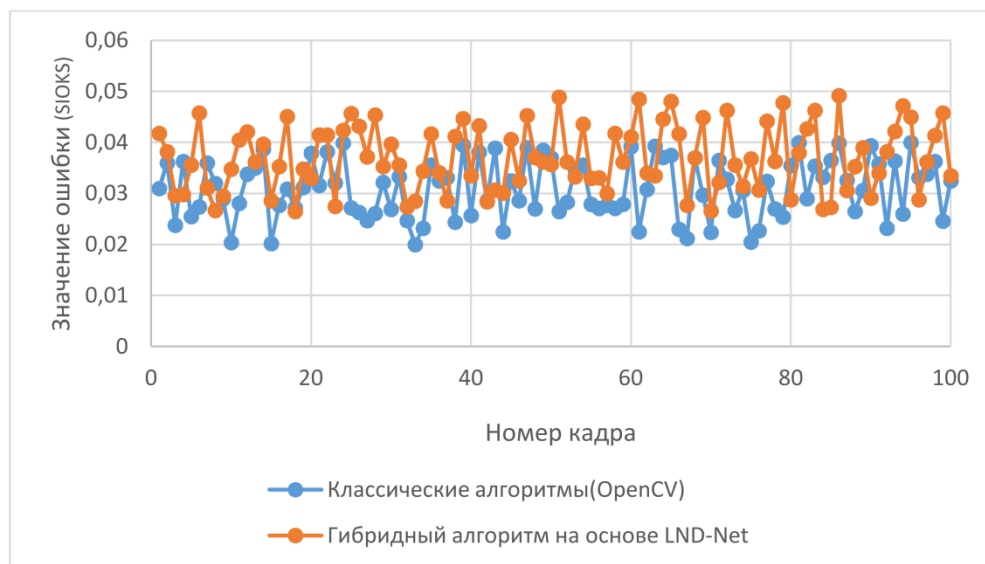


Рис. 13. Значения ошибки при низком уровне размытия
Fig. 13. Error values at low blur levels

Графики на рис. 12, 13 демонстрируют, что при слабых помехах гибридный алгоритм вплотную приближается по точности к классическому методу. Это подтверждает эффективность критерия бимодальности: система успешно идентифицирует пригодные кадры и активирует уточнение. Незначительное отставание объясняется редкими ошибками классификатора 1-го рода (False Negative), когда благоприятные кадры ошибочно обрабатываются без уточнения, используя только нейросетевую оценку.

Рис. 14 представляет результаты ключевого валидационного теста, проверяющего вторую, не менее важную, функцию гибридного алгоритма: способность избежать применения классических методов в условиях, где они заведомо неэффективны и могут привести к деградации решения.

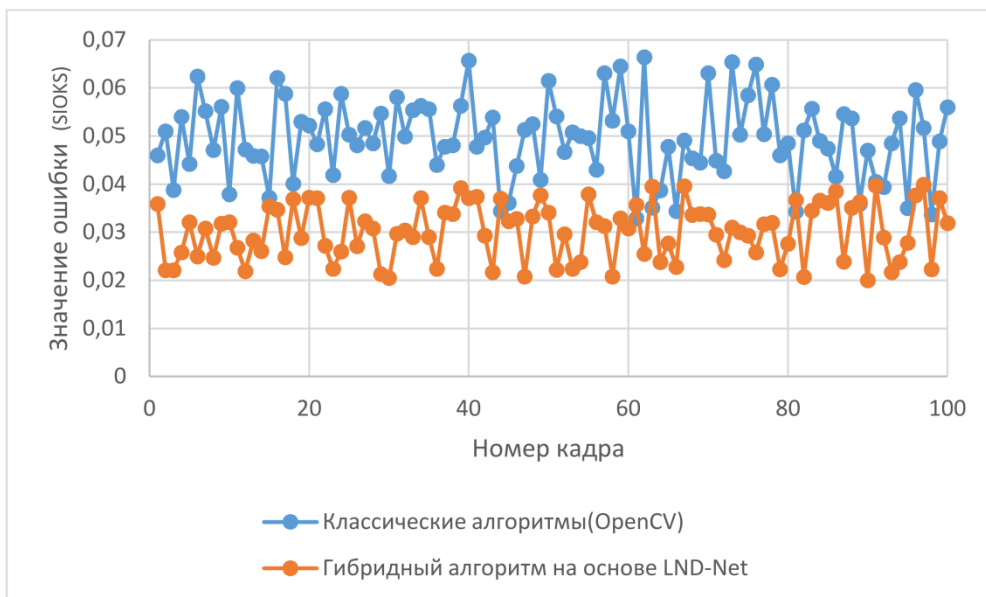


Рис. 14. Значения ошибки при низком уровне шума Гаусса
Fig. 14. Error values at low Gaussian noise levels

В условиях аддитивного гауссова шума, как показано на рис. 14, классические градиентные методы теряют работоспособность из-за множества ложных микроградиентов. Гибридный алгоритм, идентифицировав сцену как зашумленную (отсутствие бимодальности), корректно блокирует этап уточнения и полагается исключительно на нейросетевую оценку. Это обеспечивает существенно лучшую точность (SIOKS) и меньшую дисперсию ошибки по сравнению с классическим подходом, подтверждая способность системы избежать деградации решения в сложных условиях.

Заключение

В работе предложен и протестирован гибридный алгоритм для навигации автономных БПЛА, призванный разрешить фундаментальный компромисс между помехоустойчивостью нейросетевых методов и точностью классических алгоритмов компьютерного зрения в благоприятных условиях. Разработанный подход совмещает разработанный авторами нейросетевой детектор LND-Net, обеспечивающий работоспособность при сильных помехах, и адаптивный модуль принятия решений, управляющий активацией точных классических алгоритмов. В основе работы модуля принятия решений в режиме реального времени лежит проверка критерия бимодальности локальных гистограмм яркости, что позволяет автоматически активировать субпиксельное уточнение только при наличии четких границ и блокировать его при шумах.

Экспериментальная валидация на синтетических данных, имитирующих слабовыраженные помехи (гауссов шум, размытие, туман), подтвердила эффективность предложенного решения. В условиях, где чисто нейросетевой метод [11] начинает уступать в точности, гибридный алгоритм корректно переключался на стандартные алгоритмы и успешно идентифицировал высокое качество изображения, тем самым демонстрируя более высокую точность позиционирования. Это доказывает, что система достигла своей основной цели – обеспечения высокой помехоустойчивости в сложных условиях при сохранении субпиксельной точности в благоприятных средах.

Таким образом, представленный гибридный алгоритм предлагает гибкое и эффективное решение для навигации в изменчивой внешней среде, согласуясь с актуальными исследованиями, подтверждающими высокую алгоритмическую устойчивость глубоких нейросетевых моделей при анализе изображений сложной структуры [15]. Перспективы дальнейших исследований

видятся в усовершенствовании модуля принятия решений за счет введения более сложных признаков и машинного обучения, а также в проведении натурных испытаний в реальных сценариях с динамически меняющимися погодными условиями.

Список литературы/References

1. Wang N.-Q., Chen Y.-H., Hsu C.-T., Chuang J.-H. Vision-Based UAV Navigation Using Multi-Intensity Illumination and Fiducial Markers in GPS-Denied Environments. *Research Square*. 2025. DOI: 10.21203/rs.3.rs-7301312/v1
2. Raxit, S., Singh S.B., Al Redwan Newaz A. YoloTag: Vision-Based Robust UAV Navigation with Fiducial Markers. *ArXiv preprint: arXiv:2409.02334*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2409.02334
3. Lai T. Real-Time Aerial Detection and Reasoning on Embedded-UAVs. *ArXiv preprint: arXiv:2305.12414*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.12414
4. Yao B., Wang W., Wang Z., Song Q. UVPose: A Real-Time Key-Point-Based Skeleton Detection Network for a Drone Countermeasure System. *MDPI Drones*. 2025;9(3):214. DOI: 10.3390/drones9030214
5. Huang S., Gong M., Tao D. A Coarse-Fine Network for Keypoint Localization. In: *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Venice, Italy, 2017. P. 3047–3056. DOI: 10.1109/ICCV.2017.329
6. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.Y., Berg A.C. SSD: Single Shot MultiBox Detector. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0_2
7. Billot B., Muthukrishnan R., Abaci-Turk E., Grant P.E., Ayache N., Delingette H., Golland P. Spatial Regularisation for Improved Accuracy and Interpretability in Keypoint-Based Registration. *ArXiv preprint: arXiv:2503.04499*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2503.04499
8. Shankar R., Prachand C., Singh J., Abhishek, Venkatesh K.S. Vision-based Landing of UAV on Simulated Ship Deck with Roll, Pitch and Sway Motions. In: *Proceedings of the Vertical Flight Society 81st Annual Forum & Technology Display*. 2025. P. 1–16. DOI: 10.4050/F-0081-2025-0358
9. Yang X., Mejias L., Garratt M. Multi-sensor data fusion for UAV navigation during landing operations. In: *Proceedings of the 2011 Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2011)*. Melbourne, VIC: Monash University, 2011. P. 1–10.
10. Xing B., Zhu Q., Pan F., Feng X. Marker-Based Multi-Sensor Fusion Indoor Localization System for Micro Air Vehicles. *MDPI Sensors*. 2018;18(6):1706. DOI: 10.3390/s18061706
11. Кузнецов, А.А. Алгоритм анализа зашумленных видеоданных для навигации автономных роботов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». 2025. Т. 17, № 3. С. 38–46. [Kuznetsov A.A. Algorithm for analyzing noisy video data for autonomous robots navigation. *Bulletin of the South Ural State University Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*. 2025;17(3):38–46. (In Russ.)]. DOI: 10.14529/mmph250304
12. Menze M., Geiger A. Object Scene Flow for Autonomous Vehicles. In: *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Boston, MA, USA, 2015. P. 3061–3070. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298925
13. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986;PAMI-8(6):679–698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
14. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979;9(1):62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076
15. Клестов Р.А., Ключев А.В., Столбов В.Ю. Алгоритмическая устойчивость нейронных сетей глубокого обучения при распознавании микроструктуры материалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 1. С. 159–166. [Klestov R.A., Klyuev A.V., Stolbov V.Yu. Algorithmic Stability of Deep Learning Neural Networks in Recognizing the Microstructure of Materials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(1):159–166. (In Russ.)]. DOI: 10.14529/ctcr210114

Информация об авторах

Замышляева Алена Александровна, д-р физ.-мат. наук, проф., директор института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; zamyshliaevaaa@susu.ru.

Кузнецов Антон Андреевич, инженер научной лаборатории «Системы управления летательными аппаратами», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kuznetsovaa@susu.ru.

Information about the authors

Alena A. Zamyshlyeva, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Director of the Institute of Natural Sciences and Mathematics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; zamyshliaevaaa@susu.ru.

Anton A. Kuznetsov, Engineer of the Scientific Laboratory “Aircraft Control Systems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kuznetsovaa@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.12.2025

The article was submitted 19.12.2025

Инфокоммуникационные технологии и системы Infocommunication technologies and systems

Научная статья
УДК 621.396.6(07), 537.8(07)
DOI: 10.14529/ctcr260203

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАНЕЛЬНЫХ АНТЕНН НА МАЧТАХ И БАШНЯХ

М.С. Воробьев, vorobevms@susu.ru

Л.П. Кудрин, kudrinlp@susu.ru

А.Б. Хашимов, khashimovab@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Развитие национальной сети радиотелевизионного вещания предполагает оптимизацию зоны покрытия для используемого частотного диапазона в различных условиях рельефа местности и плотности расположения приемников сети. Это требует решения актуальной задачи проектирования передающих центров, антенные системы которых формируют диаграммы направленности с заданными свойствами, например, с зонами ослабления в горной местности, водной территории. С этой целью часто используют панельные антенны, размещаемые на мачтах и башнях. **Цель исследования:** рассмотрение строгих электродинамических формулировок для математических моделей панельных антенн, так как широко используемые концепции бесконечных идеально проводящих экранов не учитывают эффектов взаимного влияния в антенной системе, образованной панельными антеннами, с конструктивными элементами мачт и башен; разработка методов проектирования оптимальных амплитудно-фазовых распределений антенных систем, обеспечивающих заданные требования к диаграмме направленности. **Методы исследования.** Вводится строгая электродинамическая модель вибратора панельной антенны в виде интегрального уравнения Поклингтона. Полная математическая модель панельной антенны формулируется как система интегральных уравнений, для численного решения которой используется метод моментов. **Результаты.** Получены оценки поля излучения панельных антенн в теневой области для различных размеров панели-рефлектора. Исследованы изменения диаграммы направленности антенных систем, вызванные влиянием конструктивных элементов мачт и башен. Применение оптимизационных процедур для нелинейных задач проектирования амплитудно-фазовых распределений совместно с геометрией расположения панельных антенн приводит к возможности формирования зоны покрытия, наиболее близкой к заданным требованиям в соответствии с выбранными критериями. **Заключение.** Результаты исследования показывают степень соответствия строгих результатов проектирования панельных антенн с приближенными методами зеркальных изображений. Для предложенной математической модели панельной антенны можно определить частотный диапазон входного сопротивления антенной системы для эффективного согласования. Приведены примеры формирования диаграмм направленности с заданной зоной покрытия для различных объектов установки.

Ключевые слова: панельная антенна, математическая модель, интегральные уравнения, амплитудно-фазовое распределение, мачта, башня

Для цитирования: Воробьев М.С., Кудрин Л.П., Хашимов А.Б. Формирование диаграммы направленности панельных антенн на мачтах и башнях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 30–39. DOI: 10.14529/ctcr260203

FORMATION OF THE RADIATION PATTERN OF PANEL ANTENNAS ON MASTS AND TOWERS

M.S. Vorobev, vorobevms@susu.ru

L.P. Kudrin, kudrinlp@susu.ru

A.B. Khashimov, khashimovab@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The development of a national radio and television broadcasting network requires optimizing the coverage area for the frequency band used in various terrain conditions and density of the network receivers. This leads to solving the actual problem of designing broadcasting centers, whose antenna systems form radiation patterns with specified properties, such as attenuation zones in mountainous terrain or water area. For this purpose panel antennas mounted on masts and towers are often used. **The purpose of the study.** Consideration of rigorous electrodynamics formulations for mathematical models of panel antennas since the widely used concepts of infinite perfectly conductive screens do not consider the effects of mutual influence in an antenna system that consists of panel antennas and structural elements of masts and towers. Development of methods for designing optimal amplitude-phase distributions of antenna systems that meet the specified requirements for the radiation pattern. **Materials and methods.** A rigorous electrodynamics model of a panel antenna dipole is introduced as the Pocklington integral equation of the II kind. The complete mathematical model of a panel antenna is formulated as a system of integral equations. For the numerical solution the method of moments is used. **Results.** Estimates of the panel antenna radiation fields in the back area were obtained for various panel-reflector sizes. Changes in the antenna system radiation pattern caused by the influence of the structural elements of masts and towers were investigated. The use of optimization procedures for nonlinear problems of designing amplitude-phase distributions with reference to the geometry of the panel antenna layout leads to the possibility of forming a coverage area that is closest to the specified requirements for the selected criteria. **Conclusion.** The study results show the degree of compliance of the rigorous modeling results of panel antennas with approximate mirror image methods. The proposed mathematical model of the panel antenna can determine the frequency band of the antenna system input impedance for effective matching. Examples of modeling radiation patterns with a given coverage area for various objects are given.

Keywords: panel antenna, mathematical model, integral equations, amplitude and phase distribution, mast, tower

For citation: Vorobev M.S., Kudrin L.P., Khashimov A.B. Formation of the radiation pattern of panel antennas on masts and towers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(2):30–39. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260203

Панельные антенны в виде вибраторных излучателей над рефлектором (сплошным или решетчатым) (рис. 1) являются одним из основных вариантов для установки на несущих мачтах и башнях радиотелевизионных передающих центров (РТЦ) [1, 2]. Их отличает простота конструкции и технологичность изготовления, приемлемые массо-габаритные характеристики, надежное крепление к объектам установки. Объединение панельных антенн в антенную систему (АС) позволяет формировать диаграмму направленности (ДН) в горизонтальной и вертикальной плоскости с заданными свойствами зоны покрытия РТЦ. Это достигается применением различных амплитудно-фазовых распределений (АФР) возбуждения АС и расположением панельных антенн на гранях мачты или башни.

Например, для совместной работы передающих центров возникает необходимость заданного ослабления ДН в определенных угловых секторах для подавления взаимных интерференционных помех. Зона покрытия определяется характером рельефа местности, плотностью застройки территории, местом установки мачты или башни. В ряде случаев форма и размеры поперечного сечения башни позволяют варьировать угловое расположение панельных антенн на отдельных гранях, что приводит к дополнительным возможностям формирования ДН. В статье будем рассмат-

ривать ДН АС в горизонтальной плоскости, представляющие наибольший практический интерес. В вертикальной плоскости общее количество этажей АС определяется заданным коэффициентом усиления в направлении максимума ДН.

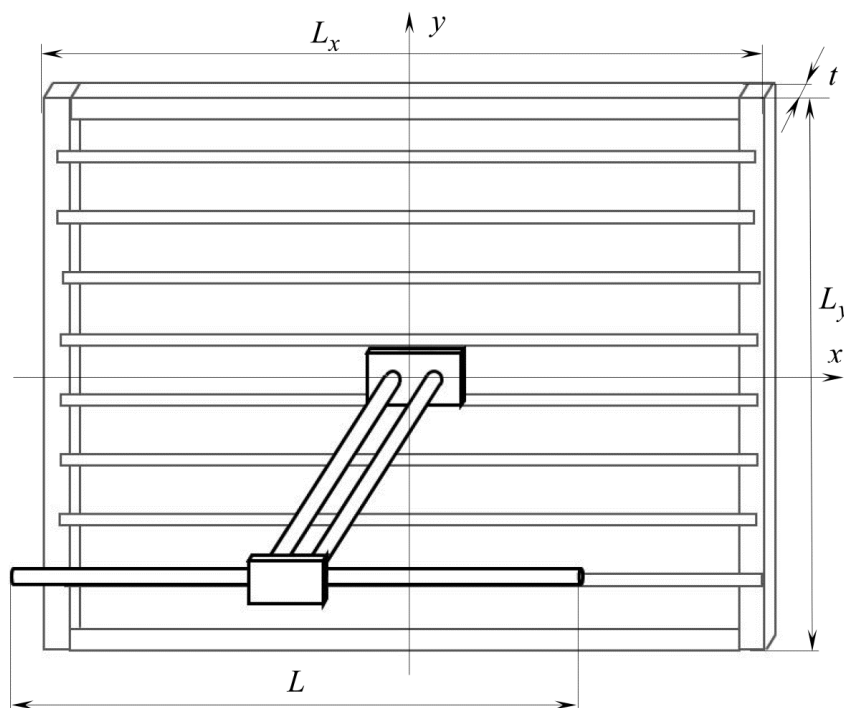


Рис. 1. Панельная антенна
Fig. 1. Panel antenna

Проектирование АС с заданной ДН (угловые секторы подавления, провалы в помеховых угловых направлениях) предполагает решение многопараметрической нелинейной задачи синтеза АФР и размещения излучателей на объекте установки – башне или мачте РТПЦ с известным поперечным сечением и привязкой к местности. Кроме того, принципиально важен учет влияния конструктивных элементов башни (мачты) – растяжки, кабель-росты, пояса. Эти элементы определяют помеховые поля рассеяния, свойства которых зависят от поляризации поля излучения. Негативный фактор влияния таких полей проявляется в ДН АС в зоне подавления.

Для получения ДН, наиболее приближенной к заданной, часто используют панельные излучатели на гранях башни (мачты). Для уменьшения стоимости, массы и ветровой нагрузки рефлекторы выполняют решетчатыми. Наиболее полную оценку поля излучения панельной антенны можно получить, используя строгие электродинамические формулировки в задаче моделирования АС, включая влияние объекта установки, так как приближение идеально проводящего бесконечного экрана принципиально не работает в теневой области [3, 4]. Рассмотрим панельную антенну с рефлектором толщиной t (см. рис. 1), значительно меньшей длины волны λ .

Введем следующие допущения.

1. Поверхность панели-рефлектора является сплошной. В [4] показано, что переход к решетчатому рефлектору при соответствующем выборе параметров конструкции не приводит к заметному расхождению результатов.

2. Для тонких панелей используем методы исследования, предложенные в работах [5–8]. Многочисленные результаты математического моделирования и измерительные эксперименты показали эффективность строгого электродинамического подхода к формулировке математической модели (ММ) панельной антенны.

3. Для численного исследования ММ используем итерационную процедуру [9], позволяющую получить устойчивые результаты для тонких рефлекторов панельных антенн. Введем систему ИУ II рода для вибратора размером L , ориентированного по оси x , и рефлектора с поверхностью S , удовлетворяющей условию непрерывности нормали [9]:

$$\vec{j}_s = \frac{1}{2\pi} \vec{n}_p \times \int_S \vec{j}_s \times \text{grad}' \varphi ds' - \frac{1}{2\pi} \vec{n}_p \times \int_{-L/2}^{L/2} I_x \vec{i}_x \times \text{grad}' \varphi dx';$$

$$-\frac{4\pi ik}{Z_c} \int_S (j_{sx} K_{x'p} + j_{sy} K_{y'p} + j_{sz} K_{z'p}) ds' + \int_{-L/2}^{L/2} I_x K_{x'x} dx' = -\frac{4\pi ik}{Z_c} E_x^i, \quad (1)$$

где $\vec{j}_s = \vec{i}_x j_{sx} + \vec{i}_y j_{sy} + \vec{i}_z j_{sz}$ – вектор распределения поверхностного тока на рефлекторе;

$\varphi = \exp(-ikr)/r$ – функция Грина свободного пространства;

$k = 2\pi/\lambda$; $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + t^2}$ – расстояние между точками наблюдения и источника соответственно;

I_x – распределение тока на вибраторе, определяемое возбуждением в зазоре вибратора E_x^i ;

Z_c – волновое сопротивление среды.

Первое уравнение системы (1) – удовлетворение граничным условиям на поверхности рефлектора, второе – ИУ Поклингтона [10, 11] в тонкопроволочном приближении для вибратора. Критерий устойчивости численного решения определяется стабилизацией числа обусловленности *cond* глобальной матрицы системы (1). Результаты вычислительных экспериментов показывают границу стабилизации для значений $t/\lambda < 0,005$, что хорошо согласуется с результатами, полученными в [12] для конструкций панельных антенн.

Для численного решения системы (1) используем метод коллокаций с импульсными базисными функциями [13].

На рис. 2 приведены результаты расчетов ДН панельного излучателя в сферической системе координат для вертикальной (рис. 2а) и горизонтальной плоскости (рис. 2б), логарифмический масштаб. Размеры рефлектора и вибратора: $L_x = 0,7\lambda$; $L_y = 0,62\lambda$; $t = 0,008\lambda$; $L = 0,48\lambda$.

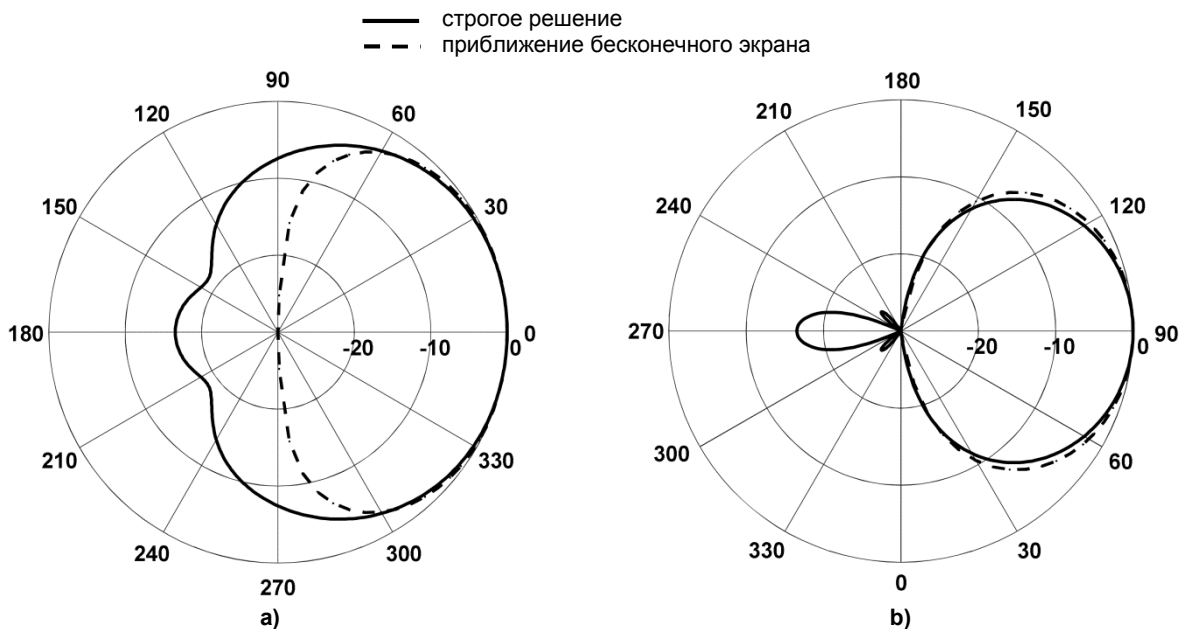


Рис. 2. ДН панельной антенны
Fig. 2. Radiation patterns of the panel antenna

Наиболее заметные отличия ДН для строгих и приближенных решений проявляются в угловых областях, соответствующих теневой области панельной антенны.

Но именно эти области, как правило, находятся в зоне подавления, поэтому строгие решения для ДН панельных антенн должны использоваться как основные для построения ММ антенных систем.

Типичные конфигурации АС, устанавливаемых на мачтах и башнях, представлены на рис. 3 – горизонтальной поляризации (рис. 3а), вертикальной поляризации (рис. 3б). Для формирования заданной ДН может потребоваться индивидуальное смещение и синхронный поворот панельных антенн относительно граней мачты, башни. Таким образом, расположение панельных антенн совместно с функцией АФР вводится в целевой функционал для оптимизации ДН антенной системы. Естественными ограничениями задачи синтеза являются заданные размеры поперечного сечения мачты, башни, которые определяют возможные изменения положения панельных антенн на гранях.

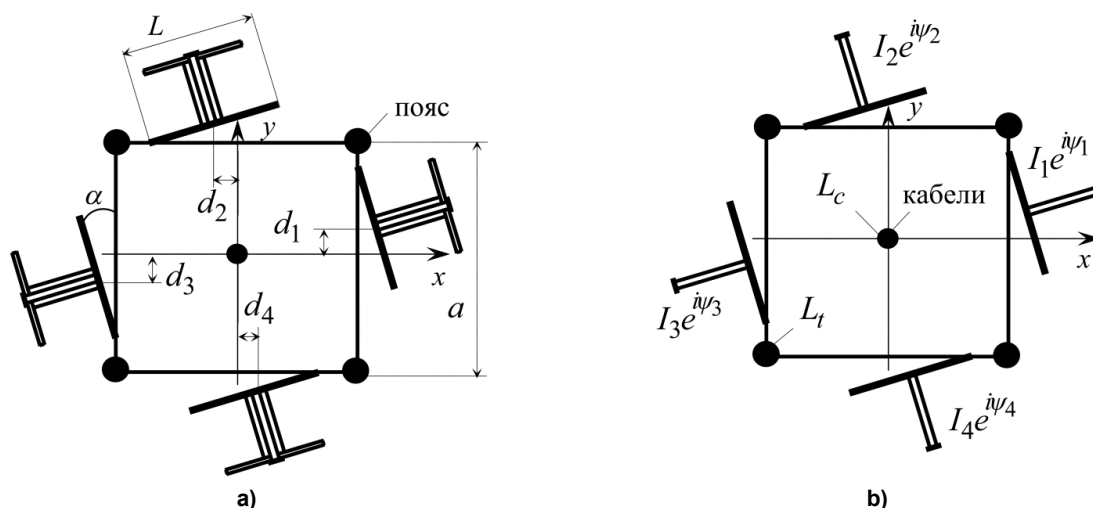


Рис. 3. Конфигурация АС на гранях мачты, башни
Fig. 3. Configuration of the antenna system on the sides of the mast or tower

Формирование ДН антенных систем рассмотрим отдельно для панельных антенн горизонтальной и вертикальной поляризации.

Вертикальная поляризация. В этом случае ДН антенной системы в горизонтальной (азимутальной) плоскости определяется с помощью асимптотического соответствия трехмерных векторных и двумерных скалярных электродинамических задач [14, 15]. Система ИУ I рода:

$$I_{sm}G(\xi) + \sum_{n \neq m}^N I_{sn}G(r_{mn}) + \int_{L_s} j(q)G(r_{mq})dl_q = - \sum_{n \neq m}^N I_{in}G(r_{mn}); \quad m = \overline{1:N};$$

$$\sum_{n=1}^N I_{sn}G(r_{pn}) + \int_{L_s} j(q)G(r_{pq})dl_q = - \sum_{n=1}^N I_{in}G(r_{pn}); \quad p \in L_c,$$
(2)

где $G(r_{pq}) = -iH_0^{(2)}(kr_{pq})/4$; L_s – контур, объединяющий все замкнутые контуры ММ.

На рис. 4 приведены результаты вычислительных экспериментов нелинейной задачи оптимизации.

В целевом функционале используются как параметры АФР излучателей, так и геометрические характеристики их расположения на мачте или башне. На рис. 4а изображены ДН АС четырех панельных излучателей, расположенных на мачте «Унжа», сечение $0,3 \times 0,3 \text{ м}^2$, угол $\alpha = 0$. Расчеты показывают, что неравномерность ДН, приближенных к круговой, не ниже допустимого уровня -3 дБ . Рефлектор панельного излучателя для несущей частоты $92,6 \text{ МГц}$ имеет небольшой электрический размер $0,093\lambda$, что определяет достаточно высокий уровень излучения в теневой области, до -16 дБ . Поскольку возбуждаются все четыре излучателя, то влияние таких «узких» рефлекторов имеет равномерный характер. Вектор АФР $I = [1 \exp(i0) \ 1 \exp(i\pi/2) \ 1 \exp(i\pi) \ 1 \exp(i3\pi/2)]$.

В ряде случаев необходимо формирование секторной ДН для ограниченной зоны покрытия, с минимальным уровнем излучения в угловом секторе подавления. На рис. 4б приведены ДН для двух излучающих панельных антенн – № 3 и № 4 (см. рис. 3б, $\alpha = 0$), получено АФР ММ: $I = [0 \ 0 \ 1 \ 0,707 \exp(i\pi/2)]$. Частота $109,2 \text{ МГц}$, угловой сектор подавления $0-90^\circ$.

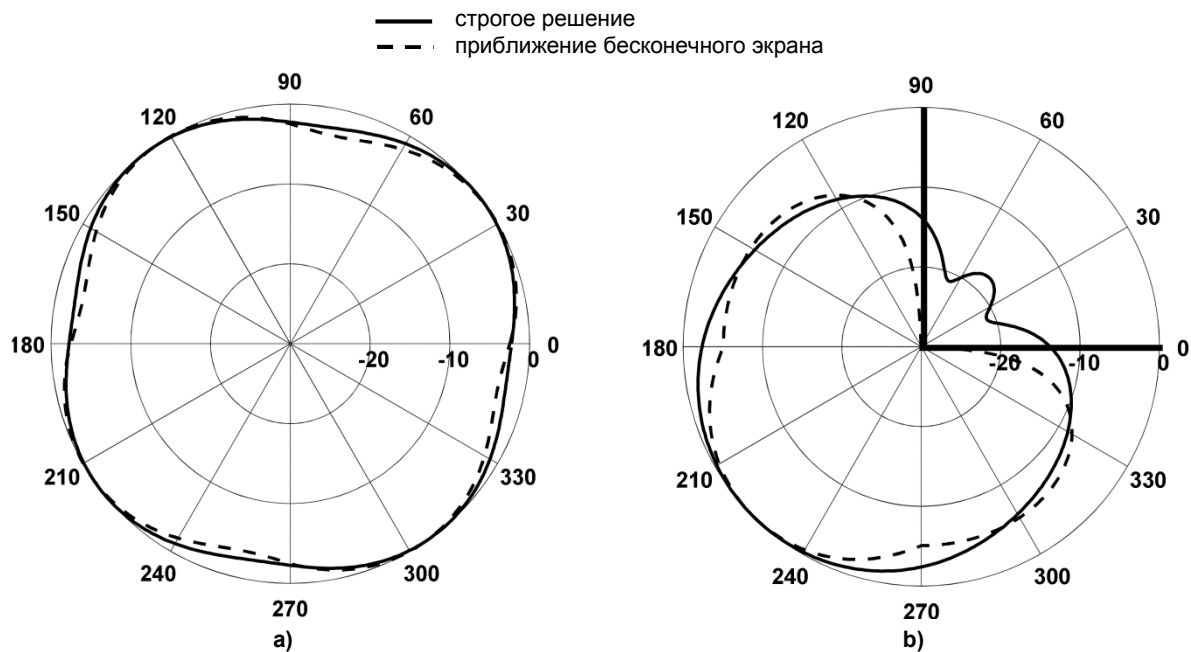


Рис. 4. ДН АС вертикальной поляризации
Fig. 4. Radiation patterns of a vertically polarized antenna system

Рис. 5а показывает ДН АС четырех панельных излучателей, расположенных на башне квадратного сечения $2,32 \times 2,32 \text{ м}^2$, диаметр поясов башни 0,2 м. Для получения ДН, приближенной к круговой, процедура оптимизации приводит к необходимости смещения центров панельных излучателей относительно осей симметрии сечения башни на расстояние 0,3 м в направлении часовой стрелки, угол $\alpha = 0$. Размер рефлектора – 0,56 λ , несущая частота – 100,2 МГц, АФР – аналогично примеру на рис. 4а. Излучение всех четырех излучателей приводит к равномерному изменению ДН, но для панельных излучателей, ДН которых определяется из строгого решения, неравномерность несколько выше. Это объясняется более высоким уровнем излучения в теневой области, что приводит к интерференции полей рассеяния внутри башни, вызванных влиянием поясов башни.

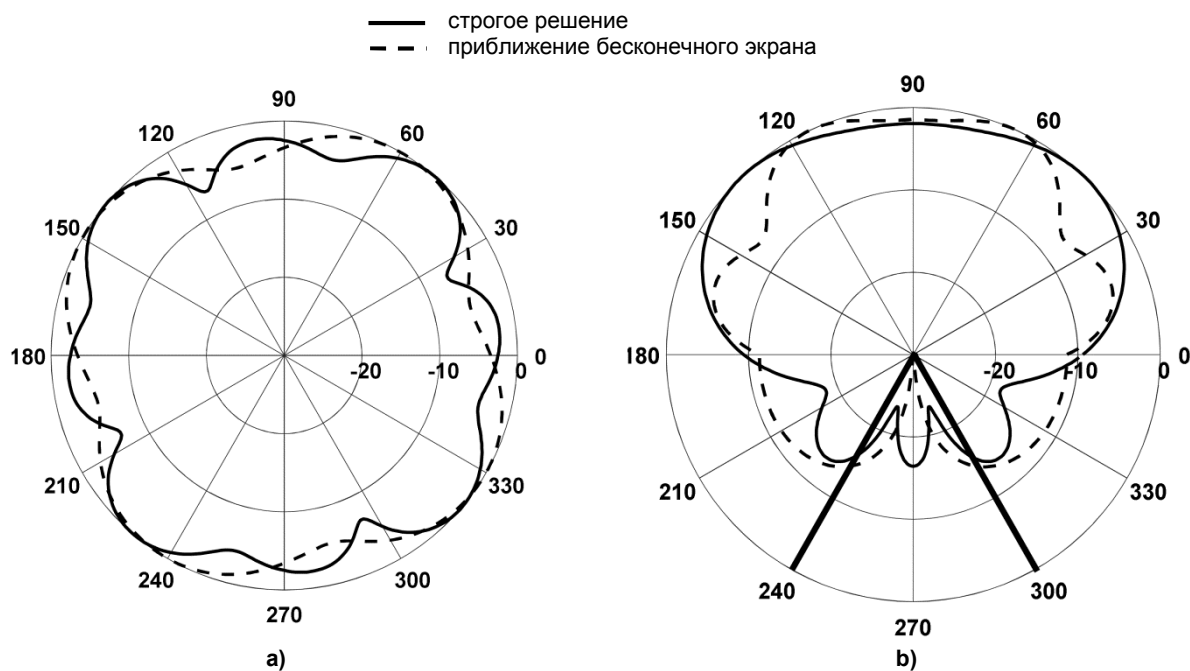


Рис. 5. ДН АС вертикальной поляризации
Fig. 5. Radiation patterns of a vertically polarized antenna system

На рис. 5b приведены результаты моделирования для трех излучающих панельных антенн: № 1, № 2, № 3 (см. рис. 3b, угол $\alpha = 0$), сечение башни на высотной отметке установки АС $2,32 \times 2,32 \text{ м}^2$, диаметр поясов башни 0,22 м, несущая частота 105,7 МГц. По условиям задачи необходимо сформировать секторную ДН, наименее отличающуюся от равномерной в секторе углов $20\text{--}160^\circ$, в секторе углов $240\text{--}300^\circ$ минимальный уровень излучения, не превышающий -20 дБ . В результате вычислительных экспериментов получено следующее АФР ММ: $I = [0,42 \exp(i\pi/2) \ 0,42 \ 0]$.

Размер рефлектора – $0,6\lambda$, центры панельных антенн № 1, № 3 сдвинуты по граням башни на 0,43 м ближе к антенне № 2 относительно осей симметрии. Строгое решение задачи определения ДН с учетом вторичных полей рассеяния приводит к более высокому уровню поля излучения в зоне подавления. Следовательно, расчеты ДН с использованием приближения бесконечного экрана приводят к заметным ошибкам в зоне подавления. Кроме того, ДН АС с панельными антеннами обладает более равномерным поведением в заданной зоне рабочих характеристик.

Горизонтальная поляризация. Здесь характерной особенностью поля излучения является возбуждение только поперечных распределений токов на поверхности цилиндрических объектов.

Эти металлические объекты, образованные поясами, кабельными стволами мачт и башен, в первом приближении можно считать идеально проводящими. Следовательно, эти распределения не вносят существенного вклада в поле излучения в горизонтальной плоскости. Поэтому в оптимизации поля излучения АС используются строгие ДН панельных антенн (см. рис. 2b), геометрия их расположения на объекте установки и АФР возбуждения.

На рис. 6a приведены ДН АС, состоящей из четырех панельных излучателей, наиболее приближенные к ненаправленным ДН в азимутальной плоскости. Незначительное отличие ДН объясняется совместным излучением АС с АФР, близким к равноамплитудным квадратурным фазовым распределениям. Излучение в теневой области взаимно компенсируется, что приводит к равномерному поведению поля рассеяния отдельных панельных антенн. Сечение башни – $2,6 \times 2,6 \text{ м}^2$, несущая частота – 93,25 МГц (5-й телевизионный канал (ТВК)), $\alpha = 0$. Требование приближения к ненаправленной ДН в нелинейной процедуре оптимизации приводит к одновременному сдвигу центров всех панельных излучателей на 0,65 м по часовой стрелке (см. рис. 3a) относительно осей симметрии. После незначительной «ручной» коррекции АФР ММ: $I = [1 \exp(i0) \ 1 \exp(i\pi/2) \ 1 \exp(i\pi) \ 1 \exp(i3\pi/2)]$.

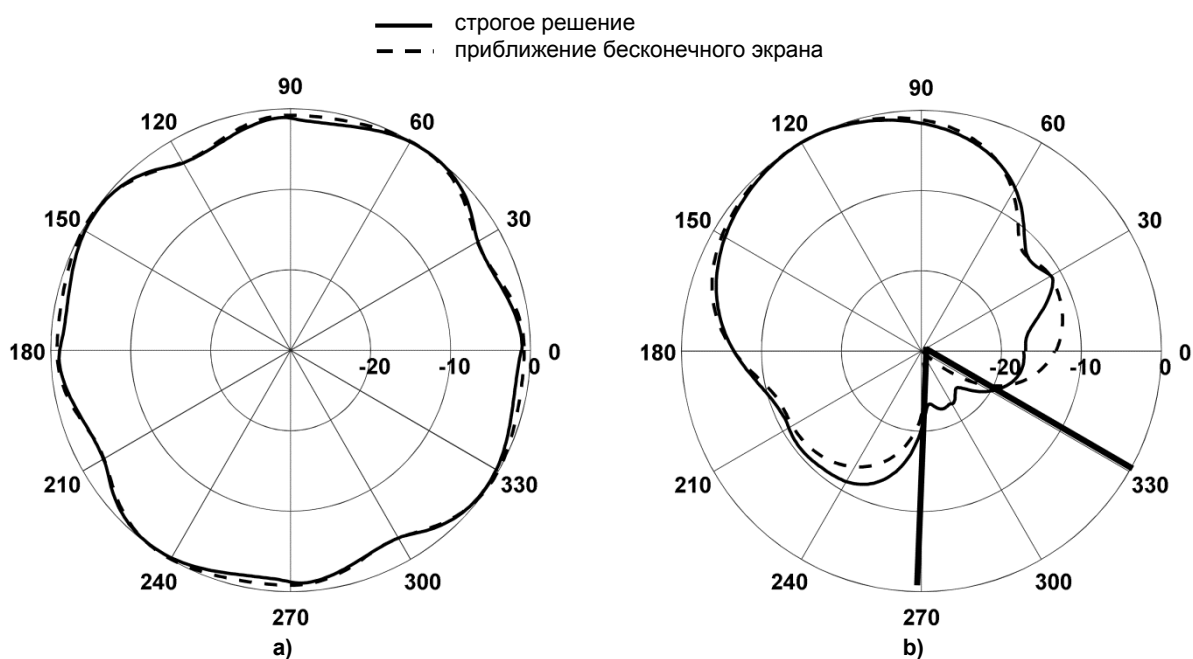


Рис. 6. ДН АС горизонтальной поляризации
Fig. 6. Radiation patterns of a horizontally polarized antenna system

Для оптимизации ДН антенной системы можно использовать углы наклона панельных излучателей относительно граней башни (см. рис. 3а). На рис. 6б приведены секторные ДН, наиболее приближенные к следующим требованиям: уровень ДН не ниже -5 дБ в секторе углов $60-180^\circ$; в секторе углов $270-330^\circ$ уровень ДН не выше -20 дБ. Такие ДН характерны для горной местности, плотной городской застройки. В качестве оптимизационной процедуры приближения ДН АС к заданной используется программный комплекс *fminunc* [16]. Вычислительные эксперименты показывают необходимость совместного излучения трех панельных антенн: № 1, № 2, № 3, башня сечением $2,72 \times 2,72$ м². Угол наклона всех панелей составляет $\alpha = 30^\circ$ (см. рис. 3а), панельные антенны № 2, № 3 сдвинуты ближе к панели № 1 на $0,2$ м относительно осей симметрии, панель № 1 – в центре. Для 4 ТВК АФР ММ: $I = [0,27 \exp(i\pi/2) \ 1 \exp(i0) \ 0,27 \exp(i3\pi/2) \ 0]$, несущая частота – $85,25$ МГц. В этом примере наглядно показано влияние поля излучения панельных антенн в зоне подавления. Следовательно, уточнение результатов проектирования АС обязательно должно учитывать строгие решения для ДН.

Заключение

1. Строгие ММ панельных антенн позволяют детально исследовать широко применяемые практические конструкции антенн. Результаты исследования будут полезны разработчикам и специалистам по эксплуатации АС, так как они позволяют прогнозировать ДН с высокой точностью для заданных условий на этапе математического моделирования, не прибегая к этапу натурных экспериментов.

2. Предложен метод исследования многоэкстремальных нелинейных целевых функционалов, в состав которых входят не только функции АФР возбуждения, но и геометрические характеристики АС. Результаты применения метода оптимизации деформируемого многогранника показывают эффективность моделирования АС различного назначения, подтвержденные экспериментальными исследованиями в условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Неганов В.А., Ключев Д.С., Табаков Д.П. Устройства СВЧ и антенны. Ч. II. Теория и техника антенн. М.: ЛЕНАНД, 2014. 728 с.
2. Balanis C.A. Antenna Theory. Analysis and Design. N.-Y.: John Wiley and Sons, 1997. 957 p.
3. Стрижков В.А. Оценка влияния размеров и формы рефлектора на основные характеристики направленности фазированных антенных решеток // Антенны. 2007. № 6. С. 14–17.
4. Modern Antennas / S. Drabowitch, A. Papiernik, H.D. Griffiths et al. Second Edition. Springer, 2005. 703 p.
5. Захаров Е.В., Рыжаков Г.В., Сетуха А.В. Численное решение трехмерных задач дифракции электромагнитных волн на системе идеальнопроводящих поверхностей методом сингулярных интегральных уравнений // Дифференциальные уравнения. 2014;50(9):1253–1263. DOI: 10.1134/S0374064114090118
6. Пименов Ю.В., Ходьков Д.А. Излучение элементарного электрического вибратора, расположенного над плоским прямоугольным экраном // Радиотехника. 1990. № 11. С. 60–63.
7. Дмитриев В.И., Захаров Е.В. Интегральные уравнения в краевых задачах электродинамики. М.: Изд-во МГУ, 1987. 168 с.
8. Инспекторов Э.М. Численный анализ электромагнитного возбуждения проводящих тел. Минск: Изд-во «Университетское», 1987. 117 с.
9. Хашимов А.Б., Салихов Р.Р., Альметов Р.С. Применение вычислительных схем повышенной точности в проектировании антенных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2014. Т. 3, № 2. С. 77–91.
10. Sophocles J. Orfanidis. Electromagnetic Waves and Antennas. Rutgers University, 2008. URL: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa>.
11. Davidson D.D. Computational Electromagnetics for RF and Microwaves Engineers. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 413 p.
12. Крахин О.И., Левитан Б.А., Кузнецов А.П. Стационарные антенны. Расчет и проектирование конструкций: учеб. М.: Машиностроение, 2014. 240 с.

13. Gibson W.C. *The Method of Moments in Electromagnetics*. N.-Y.: Chapman and Hall/CRC, 2008. 272 p.
14. Voitovich N.I., Khashimov A.B. On the Correspondence of Asymptotic Solutions to 2D and 3D Problems in Antenna Engineering // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2010. Vol. 55, no. 12. P. 1374–1379.
15. Пименов Ю.В. *Линейная макроскопическая электродинамика: вводный курс для радиофизиков и инженеров*. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 535 с.
16. *Toolbox User's Guide*. © 2016–2019 by The MathWorks, Inc.

References

1. Neganov V.A., Klyuev D.S., Tabakov D.P. *Ustroystva SVCh i anteny. Ch. II. Teoriya i tekhnika antenn* [Microwaves Devices and Antennas, Ch.II. Antenna Theory and Technology]. Moscow: LENAND Publ., 2014. 728 p. (In Russ.)
2. Balanis C.A. *Antenna Theory. Analysis and Design*. N.-Y.: John Wiley and Sons, 1997. 957 p.
3. Strizhkov V.A. [Evaluation of the Influence of Reflector Size and Shape on the Main Directional Characteristics of Phased Antenna Arrays]. *Antennas*. 2007;(6):14–17. (In Russ.)
4. Drabowitch S., Papiernik A., Griffiths H.D., Encinas J., Smith B.L. *Modern Antennas*. Second Edition. Springer, 2005. 703 p.
5. Zakharov E.V., Ryzhakov G.V., Setukha A.V. Numerical solution of 3D problems of electromagnetic wave diffraction on a system of ideally conducting surfaces by the method of hypersingular integral equations. *Differential Equations*. 2014;50(9):1240–1251. DOI: 10.1134/S0012266114090110
6. Pimenov Yu.V., Khod'kov D.A. [Radiation from an Elementary Electric Dipole Located above a Flat Rectangular Screen]. *Radioengineering*. 1990;(9):60–63. (In Russ.)
7. Dmitriev V.I., Zakharov E.V. *Integral'nye uravneniya v kraevykh zadachakh elektrodinamiki* [Integral Equations in Boundary Value Problems of Electrodynamics]. Moscow: MSU Publ., 1987. 168 p. (In Russ.)
8. Inspektorov E.M. *Chislennyy analiz elektromagnitnogo vzbuzhdeniya provodyashchikh tel* [Numerical Analysis of the Electromagnetic Excitation of Conducting Objects]. Minsk: Universitetskoe Publ., 1987. 117 p. (In Russ.)
9. Khashimov A.B., Salikhov R.R., Al'metov R.S. Using of the high precision numerical techniques for antenna system design. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*. 2014;3(2):77–91. (In Russ.)
10. Sophocles J. Orfanidis. *Electromagnetic Waves and Antennas*. Rutgers University, 2008. Available at: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa>.
11. Davidson D.D. *Computational Electromagnetics for RF and Microwaves Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 413 p.
12. Krakhin O.I., Levitan B.A., Kuznetsov A.P. *Statsionarnye anteny. Raschet i proektirovanie konstruktsiy: ucheb.* [Stationary antennas. Calculation and design of structures: textbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2014. 240 p. (In Russ.)
13. Gibson W.C. *The Method of Moments in Electromagnetics*. N.-Y.: Chapman and Hall/CRC, 2008. 272 p.
14. Voitovich N.I., Khashimov A.B. On the Correspondence of Asymptotic Solutions to 2D and 3D Problems in Antenna Engineering. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2010;55(12):1374–1379.
15. Pimenov Yu.V. *Lineynaya makroskopicheskaya elektrodinamika: vvodnyy kurs dlya radiofizikov i inzhenerov* [Linear Macroscopic Electrodynamics: An Introductory Course for Radiophysicists and Engineers]. Dolgoprudnyy: Intellekt Publ., 2008. 535 p.
16. *Toolbox User's Guide*. © 2016–2019 by The MathWorks, Inc.

Информация об авторах

Воробьев Михаил Степанович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vorobevms@susu.ru.

Кудрин Леонид Петрович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kudrinlp@susu.ru.

Хашимов Амур Бариевич, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; khashimovab@susu.ru.

Information about the authors

Mihail S. Vorobev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Radioelectronics and Communication Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vorobevms@susu.ru.

Leonid P. Kudrin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Radioelectronics and Communication Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kudrinlp@susu.ru.

Amur B. Khashimov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Radioelectronics and Communication Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; khashimovab@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.12.2025

The article was submitted 29.12.2025

Управление в социально-экономических системах Control in social and economic systems

Научная статья
УДК 004.9
DOI: 10.14529/ctcr260204

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ: ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В.И. Фрейман, vifrejman@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8492-8065>

А.А. Южаков, uz@at.pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1865-2448>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Аннотация. Современные вызовы обуславливают необходимость постоянного повышения показателей эффективности экономики и промышленности. Одним из ключевых факторов для этого представляется улучшение качества подготовки специалистов на всех уровнях системы образования. Во многом оно закладывается на этапе формирования структуры и содержания образовательных программ. Они должны соответствовать современному состоянию науки и техники, быть гибкими, адаптивными, иметь понятные и достоверные инструменты измерения результативности обучения. **Цель исследования** – предложить практический подход к формированию структуры образовательных программ, сочетающий методические, алгоритмические и аналитические компоненты, а также элементы автоматизации проектирования. **Материалы и методы.** Применяется системный подход к проектированию структуры образовательных программ. Он учитывает требования законодательства Российской Федерации, нормативно-методической документации, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, локальных нормативных актов учреждений высшего образования, федеральных государственных образовательных стандартов (утвержденных и проектов) и профессиональных стандартов. **Результаты.** Предложено рассматривать процесс проектирования и реализации образовательных программ на основе стандартов системы менеджмента качества и цикла улучшений Шухарта – Деминга PDCA, проанализированы входные и выходные данные, содержание основных элементов. Создана методика формирования структуры учебного плана с учетом требований и ограничений в виде подхода к расчету компонентов учебного плана. Апробированы способы автоматизации разработки учебного плана в выбранной программной среде. **Заключение.** Предложен подход к проектированию образовательной программы, в котором взаимосвязаны стандарты качества и требования нормативно-методической документации, способы расчета трудоемкости дисциплин в рамках компонентов (семестров) и подходы к автоматизации проектирования с использованием компьютерных технологий. Представлены примеры этапов предложенного практического подхода, которые могут быть использованы с учетом особенностей и условий применения. Разработаны и апробированы программные модули, в которых автоматизированы основные этапы проектирования образовательных программ.

Ключевые слова: образовательная программа, зачетная единица трудоемкости, учебный план, автоматизация проектирования

Для цитирования: Фрейман В.И., Южаков А.А. Проектирование образовательных программ в современных условиях: практический подход // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 40–53. DOI: 10.14529/ctcr260204

Original article

DOI: 10.14529/ctcr260204

DESIGNING OF EDUCATIONAL PROGRAMS IN MODERN CONDITIONS: A PRACTICAL APPROACH

V.I. Freyman, vifrejman@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8492-8065>**A.A. Yuzhakov**, uz@at.pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1865-2448>

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. Modern challenges necessitate continuous improvement of economic and industrial performance indicators. One of the key factors for this is improving the quality of specialist training at all levels of the education system. This is largely determined by the development of the structure and content of educational programs. They must reflect the current state of science and technology, be flexible, adaptable, and have clear and reliable tools for measuring learning outcomes. **The goal** of the research is to propose a practical approach to structuring educational programs that combines methodological, algorithmic, and analytical components, as well as elements of design automation. **Materials and methods.** A system approach to designing the structure of educational programs is used. It takes into account the requirements of the legislation of the Russian Federation, regulatory and methodological documentation, the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, local regulations of higher education institutions, federal state educational standards (approved and draft), and professional standards. **Results.** The article proposes to consider the process of designing and implementing educational programs based on the standards of the quality management system and the Shewhart–Deming PDCA improvement cycle. A methodology for forming the curriculum structure is developed, taking into account the requirements and constraints in the form of an approach to calculating curriculum components. Methods for automating curriculum development in the selected software environment are tested. **Conclusion.** An approach to designing an educational program is proposed that interlinks quality standards and requirements of regulatory and methodological documentation, methods for calculating the labor intensity of disciplines within components (semesters), and approaches to automating design using computer technologies. Examples of stages of the proposed practical approach are presented, which can be used taking into account the specific features and conditions of application. Software modules have been developed and tested, automating the main stages of educational program design.

Keywords: educational program, credit unit of work intensity, curriculum, design automation

For citation: Freyman V.I., Yuzhakov A.A. Designing of educational programs in modern conditions: a practical approach. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(2):40–53. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260204

Введение

Система высшего образования Российской Федерации в силу ряда известных причин находится в процессе перехода к новой образовательной модели (специалитет). Это, а также требования к постоянному повышению качества подготовки, без сомнений, потребует пересмотра образовательных программ для планируемых к утверждению новых Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС). Новые вызовы приводят к необходимости повышения эффективности и результативности образования, особенно высшего, чтобы оно стало важным фактором развития экономики и промышленности. Это может быть достигнуто за счет внедрения новых образовательных технологий (виртуализация, дистанционные технологии с целью расширения географии обучения, привлечения ведущих ученых для преподавания более широкому кругу слушателей, активизация связей с промышленностью и т. п.). Существенную роль может сыграть гибкая система планирования образовательного процесса, учитывающая, в частности, современные тенденции развития науки и техники, потребности региональной экономики, ожидания обучаемых. Это может найти отражение в обновлении и развитии подходов к формированию образовательных программ (ОП) и их основных компонентов, определяющих содержание и результаты обучения (компетентностная модель выпускника – КМВ) и структуру (учебный план – УП).

Можно выделить ряд противоречий, разрешение которых приведет к желаемому результату. С одной стороны, сохраняются базовые парадигмы – компетентностный подход, блочно-модульная структура учебных планов, оценка трудоемкости в зачетных единицах (зе) и т. п. С другой стороны, от новых образовательных программ ждут более тесной увязки с актуальными потребностями экономики и промышленности, а иногда и опережающего развития, индивидуализации подготовки, быстрой адаптации к изменению потребностей. Этого, безусловно, сложно добиться в условиях инерционной образовательной системы (фиксированные на несколько лет учебные планы, зачастую формальный выбор студентами элективных дисциплин, необходимость постоянного обновления структуры и содержания дисциплин, сложный расчет учебной нагрузки с учетом индивидуализации образовательных траекторий и т. д.). Поэтому актуальной представляется проблема обеспечения качества формирования образовательных программ с возможностью разрешения сформулированных выше противоречий.

В рамках предлагаемого практического подхода к проектированию структуры образовательных программ сформулированы основные задачи статьи.

1. Предложить и проанализировать подходы к обеспечению качества образовательных программ на этапах их проектирования и реализации.
2. Представить структуру учебного плана с учетом требований и ограничений нормативно-методической документации. Предложить подход к расчету компонентов учебного плана.
3. Апробировать варианты автоматизации разработки учебного плана.

Обзор литературы

Проблеме важности постоянного улучшения эффективности и результативности образовательных программ посвящены работы многих отечественных и зарубежных исследователей. В частности, в статье Е.В. Романова [1] проводится оценка деятельности отечественных учебных заведений высшей школы как основного инструмента повышения качества кадрового обеспечения для всех сфер деятельности экономики и промышленности. Подробная и глубокая аналитика современного образовательного процесса проведена в работе [2] Е.Д. Патаракиным, А.И. Кутузовым и И.В. Дворецкой. В иностранной научной литературе вопросам взаимосвязи профессионального образования и развития VET (Vocational Education and Training) посвящена работа S. McGrath и S. Yamada [3]. В статье M.J. Jacobson, J.A. Levin, M. Kapur предлагается концептуальная структура сложных систем для обучения (CSCFL), которая изучает коллективное поведение системы и поведение отдельных агентов в системе [4]. В работе [5] представлены результаты проектирования образовательных программ с использованием современных математических моделей (АНР – метод анализа иерархий).

Проведенный анализ показал, что сохраняют актуальность задачи увязки процессов проектирования и реализации образовательных программ с учетом требований стандартов качества, в частности, Международной организации по стандартизации (ISO) и отечественных нормативных документов. Это позволит унифицировать описание процессов, а также более четко выделить функции и связи основных участников (задача № 1 настоящей статьи).

Среди работ, посвященных проектированию базового компонента образовательной программы – учебного плана, можно выделить ряд следующих статей. А.И. Чучалин в [6] проводит оценку структуры и содержания учебных планов на примере инженерных специальностей на соответствие международным стандартам CDIO-FCDI-FFCD (бакалавриат, магистратура, аспирантура). Авторы А.Г. Варфоломеев, Е.А. Питухин и А.И. Тулаева приводят результаты разработки концепции информационной системы управления учебными планами вузов [7]. В статье [8] предлагается междисциплинарная модель построения образовательной программы, созданная при помощи метода гибкого обратного проектирования (Agile Backward Design – ABD). Авторами О.М. Булгаковым и А.И. Ладыгой представлен созданный алгоритм комплексного проектирования учебного плана [9], содержащий четкую последовательность действий с учетом оговариваемых ограничений. А.Б. Сазоновым предлагается подход к построению индивидуальной образовательной траектории обучаемых [10], что является важным компонентом построения адаптируемых под ожидания обучаемых и актуальные требования рынка труда образовательных программ. В [11] авторы П.В. Михайловский, Л.А. Степанова и О.А. Рыкалина рассматривают подходы к решению проблемы необходимости перманентной актуализации содержания рабочих программ

дисциплин. Ученый О. Zuber-Skerritt в [12] представляет образовательную, теоретическую и методологическую основу для использования особого вида прикладного исследования, а именно PALAR (participatory action learning (обучение через действие) and action research (прикладное исследование)).

В анализируемых публикациях главным образом рассматривается содержательная компонента. Между тем всегда актуально эффективное решение «технических» проблем проектирования – увязка с календарным графиком, распределение трудоемкости (зачетных единиц, часов контактной и самостоятельной работы) по модулям, дисциплинам и разделам. При этом решение осложняется наличием большого количества ограничений. Особенно это актуально при построении индивидуальных образовательных траекторий обучаемых (ИОТ). Очень важно автоматизировать проектирование, а информации о подобных системах не так много (задача № 2 настоящей статьи).

Одним из важных инструментов повышения эффективности проектирования и реализации образовательных программ является активное применение самых современных информационно-коммуникационных и образовательных технологий. Они основаны, в частности, на концепции массовых открытых онлайн-курсов (МООК), которая рассмотрена в статье Е.А. Спириной, Н.А. Горбуновой и И.А. Самойловой [13]. В работе Х. Ху, Х. Гуо [14] анализируется интеграция информационных технологий и современного профессионального образования. Р. Rutecka, К. Sicha, М. Rizun and А. Strzelecki представляют результаты применения больших языковых моделей (LLM) для формирования образовательных программ и их компонентов (учебный план, рабочие программы дисциплин) [15]. В эксперименте использовались четыре LLM: ChatGPT-3.5, ChatGPT-4, Google Bard и Gemini.

Несмотря на активное использование информационно-коммуникационных и образовательных технологий, особенно во время и после пандемии, актуальными остаются вопросы обоснованного разделения образовательного контента, изучаемого онлайн и оффлайн, а также создания и внедрения инструментария автоматизации проектирования и анализа (задача № 3 настоящей статьи).

В завершении обзора литературы хотелось бы добавить, что авторами на протяжении длительного интервала времени проводятся исследования и их доведение до внедрения в области проектирования, реализации и оценки результативности образовательных программ. Например, в [16] описан опыт разработки и применения самостоятельно устанавливаемых образовательных стандартов (СУОС). Статья [17] посвящена подходам к управлению, контролю и оцениванию качества реализации образовательных программ. В [18] проиллюстрирован опыт создания компетентностных моделей выпускника. Работы [19, 20] ориентированы на процесс формирования компетенций, а статья [21] – на оценку результата освоения компетенций как результата реализации образовательных программ.

Методология, материалы и методы

В качестве основной методологии планирования образовательных программ выбран системный подход, который предполагает учет потребностей всех основных участников – обучаемых, образовательных учреждений, работодателей, государство. Основное внимание уделяется «технологической» составляющей процедуры планирования – составлению корректного календарного графика, коррелированного с ним распределения трудоемкостей разделов ОП (дисциплин, практик, государственной итоговой аттестации – ГИА) по составляющим (в частности, семестрам) и распределению трудоемкости по разделам ОП внутри семестра.

В работе предлагается подход к количественной оценке граничных значений распределения дисциплин с заданными пороговыми показателями трудоемкости, что дает возможность разработки шаблонов УП, существенно облегчающих процедуру проектирования документов ОП.

Авторами проведена автоматизация части этапов предлагаемого подхода. Для этого использованы достаточно простые программные продукты (например, Microsoft Excel), не требующие глубоких знаний информационных технологий, но позволяющие успешно решать поставленные задачи.

Предлагаемые подходы к решению поставленных в работе задач успешно апробированы и нашли применение при проектировании и реализации образовательных программ в Пермском

национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ), а также в рамках сетевых образовательных программ совместно с ведущими инженерными вузами страны – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова-Ленина (ЛЭТИ), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

При реализации каждого этапа учитывались требования и ограничения, накладываемые нормативно-методической документацией различного уровня, требованиями законов и стандартов РФ. Это позволило получить решение, апробированное для технических специальностей, но достаточно легко адаптируемое для любых других, разумеется, с учетом их специфики и особенностей.

Результаты исследования

Задача 1. Формирование и оценка качества проектирования и реализации образовательных программ

Задача подготовки квалифицированных кадров для экономики и промышленности актуальна для всех этапов подготовки, создания и реализации продукции любого вида и назначения. Это является необходимым условием для обеспечения конкурентоспособности и эффективности предприятий и организаций, являясь значимым фактором развития нашей страны. Очевидно, что точно рассчитать влияние уровня квалификации сотрудников на показатели качества товаров и услуг невозможно. Однако можно быть абсолютно уверенным в том, что только высококвалифицированные и мотивированные специалисты смогут обеспечить их высокий уровень.

На рис. 1 приведена иллюстрация видов подготовки специалистов на примере основных этапов жизненного цикла производства промышленной продукции. Можно выделить государственные системы образования – среднего (СО), среднего специального (ССО) и высшего (ВО), а также так называемого фирменного (например, производителями определенного вида оборудования или программного обеспечения) обучения (ФО) и подготовки кадров на предприятии (ПКП).

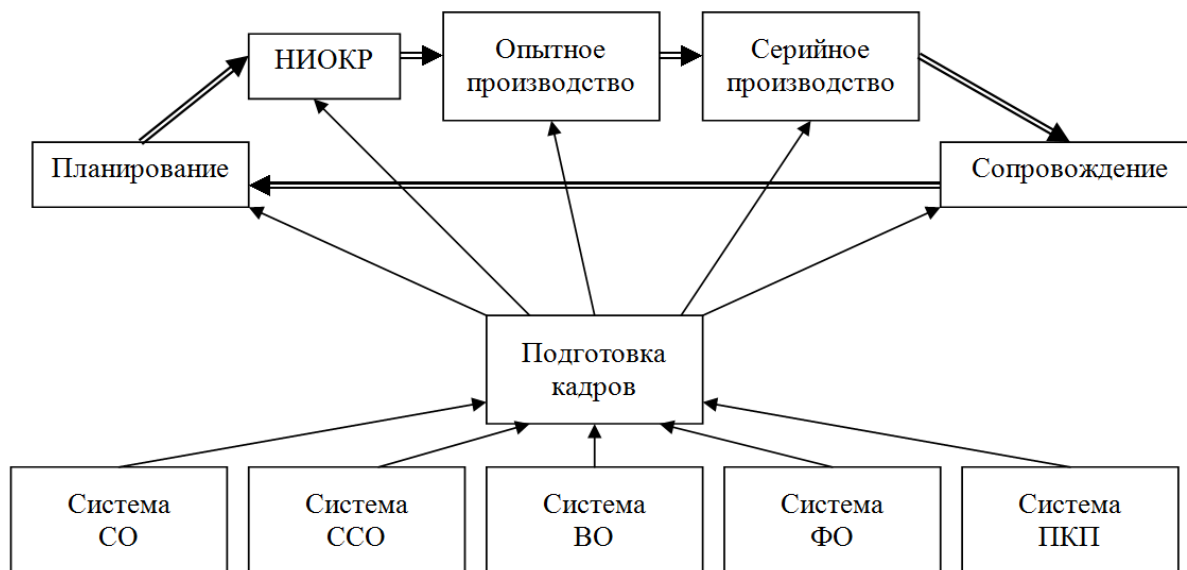


Рис. 1. Варианты организации подготовки кадров для разных этапов жизненного цикла продукции
Fig. 1. Options for organizing personnel training for different stages of the product life cycle

Важными являются все виды подготовки, поскольку каждая решает соответствующий круг задач. Отметим, что по части формальных признаков (объем фундаментальных и прикладных знаний, срок обучения и т. п.) основную роль играет система ВО.

Отрасли современной экономики характеризуются активной динамикой роста и диверсификации. Знания и умения, применяемые в практической деятельности в рамках современных и даже перспективных технологий, методов, информационного, программного, технического обеспечения и т. п., через сравнительно небольшой интервал времени (особенно для сферы информа-

ционных, телекоммуникационных технологий и т. п.) могут частично или полностью устареть. Это требует от специалистов не только высокой квалификации для выполнения текущих обязанностей, но и способность к изменению либо к смене профиля профессиональной деятельности. Поэтому от системы образования требуется не только подготовка выпускника к решению конкретных профессиональных задач, но и формирование социально-личностных качеств, которые дадут ему возможность эффективно адаптироваться к изменениям условий профессиональной деятельности.

Для повышения качества подготовки выпускников необходим системный комплексный подход к организации и реализации процесса обучения. Для его формирования выделим *элементы системы образования*: органы управления образованием, образовательное учреждение, образовательная программа, обучающие, обучаемые (рис. 2).



Рис. 2. Стандартизация и управление качеством подготовки
 Fig. 2. Standardization and quality management of education

На рис. 2 представлены процессы *проектирования* и *реализации* (входящие и исходящие связи относительно ОП соответственно). Органы управления формируют и утверждают нормативную базу: законы, стандарты (образовательные – ФГОС, профессиональные – ПС), нормативно-методическую документацию вуза (НМДв) и стандарты университета (СТУ). Используя это, образовательное учреждение (вуз) разрабатывает и реализует образовательные программы, учитывая при этом современное состояние науки и техники (в формате вектора развития направления – ВРН) и потребности региона (квалификационные требования работодателей – КТР). Для контроля качества проводятся мероприятия по аттестации (текущий контроль – ТК, промежуточная аттестация – ПА и государственная итоговая аттестация – ГИА), проверке документированной информации в рамках аудита качества (ISO ГОСТ) или государственной аккредитации, профессионально-общественной аккредитации (П.-О. аккр.) общественными объединениями работодателей (ОО). Работодатели активно привлекаются для проведения практик (ПР), НИР, а также участвуют в разных видах аттестации. Все участники процесса ориентированы на постоянное улучшение качества подготовки обучаемых.

Методология проектирования и реализации программ подготовки специалистов включает: 1) выбор и обоснование вектора развития направления; 2) требования потребителя в формате КТР; 3) разработку методов и процедур управления и контроля качества подготовки на разных стадиях реализации программы в рамках системы менеджмента качества.

Для оценки качества на этапах *проектирования* и *реализации* образовательных программ их, как особый вид продукции, предлагается рассмотреть в виде цикла улучшений Шухарта – Деминга PDCA: планирование (Plan); реализация (Do); проверка (Check); корректировка (Act).

На рис. 3 представлена структурная схема процесса менеджмента качества на этапе *проектирования* образовательной программы (программы подготовки), построенная в соответствии

с требованиями стандартов ISO 9000:2015 и ISO 9001:2015. Одной из ключевых особенностей процесса проектирования является проводимый в фазе планирования риск-менеджмент, связанный с анализом последствий построения и последующей реализации программы (эффективность, востребованность, масштабируемость и т. д.).



Рис. 3. Схема процесса менеджмента качества на этапе проектирования образовательной программы
Fig. 3. Quality management process diagram at the educational program design stage

Исходными данными для проектирования является нормативная база (государственная и локальная), а также учет ВРН и КТР для выбранного направления или специальности подготовки. В процессе *планирования* разрабатывается комплект учебно-методической документации (УМД) – КМВ, УП, учебно-методические комплексы (УМК) дисциплин, практик (Пр), промежуточной аттестации (ПА), фонды оценочных средств (ФОС), оцениваются риски реализации ОП. Также оцениваются виды *обеспечения* (кадровое (К), материально-техническое (М.-Т.), информационное (И), финансовое (Ф) и т. д.), необходимые для успешной реализации ОП. Планируются мероприятия и инструменты по *оценке результативности* (проверкой структуры и содержания УМД) для возможности *улучшения* (обновление содержания, введение новых образовательных технологий, инструментария и т. п.). Все этапы цикла реализуются, управляются и контролируются участниками образовательного процесса (руководителями программ – РП, направлений подготовки – РН, практик – РПр, учебным и вспомогательным персоналом – УиВП).

Этап *реализации* образовательной программы обеспечивается проведением запланированного объема мероприятий (обучения, контроля, вспомогательных, обеспечивающих и т. п.), контролем результативности (качества), проведением корректирующих действий для повышения уровня результативности до необходимых (запланированных) показателей.

На рис. 4 представлена структурная схема процесса менеджмента качества на этапе *реализации* образовательной программы (программы подготовки), построенная в соответствии с требованиями стандартов ISO 9000:2015 и ISO 9001:2015. Особенностью процесса реализации является диагностирование, дешифрация и оценивание результативности обучения по уровню освоения компетенций и их составляющих, реализуемых в модулях (дисциплинах) и разделах программы.

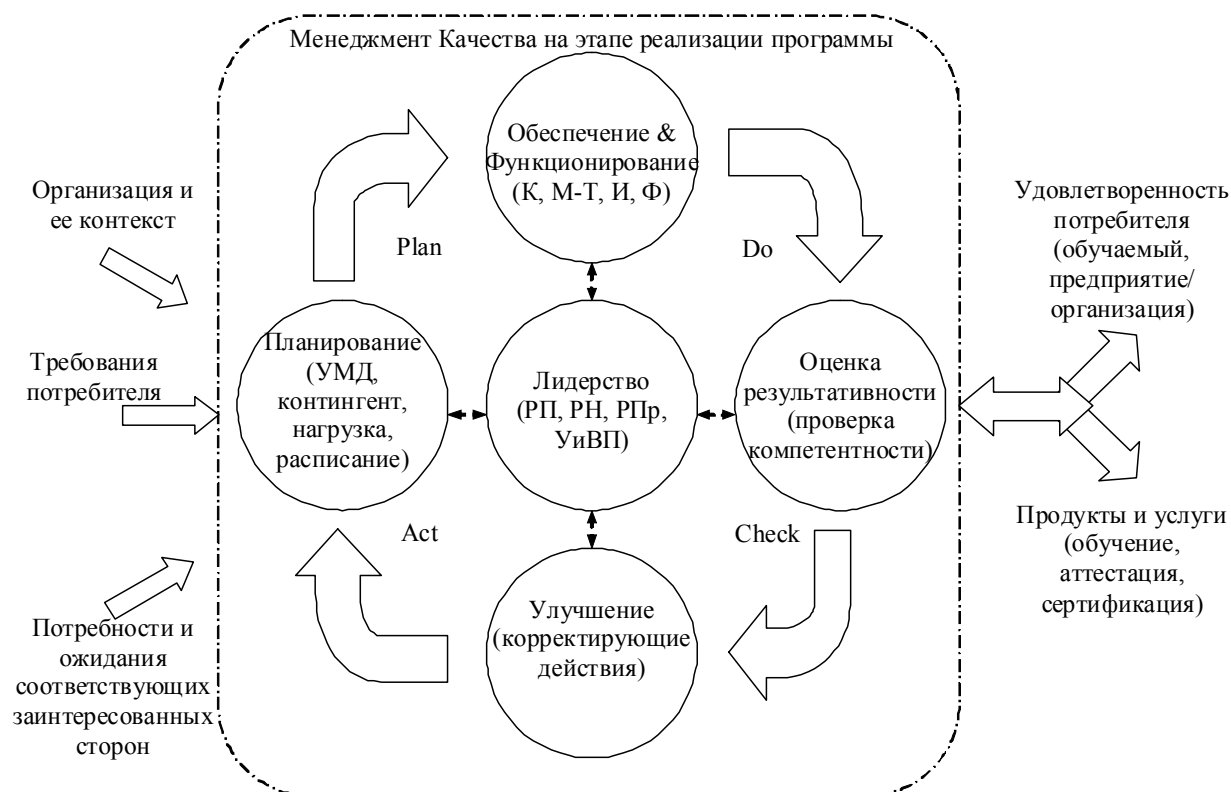


Рис. 4. Схема процесса менеджмента качества на этапе реализации образовательной программы
Fig. 4. Quality management process diagram at the educational program implementation stage

В процессе *планирования* проводится анализ контингента, расчет учебной нагрузки, составление расписания, подготовка оперативной УМД. Виды *обеспечения* актуализируются под текущие показатели образовательного процесса. Оценка результативности проводится мероприятиями по аттестации (текущей, промежуточной, итоговой) для выявления уровня сформированности заявленных в КМВ компетенций и их компонентов («знать», «уметь», «владеть»). В рамках этапа *улучшения* планируются действия, которые могут привести к повышению показателей эффективности и результативности подготовки.

Правильная организация учебного процесса, учитывающая требования системы менеджмента качества, положения вектора развития направления, квалификационные требования работодателей, нормативно-методическую документацию, эффективные способы формирования и средства контроля компетенций и их составляющих, современные образовательные технологии и т. д. позволят обеспечить высокий уровень подготовки и востребованность выпускников.

Задача 2. Формирование структуры учебного плана

Исходные данные:

- календарный график;
- требования ФГОС (компетенции, обязательные дисциплины, распределение трудоемкости по компонентам учебного плана – дисциплины, практики, ГИА и пр.);
- требования локальной нормативной документации вуза по унификации;
- распределение зачетных единиц по семестрам;
- структура унификации.

Ограничения:

- не более 54 ч в неделю (н) для обучающихся (6 дней по 9 часов (академических), включая все виды работы – контактную и самостоятельную);
- 1 н = 6 дн (длительность учебной недели);
- 1 зе = 36 ч (академических);
- 1 н = 54 ч = 1,5 зе;

- минимальное и максимальное значения трудоемкости дисциплины (например, от 3 до 6 зе; если дисциплина на несколько семестров, то это ограничения в семестре);
- длительность сессии (например, от 1 до 3 недель, с возможностью адаптации учебного плана для определенных направлений и специальностей подготовки);
- подготовка к 1 экзамену 4 дня (1 зе, 36 ч);
- максимальное количество зачетов и курсовых работ/проектов в сессию (например, 6);
- соотношение контактной и самостоятельной работы (например, «50 на 50»)...

Далее предлагается вариант решения на примере одного семестра.

1. В соответствии с календарным планом определяется длительность обучения в рамках учебного семестра T_y , н.

2. Определяется максимальная трудоемкость учебного семестра $Z_{y \max}$:

$$36 \cdot Z_{y \max} / T_y = 54 \Rightarrow Z_{y \max} = 54 \cdot T_y / 36. \quad (1)$$

Пример 1. Семестр 18 недель, следовательно, трудоемкость учебного семестра должна быть не более 27 зе.

3. В соответствии с календарным планом определяется длительность сессии в рамках учебного семестра T_c , н.

4. Определяется максимальное количество экзаменов в сессию $N_{э \max}$:

$$N_{э \max} = \lfloor 6 \cdot T_c / 4 \rfloor, \quad (2)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления в меньшую сторону.

Пример 2. Сессия 3 недели, следовательно, максимальное количество экзаменов 4.

5. Расчет полной трудоемкости учебного семестра $Z = Z_y + N_{э}$ (обучение, сессия, практики и ГИА – в соответствии с расчетом и календарным графиком).

6. Расчет минимального ($N_{д \min}$) и максимального ($N_{д \max}$) количества дисциплин в учебном семестре:

$$N_{д \max} = \lfloor (Z - N_{э}) / N_{\min \text{ зе/дисц}} \rfloor; \quad N_{д \min} = \lceil Z / N_{\max \text{ зе/дисц}} \rceil, \quad (3)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления в меньшую сторону; $\lceil \cdot \rceil$ – операция округления в большую сторону.

Примечание 1. Могут быть заданы дополнительные ограничения, например, трудоемкость дисциплин с зачетом должна быть меньше трудоемкости дисциплин с экзаменом.

Пример 3. $Z = 28$ зе, $N_{э} = 3$ экз., $N_{\min \text{ зе/дисц}} = 3$ (с учетом экзамена 4), $N_{\max \text{ зе/дисц}} = 6$ (с учетом экзамена).

$N_{д \max} = 8$. Вариант распределения дисциплин: 3 + 3 + 3 + 3 + 4 + 4 (э) + 4 (э) + 4 (э).

$N_{д \min} = 5$. Вариант распределения дисциплин: (5 + 5 + 6 (э) + 6 (э) + 6 (э)).

Примечание 2.

1. В примере там, где не указан вид аттестации, – зачет или зачет с оценкой.

2. Можно добавлять нераспределенные («лишние») зе и в дисциплины с зачетом, и в дисциплины с экзаменом, до заданной трудоемкости.

3. Возможно перераспределение трудоемкости дисциплин с возвратом на предыдущие этапы, вплоть до изменения и индивидуализации календарного плана.

Для составления всего учебного плана предлагается последовательно воспользоваться предложенным подходом для каждого семестра с учетом требований и ограничений (в семестре, учебном году, по всей ОП).

Задача 3. Автоматизация проектирования учебных планов

Для повышения эффективности процедуры проектирования (скорость, контроль соблюдения ограничений, время коррекции) предлагается составить шаблон (шаблоны) учебного плана (рис. 5).

Введем следующие условные обозначения дисциплин для «нулевой» итерации формирования учебного плана:

ДЭ $A.B$, где A – номер семестра, B – номер дисциплины в семестре (произвольно, только для нумерации) для дисциплины с экзаменом.

ДЗ $A.B$, где A – номер семестра, B – номер дисциплины в семестре (произвольно, только для нумерации) для дисциплины с зачетом.

Шаблон реализован в файле формата Microsoft Excel. Проверки реализованы при помощи функций условного форматирования (например, при нарушении требований по максимальной трудоемкости в неделю ячейка с количеством зе в рассматриваемом семестре будет выделена красным цветом).

Для расчетов выбрано минимально возможное количество дисциплин в заданном диапазоне трудоемкости (от 3 до 6).

Обсуждение

Проведен анализ результатов решения поставленных задач в рамках предлагаемого практического подхода к проектированию структуры образовательных программ в современных условиях.

Предложено оригинальное решение, которое заключается в описании процедур проектирования и реализации образовательных программ при помощи цикла Шухарта – Деминга. Это позволило выделить и описать основные субъекты и объекты ОП и связи между ними. При этом выполнена четкая и понятная адаптация терминологии стандартов качества ISO серии 9000 к рассматриваемой предметной области. Это позволяет разрабатывать локальную нормативную документацию образовательной организации в увязке с требованиями указанных стандартов (например, стандарты университета как компоненты системы менеджмента качества, самостоятельно устанавливаемые образовательные стандарты и т. п.).

Предложен математический инструментарий для расчета трудоемкости основных компонентов учебного плана – семестров. Он учитывает временные (длительность семестра, сессии, практик) и количественные (ограничения по трудоемкости в учебную неделю, количество экзаменов в сессию) характеристики. Это позволяет использовать предлагаемое решение как математическое обеспечение разрабатываемой системы автоматизации проектирования ОП для повышения эффективности и ускорения разработки учебных планов.

Проиллюстрирован вариант применения разработанного программного инструментария для автоматизации создания учебных планов. Он учитывает предложенные ранее полученные решения в рамках предлагаемого практического подхода. Особенностью является введение большого количества проверок выполнения заданных ограничений (максимальная и минимальная трудоемкости семестров и учебного года, максимальная нагрузка в неделю и пр.). Это позволяет повысить качество и скорость разработки учебных планов образовательных программ.

Решения частных задач предлагаемого подхода могут быть использованы в практике проектирования и реализации ОП.

Интересными и перспективными направлениями дальнейших исследований представляются:

– проектирование учебного плана «снизу вверх», когда обучаемый выбирает дисциплины и они формируют определенный набор компетенций, с учетом связей между дисциплинами (семантические и календарные);

– проектирование учебного плана «вверх-вниз», когда обучаемый выбирает компетенции, а ему предлагаются варианты ИОТ.

Необходимо ориентироваться на практическую реализуемость предлагаемых решений с учетом особенностей отечественной системы образования. Также планируется активно использовать разнообразный математический аппарат, способы автоматизации проектирования, информационные технологии и программный инструментарий, методы искусственного интеллекта и анализа данных.

Заключение

В рамках статьи были решены следующие задачи:

1. Подчеркнута важность подготовки кадров, особенно в системе высшего образования, для создания условий повышений эффективности экономики и производства. Предложены подходы к обеспечению качества проектирования и реализации образовательных программ, основанные на стандартах системы менеджмента качества: требования, нормативно-методическая документация, варианты применения.

2. Разработан алгоритм проектирования элементов учебного плана, позволяющий выбрать различные варианты наполнения его дисциплинами с учетом введенных рекомендаций и ограничений; приведены иллюстрирующие примеры.

3. Предложенный подход к формированию структуры образовательной программы доведен до уровня автоматизации в выбранной программной среде.

Определены перспективы дальнейших исследований в направлении индивидуализации построения образовательной программы. Это позволит учесть потребности всех участников образовательного процесса – обучающихся, вузов, работодателей.

Список литературы

1. Сенашенко В.С., Стручкова Е.П. Особенности сопряжения высшего образования и сферы труда в условиях структурных преобразований отечественной системы высшего образования // Высшее образование в России. 2025. Т. 34, № 3. С. 31–51. DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-3-31-51.

2. Патаракин Е.Д., Кутузов А.И., Дворецкая И.В. Мультиодальная учебная аналитика: библиометрический и онтологический анализ // Образование и наука. 2025. Т. 27, № 7. С. 33–71. DOI: 10.17853/1994-5639-2025-7-33-71

3. McGrath S., Yamada S. Skills for Development and Vocational Education and Training: Current and Emergent Trends // International Journal of Educational Development. 2023. Vol. 102. Article no. 102853. DOI: 10.1016/j.ijedudev.2023.102853

4. Jacobson M.J., Levin J.A., Kapur M. Education as a Complex System: Conceptual and Methodological Implications // Educational Researcher. 2019. Vol. 48 (2). P. 112–119. DOI: 10.3102/0013189X19826958

5. Liu P., Li L., Lin L. Design of University Public Curriculum Education System Platform Based on AHP Algorithm // Zhang Y., Shah N. (eds.) Application of big data, Blockchain, and Internet of things for education informatization. BigIoT-EDU 2023. Lecture notes of the Institute for computer sciences, social informatics and telecommunications engineering. 2024. Vol. 581. P. 395–405. DOI: 10.1007/978-3-031-63133-7_39

6. Чучалин А.И. Оценка компонентов учебных планов инженерных программ на соответствие рекомендациям CDIO-FCDI-FFCD Standards // Высшее образование в России. 2020. Т. 29. № 7. С. 9–21. DOI: 10.31992/10.31992/0869-3617-2020-29-7-9-21

7. Варфоломеев А.Г., Питухин Е.А., Тулаева А.И. Концепция информационной системы управления учебными планами вузов // Университетское управление: практика и анализ. 2016. № 5 (105). С. 122–132. DOI: 10.15826/umj.2016.105.050

8. Dazeley R., Goriss-Hunter A., Meredith G. et al. Agile Backward Design: a Framework for Planning Higher Education Curriculum // Australian Education Researcher. 2025. Vol. 52. P. 1489–1508. DOI: 10.1007/s13384-024-00772-7

9. Булгаков О.М., Ладыга А.И. Примерный алгоритм комплексного проектирования учебного плана как главного этапа разработки основной профессиональной образовательной программы // Вестник Краснодарского университета МВД России. 2019. № 1 (43). С. 113–121.

10. Сазонов Б.А. Организация образовательного процесса: возможности индивидуализации обучения // Высшее образование в России. 2020. Т. 29, № 6. С. 35–50. DOI: 10.31992/0869-3617-2019-29-6-35-50

11. Михайловский П.В., Степанова Л.А., Рыкалина О.А. Проблемы разработки и актуализации рабочих программ в системе высшего образования // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2023. № 12-3. С. 453–458. DOI: 10.17513/vael.3195

12. Zuber-Skerritt O. An Educational Framework for Participatory Action Learning and Action Research (PALAR) // Educational Action Research. 2018. Vol. 26 (4). P. 513–532. DOI: 10.1080/09650792.2018.1464939

13. Спирина Е.А., Горбунова Н.А., Самойлова И.А. Использование MOOK при организации проблемно-ориентированного обучения в профессиональной подготовке студентов IT-направления // Образование и наука. 2024. № 26 (10). С. 166–189. DOI: 10.17853/1994-5639-2024-10-166-189

14. Xu X., Guo X. Towards Quality Assurance for Curriculum of Vocational Education Based on Effective Learning // Proceeding of 2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). Toronto, ON, Canada, 2019. P. 410–414. DOI: 10.1109/ICCSE.2019.8845400

15. Generative AI in Curriculum Design: Empirical Insights into Model Performance and Educational Constraints / P. Rutecka, K. Cicha, M. Rizun, A. Strzelecki // IEEE Transactions on Learning Technologies. 2025. Vol. 18. P. 757–768. DOI: 10.1109/TLT.2025.3587081

16. Практика разработки и применения самостоятельно устанавливаемых образовательных стандартов и программ высшего образования / Н.Н. Матушкин, В.И. Фрейман, А.А. Южаков и др. // Высшее образование в России. 2014. № 6. С. 5–13.

17. Кон Е.Л., Фрейман В.И., Южаков А.А. Разработка и исследование подходов к управлению, контролю и оцениванию качества реализации компетентностно-ориентированных образовательных программ // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 3. С. 356–372.

18. Кон Е.Л., Фрейман В.И., Южаков А.А. Практический подход к формированию компетентностной модели выпускника технического университета // Университетское управление: практика и анализ. 2013. № 2 (84). С. 52–58.

19. Кон Е.Л., Фрейман В.И., Южаков А.А. Разработка подходов к формализованному описанию контролепригодной компонентной структуры дисциплинарной компетенции // Образование и наука. 2015. № 4 (123). С. 52–68. DOI: 10.17853/1994-5639-2015-4-52-68

20. К вопросу о формировании компетенций при разработке основной образовательной программы / Е.Л. Кон, В.И. Фрейман, А.А. Южаков, Е.М. Кон // Открытое образование. 2013. № 2 (97). С. 4–10. DOI: 10.21686/1818-4243-2013-2(97)-4-10

21. Кон Е.Л., Фрейман В.И., Южаков А.А. Анализ возможности применения аппарата и методов технической диагностики для контроля и оценки результатов освоения компетентностно-ориентированных образовательных программ // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 7. С. 66–71.

References

1. Senashenko V.S., Struchkova E.P. Features of the Conjugation of Higher Education and the Labor Sphere in the Context of Structural Transformations of the Domestic Higher Education System. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2025;34(3):31–51. (In Russ.) DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-3-31-51

2. Patarakin E.D., Kutuzov A.I., Dvoreckaja I.V. Multimodal Learning Analytics: a Bibliometric and Ontological Analysis. *Obrazovanie i nauka = The Education and Science Journal*. 2025;27(7):33–71. (In Russ.) DOI: 10.17853/1994-5639-2025-7-33-71

3. McGrath S., Yamada S. Skills for Development and Vocational Education and Training: Current and Emergent Trends. *International Journal of Educational Development*. 2023;102:102853. DOI: 10.1016/j.ijedudev.2023.102853

4. Jacobson M.J., Levin J.A., Kapur M. Education as a Complex System: Conceptual and Methodological Implications. *Educational Researcher*. 2019;48(2):112–119. DOI: 10.3102/0013189X19826958

5. Liu P., Li L., Lin L. Design of University Public Curriculum Education System Platform Based on AHP Algorithm. In: Zhang Y., Shah N. (eds.) *Application of big data, Blockchain, and Internet of things for education informatization. BigIoT-EDU 2023. Lecture notes of the Institute for computer sciences, social informatics and telecommunications engineering*. 2024. Vol. 581. P. 395–405. DOI: 10.1007/978-3-031-63133-7_39

6. Chuchalin A.I. Evaluation of the Engineering Curriculum Elements for Compliance with the CDIO-FCDI-FFCD Standards. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2020;29(7):9–21. (In Russ.) DOI: 10.31992/10.31992/0869-3617-2020-29-7-9-21

7. Varfolomeev A.G., Pituhin E.A., Tulaeva A.I. The Concept of Information System of Universities Curricula Management. *University Management: Practice and Analysis*. 2016;5(105):122–132. (In Russ.) DOI: 10.15826/umj.2016.105.050

8. Dazeley R., Goriss-Hunter A., Meredith G. et al. Agile Backward Design: a Framework for Planning Higher Education Curriculum. *Australian Education Researcher*. 2025;52:1489–1508. DOI: 10.1007/s13384-024-00772-7

9. Bulgakov O.M., Ladyga A.I. Sample Algorithm of Complex Design of the Educational Plan as a Main Stage of Development of the Main Professional Educational Program. *Bulletin of Krasnodar university of Russian MIA*. 2019;1(43):113–121. (In Russ.)

10. Sazonov B.A. Organization of the Educational Process: Opportunities for Individualization of Training. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2020;29(6):35–50. (In Russ.) DOI: 10.31992/0869-3617-2019-29-6-35-50

11. Mikhailovsky P.V., Stepanova L.A., Rykalina O.A. Problems of Developing and Updating

Work Programs in the Higher Education System. *Journal of Altai academy of economics and law*. 2023;12-3:453–458. (In Russ.) DOI: 10.17513/vaael.3195

12. Zuber-Skerritt O. An Educational Framework for Participatory Action Learning and Action Research (PALAR). *Educational Action Research*. 2018;26(4):513–532. DOI: 10.1080/09650792.2018.1464939

13. Spirina E.A., Gorbunova N.A., Samojlova I.A. Using MOOCs to Organize Problem-based Learning in the Professional Training of IT Students. *Образование и наука = The Education and Science Journal*. 2024;26(10):166–189. (In Russ.) DOI: 10.17853/1994-5639-2024-10-166-189

14. Xu X., Guo X. Towards Quality Assurance for Curriculum of Vocational Education Based on Effective Learning. In: *Proceeding of 2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*. Toronto, ON, Canada, 2019. P. 410–414. DOI: 10.1109/ICCSE.2019.8845400

15. Rutecka P., Cicha K., Rizun M., Strzelecki A. Generative AI in Curriculum Design: Empirical Insights into Model Performance and Educational Constraints. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2025;18:757–768. DOI: 10.1109/TLT.2025.3587081

16. Matushkin N.N., Freyman V.I., Yuzhakov A.A., Danilov A.N., Kon E.L., Lobov N.V. Practice of Independently Established Standards for Higher Education and Programs Development and Application. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2014;(6):5–13. (In Russ.)

17. Kon E.L., Freyman V.I., Yuzhakov A.A. Design and Research of Approaches to the Management, Monitor, and Assessment of Quality of Implementing Competence-Based Study Programmes. *Science and Education of the Bauman MSTU*. 2015;(3):356–372. (In Russ.)

18. Kon E.L., Freyman V.I., Yuzhakov A.A. Practical Approach to Formation the Competence-based Model for a Technical University Graduate. *University Management: Practice and Analysis*. 2013;2(84):52–58. (In Russ.)

19. Kon E.L., Freyman V.I., Yuzhakov A.A. Approaches Development to Formalized Description of the Disciplinary Competence of Testable Component Structure. *Образование и наука = The Education and Science Journal*. 2015;4(123):52–68. (In Russ.) DOI: 10.17853/1994-5639-2015-4-52-68

20. Kon E.L., Freyman V.I., Yuzhakov A.A., Kon E.M. Developing Competences at the Basic Educational Program Implementation. *Open Education*. 2013;2(97):4–10. (In Russ.) DOI: 10.21686/1818-4243-2013-2(97)-4-10

21. Kon E.L., Freyman V.I., Juzhakov A.A. About Possibility of Use the Technical Diagnostics Methods for Control and an Assessment the Basic Educational Programs Development Results. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*. 2014;7:66–71. (In Russ.)

Информация об авторах

Фрейман Владимир Исаакович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматизации и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; vifrejman@pstu.ru.

Южаков Александр Анатольевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизации и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; uz@at.pstu.ru.

Information about the authors

Vladimir I. Freyman, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; vifrejman@pstu.ru.

Alexander A. Yuzhakov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; uz@at.pstu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2025

The article was submitted 30.11.2025

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМИ ПОДСТАНЦИЯМИ В АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

О.В. Логиновский, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

Д.В. Топольский, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

Н.Д. Топольский, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

И.Г. Топольская, topolskaiaig@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3314-6623>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются методы и алгоритмы проактивного управления цифровыми подстанциями в активно-адаптивных электроэнергетических системах. Проактивное управление представлено как организационная задача, требующая нового подхода к распределению функций принятия решений. Показано, что цифровые подстанции трансформируются в активных агентов системы управления, а цифровые трансформаторы выступают информационными агентами, формирующими данные для поддержки решений на всех уровнях иерархии управления энергообъектами. **Цель исследования:** разработка методов и алгоритмов проактивного управления энергообъектами в активно-адаптивных электроэнергетических системах, обеспечивающих интеллектуальную поддержку обоснованности и оперативности принятия решений диспетчерским персоналом на основе прогнозного анализа данных цифровых трансформаторов и перераспределения функций между уровнями иерархии управления энергообъектами. **Материалы и методы.** Исследование базируется на теории организационных систем, теории активных систем и теории информационных процессов и систем. Применены методы системного анализа, математического и имитационного моделирования, искусственного интеллекта (гибридные нейросетевые архитектуры CNN + Bi-GRU с вниманием), а также экспериментальные методы на платформе «Авача». **Результаты.** Разработана концепция распределенного проактивного управления с переносом функций интеллектуальной поддержки на полевой уровень, сокращающая время реакции до 1–2 мс. Предложен метод поддержки решений на основе нейросетевой архитектуры с точностью 96,1 % и эффективностью 0,8 MFLOPS. Обоснован принцип распределения функций с асинхронным алгоритмом lock-free синхронизации. Разработана методология интеграции в инфраструктуру цифровых подстанций, совместимая с МЭК 61850. Эксперименты на платформе «Авача» подтвердили точность 95,7 % и время реакции $1,2 \pm 0,3$ мс. Результаты внедрены в ООО «Челэнергоприбор». **Заключение.** Разработанные методы реализуют новую организационную структуру управления цифровыми подстанциями, соответствующую стратегии создания интеллектуальных активно-адаптивных систем, и повышают живучесть энергосистем за счет раннего выявления аварийных режимов.

Ключевые слова: проактивное управление, активно-адаптивная сеть, цифровая подстанция, интеллектуальная поддержка принятия решений, гибридная нейронная сеть, цифровой трансформатор, МЭК 61850

Для цитирования: Методы и алгоритмы проактивного управления цифровыми подстанциями в активно-адаптивных электроэнергетических системах / О.В. Логиновский, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский, И.Г. Топольская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 54–63. DOI: 10.14529/ctcr260205

Original article

DOI: 10.14529/ctcr260205

METHODS AND ALGORITHMS FOR PROACTIVE CONTROL OF DIGITAL SUBSTATION IN ACTIVE-ADAPTIVE ELECTRIC POWER SYSTEMS

O.V. Loginovskiy, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

D.V. Topolskii, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

N.D. Topolskii, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

I.G. Topolskaia, topolskaiaig@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3314-6623>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The paper considers methods and algorithms for proactive control of energy facilities in active-adaptive electric power systems. Proactive control is presented as an organizational task requiring a new approach to the distribution of decision-making functions. It is shown that digital substations are transformed into active agents of the control system, and digital transformers act as information agents generating data to support decisions at all levels of the hierarchy. **Aim.** Development of methods and algorithms for proactive control that improve the validity and efficiency of dispatch personnel decisions based on predictive analysis of digital transformer data and redistribution of functions between hierarchy levels. **Materials and methods.** The research is based on the theory of organizational systems, the theory of active systems and the theory of information processes and systems. Methods of system analysis, mathematical and simulation modeling, artificial intelligence (hybrid neural network architectures CNN + Bi-GRU with attention), and experimental methods on the Avacha platform were applied. **Results.** A concept of distributed proactive control with the transfer of intelligent support functions to the field level has been developed, reducing response time to 1–2 ms. A decision support method based on a neural network architecture with 96.1% accuracy and 0.8 MFLOPS efficiency is proposed. The principle of function distribution with an asynchronous lock-free synchronization algorithm is substantiated. A methodology for integration into the digital substation infrastructure compatible with IEC 61850 has been developed. Experiments on the Avacha platform confirmed 95.7% accuracy and 1.2 ± 0.3 ms response time. The results are implemented at Chelenergopribor LLC. **Conclusion.** The developed methods implement a new organizational structure for digital substation management corresponding to the strategy of creating intelligent active-adaptive systems and increase the survivability of power systems through early detection of emergency modes.

Keywords: proactive control, active-adaptive network, digital substation, intelligent decision support, hybrid neural network, digital transformer, IEC 61850

For citation: Loginovskiy O.V., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Topolskaia I.G. Methods and algorithms for proactive control of digital substation in active-adaptive electric power systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(2):54–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260205

Введение

Цифровая трансформация активно развивает интеллектуальные энергосистемы – неотъемлемый элемент умного производства и качества жизни. В этой связи на цифровизацию энергетики направлены значительные ресурсы и достижения в информационных технологиях, электронике, экономике и управлении [1, 2].

Как отмечает академик Д.А. Новиков, энергетическая политика России нацелена на эффективное использование ресурсов для экономического роста и повышения качества жизни. Решение этих задач требует не экстенсивного наращивания мощностей, а модернизации технологий управления – перехода к интеллектуальной энергетике [3]. Ключевая черта новой энергетики – повышение гибкости управления и способности адаптироваться к изменению внешних условий, что отражено в концепции «интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью» [4].

Гибкость обеспечивается новым взглядом на информацию и управление. Меняется не только объем, но и состав информации: проактивное управление основывается на прогнозах потребления и генерации, экономических и финансовых данных [3].

С позиций теории организационных систем [5, 6], совокупность цифровых подстанций образует иерархическую организационную сеть с распределением функций, включением лиц, принимающих решения, и необходимостью координации в условиях временных ограничений.

Основа перехода к интеллектуальным энергосистемам – цифровые подстанции и цифровые измерительные трансформаторы. В новой парадигме подстанция становится активным агентом с функциями мониторинга, анализа и принятия решений [7, 8], а цифровые трансформаторы – информационными агентами, формирующими потоки данных в стандарте МЭК 61850-9-2 для управленческих решений [9, 10].

Однако существующая практика базируется на реактивной модели, где управляющее воздействие следует за аварией. Временной лаг между первыми признаками аварии и ее идентификацией часто достаточен для развития тяжелой системной аварии из-за высокой динамики процессов и ограничений человека при восприятии больших объемов информации.

Переход к проактивному управлению становится организационной необходимостью: способность заблаговременно идентифицировать признаки аварии и предоставить лицу, принимающему решение, верифицированный прогноз – ключевой фактор повышения живучести организационной сети. Возникает научная задача разработки методов интеллектуальной поддержки принятия решений, трансформирующих данные цифровых трансформаторов в прогнозные оценки состояний объекта.

На рис. 1 представлено сравнение вариантов организации управления цифровой подстанцией. Традиционная централизованная архитектура управления приводит к задержкам до 10–15 мс. В предлагаемой архитектуре устройство объединения становится активным интеллектуальным агентом, способным выполнять проактивный анализ локально и инициировать воздействия, сокращая время реакции до 1–2 мс.



Рис. 1. Сравнение вариантов организации управления цифровой подстанцией
Fig. 1. Comparison of options for organizing digital substation control

Цифровые трансформаторы создают информационную основу для проактивного управления (рис. 2). Аппаратной основой оконечного блока выбрана отечественная платформа «Авача» (рис. 3) с поддержкой МЭК 61850, аппаратным ускорителем и синхронизацией Precision Time Protocol (PTP) в соответствии со стандартом IEEE 1588.

Цель исследования – разработка методов и алгоритмов проактивного управления энергообъектами в активно-адаптивных электроэнергетических системах, обеспечивающих интеллектуальную поддержку обоснованности и оперативности принятия решений диспетчерским персоналом на основе прогнозного анализа данных цифровых трансформаторов.

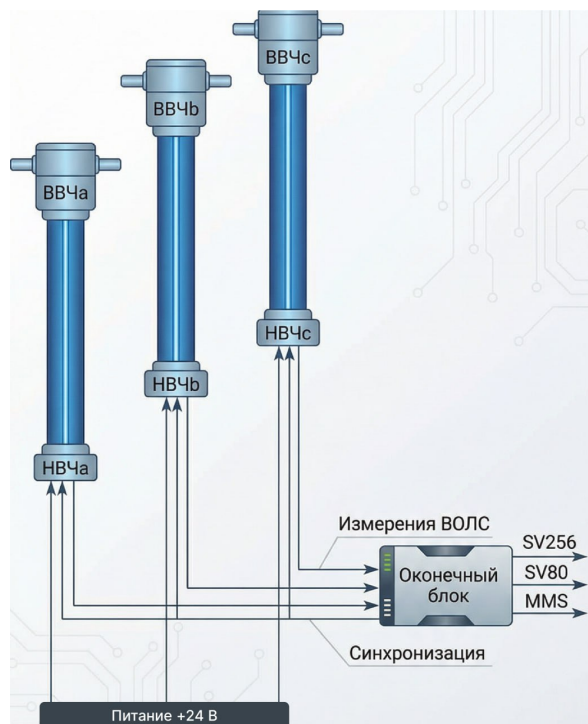


Рис. 2. Функциональная схема измерительной системы на основе цифрового трехфазного трансформатора
Fig. 2. Functional diagram of the measuring system based on a digital three-phase transformer



Рис. 3. Плата обработки цифровых сигналов «Авача»
Fig. 3. Digital signal processing board “Avacha”

1. Постановка задач

Анализ современного состояния исследований в области интеллектуальных энергосистем и теории активных систем позволяет выделить ключевые нерешенные научные проблемы управления цифровыми подстанциями как активными агентами организационной системы [11–15].

Первая проблема – оптимальное распределение полномочий между диспетчерским центром и распределенными агентами. Требуется формализовать, какие функции могут быть делегированы на полевой уровень для повышения быстродействия и живучести системы.

Вторая проблема – координация автономных агентов в условиях неполной информации и потенциального конфликта локальных целей. Необходимы алгоритмы согласованной работы для достижения глобальной цели – устойчивости энергоснабжения [16].

Третья проблема – архитектура систем поддержки принятия решений, встраиваемых в агента. Требуется баланс между точностью прогноза, интерпретируемостью, вычислительной сложностью и устойчивостью при ограничениях реального времени [17, 18].

Четвертая проблема – обеспечение устойчивости и безопасности распределенной системы: защита от сбоев, кибератак и ошибочных решений на основе применения искусственного интеллекта (ИИ), включая механизмы доверия и резервирования, совместимые с МЭК 61850 [19, 20].

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать концепцию распределенного проактивного противоаварийного управления цифровой подстанцией.
2. Предложить метод интеллектуальной поддержки решений на основе гибридной нейросетевой архитектуры.
3. Обосновать принцип распределения функций с асинхронным алгоритмом lock-free синхронизации.
4. Разработать методику обучения нейросетевой модели для проактивного анализа.
5. Создать методологию интеграции в инфраструктуру цифровых подстанций, совместимую с МЭК 61850.
6. Экспериментально подтвердить работоспособность алгоритмов проактивного управления на платформе «Авача».

2. Концепция распределенного проактивного управления цифровыми подстанциями

Классическая энергосистема представляет собой централизованную иерархическую структуру с реактивной моделью управления, характеризующуюся инерционностью, низкой адаптивностью и уязвимостью к каскадным авариям [3, 5, 21]. В рамках концепции активно-адаптивных сетей предлагается архитектура распределенного проактивного управления, основанная на перераспределении функций анализа и принятия решений между уровнями иерархии. Ключевой элемент – трансформация цифровой подстанции в активного агента с функциями автономного мониторинга, анализа и принятия решений [7, 8, 11].

В традиционной архитектуре (рис. 4) данные последовательно передаются через устройство объединения в шину процесса к централизованным устройствам РЗА, что приводит к задержкам 10–15 мс [1].

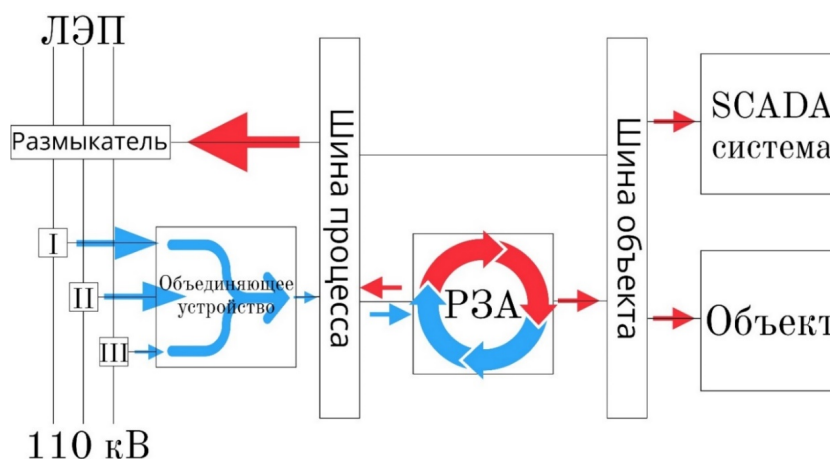


Рис. 4. Схема движения данных при аварийной ситуации в традиционной архитектуре цифровой подстанции

Fig. 4. Data flow diagram in an emergency situation in the traditional architecture of digital substation

В предлагаемой архитектуре устройство объединения становится активным интеллектуальным агентом, выполняющим проактивный анализ локально и инициирующим управляющие воздействия (рис. 5). Сохраняется обратная совместимость: устройство продолжает передавать SV-пакеты в шину процесса для традиционных РЗА, создавая резервный канал защиты [22].

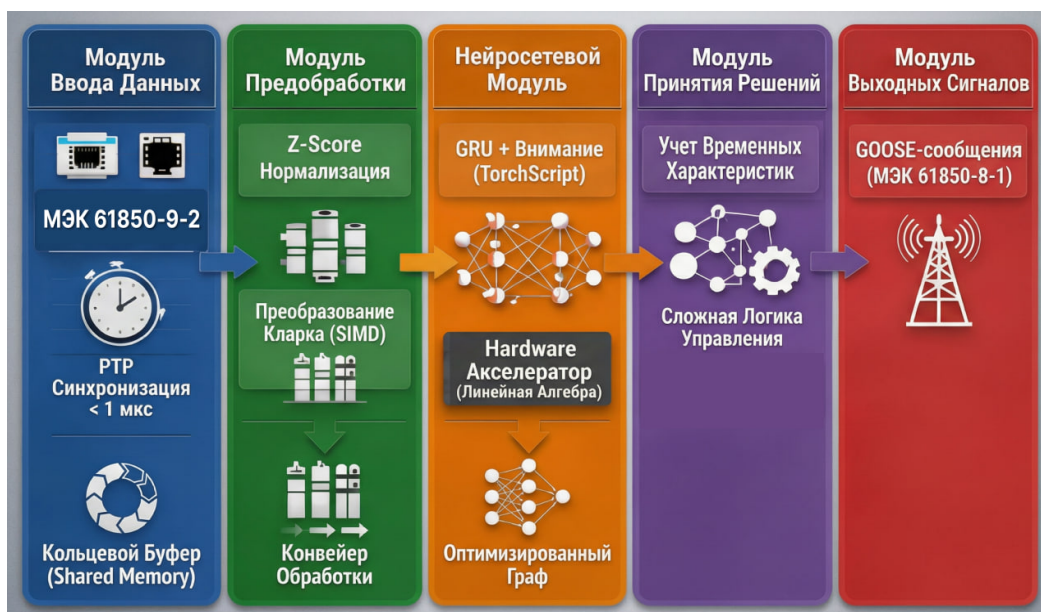


Рис. 5. Модульная архитектура программного комплекса интеллектуального устройства объединения
Fig. 5. Modular architecture of the software complex of the intelligent merging unit

Ключевые принципы концепции:

- децентрализация обработки данных на месте их генерации;
- распределенная архитектура принятия решений с автономными узлами;
- сохранение резервирования традиционных систем РЗА;
- интеграция нейросетевых моделей для прогнозирования аварийных режимов.

Техническая реализация предполагает оснащение устройства объединения вычислительными модулями для машинного обучения. Оценка эффективности показывает сокращение времени реакции до 1–2 мс за счет исключения промежуточных этапов передачи данных и организации локального контура принятия решений. Дополнительное преимущество – повышение отказоустойчивости: каждый модуль работает автономно, обеспечивая локальную защиту при отказах других компонентов.

3. Метод интеллектуальной поддержки принятия решений на основе гибридной нейросетевой архитектуры

Для реализации проактивного управления необходим аналитический инструментарий, способный выявлять сложные зависимости в высокочастотных потоках данных от цифровых трансформаторов [17, 18]. Традиционные методы требуют ручного конструирования признаков и недостаточно адаптивны [23]. В таблице представлен сравнительный анализ архитектур нейронных сетей для проактивного анализа.

Сравнительный анализ архитектур нейронных сетей для проактивного анализа
Comparative analysis of neural network architectures for proactive analysis

Архитектура сети	Точность (F1-score), %	Время вывода, мс	Потребление памяти, МБ	Поддержка временных зависимостей	Способность к выделению локальных паттернов	Пригодность для встраивания
CNN (только сверточные слои)	89,2 ± 1,5	0,4	0,3	Низкая	Высокая	Высокая
LSTM (однонаправленная)	92,8 ± 0,9	1,8	1,1	Высокая	Низкая	Средняя
GRU (однонаправленная)	93,1 ± 0,8	1,5	0,9	Высокая	Низкая	Средняя
Bi-LSTM (двунаправленная)	94,5 ± 0,7	2,3	1,8	Очень высокая	Низкая	Низкая
Bi-GRU (двунаправленная)	94,8 ± 0,6	1,9	1,4	Очень высокая	Низкая	Средняя
CNN + LSTM	95,2 ± 0,5	2,1	1,6	Высокая	Высокая	Средняя
CNN + Bi-GRU с вниманием	96,1 ± 0,4	1,7	1,2	Очень высокая	Высокая	Высокая

Задача формализована как многоклассовая классификация многомерных временных рядов. Пространство входных сигналов: $X \subseteq R^{T \times F}$, где T – длина временной последовательности (1000 отсчетов, что соответствует 100 мс при частоте дискретизации 10 кГц), $F = 6$ – количество измерительных каналов (три фазы тока и три фазы напряжения) [9].

Множество классов включает нормальный режим и 16 типов аварий. Ограничение времени реакции $\tau_{max} = 2$ мс формализовано как

$$\tau_{inf}(f_{\theta}) + \tau_{comm} \leq \tau_{max},$$

что требует алгоритмов с гарантированным временем выполнения [10].

На основе сравнительного анализа (см. таблицу) обоснован выбор гибридной архитектуры CNN + Bi-GRU с механизмом внимания, обеспечивающей оптимальный баланс точности (96,1 % F1-score) и вычислительной эффективности (0,8 MFLOPS).

Сверточные слои выделяют локальные паттерны, двунаправленные GRU анализируют временные зависимости в прямом и обратном направлениях, механизм внимания фокусируется на информативных участках сигнала.

Для преодоления дефицита реальных данных об авариях разработан генератор синтетических

данных на основе физического моделирования 17 типов режимов с вариацией ключевых параметров [8, 24]. Предобработка включает z-score нормализацию, разбиение на окна и аугментацию.

Для физической осмысленности решений в функцию потерь введен регуляризационный член, штрафующий нарушения законов электротехники: $\sum_{k \in \{A, B, C\}} i_k(t) \approx 0$. Обучение оптимизировано с использованием модифицированной функции потерь, AdamW и стратегии постепенного размораживания слоев [25].

После обучения модель экспортируется в TorchScript с квантованием до 8 бит и прунингом, что сокращает объем до 450 КБ [26]. Результирующая модель обеспечивает точность 96,1 % при эффективности 0,8 MFLOPS, позволяя реализацию на встраиваемых платформах.

Выводы

Разработаны методы и алгоритмы проактивного управления энергообъектами в активно-адаптивных системах, обеспечивающие интеллектуальную поддержку решений диспетчерского персонала [3, 5].

Разработана концепция распределенного проактивного управления с переносом функций поддержки на полевой уровень. Децентрализация [7, 21] сокращает время реакции до 1–2 мс [10].

Предложен метод поддержки решений на основе CNN + Vi-GRU с вниманием, трансформирующий данные в прогнозные оценки с точностью 96,1 % при эффективности 0,8 MFLOPS. Сравнительный анализ [17, 18, 23] подтвердил преимущества подхода.

Обоснован принцип распределения функций с асинхронным алгоритмом lock-free синхронизации, обеспечивающий обработку до 50 000 выборок/с с задержкой менее 800 мкс [9].

Разработана методология интеграции в инфраструктуру цифровых подстанций, совместимая с МЭК 61850 и регламентами, обеспечивающая поэтапное внедрение без остановки процессов [8].

Создана методика генерации синтетических данных для 17 типов аварий [24]. Квантование и прунинг сократили объем модели до 450 КБ при точности 95,9 % и времени вывода менее 0,8 мс [25, 26].

Экспериментально подтверждена работоспособность на платформе «Авача»: точность 95,7 %, время реакции $1,2 \pm 0,3$ мс. Результаты внедрены в ООО «Челэнергоприбор».

Разработанные методы реализуют новую организационную структуру управления, соответствующую стратегии создания интеллектуальных активно-адаптивных систем [1, 3], и повышают живучесть энергосистем за счет раннего выявления аварийных режимов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на развитие методов адаптивного обучения нейросетевых моделей в процессе эксплуатации, расширение номенклатуры диагностируемых аварийных режимов, а также на создание унифицированных программно-аппаратных решений для масштабирования системы на подстанции более высоких классов напряжения и интеграцию с перспективными стандартами МЭК 61850 второго поколения.

Список литературы

1. Проблемы развития цифровой энергетики в России / Н.И. Воропай, М.В. Губко, С.П. Ковалев и др. // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2–14. DOI: 10.25728/ru.2019.1.1
2. Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 9–27.
3. Новиков Д.А. Современная теория управления: тренды и новые вызовы // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности. 2020. № 1 (3). С. 61–70. DOI: 10.20948/future-2020-5
4. Шаповалова Е.Ю. Организация интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью // Экономика и социум. 2019. № 1-2 (56). С. 136–139.
5. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег, 1999. 128 с.
6. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСУ, 2005. 584 с.
7. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. DOI: 10/12737/1087996
8. Topolsky N., Topolsky D., Topolskaya I. Structure Optimization of the Software and Hardware Complex for Electricity Metering // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk, Russian Federation, 2022. P. 234–238. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906631

9. Топольский Д.В., Топольский Н.Д., Юмагулов Н.И. Разработка технических решений для создания электронного оборудования информационного взаимодействия цифровых электрических подстанций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024. № 6. С. 18–23.
10. Разработка программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде / О.В. Логиновский, Г.И. Волович, Д.В. Топольский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 19–31. DOI: 10.14529/ctcr240102
11. Leitão P., Mařík V., Vrba P. Past, Present, and Future of Industrial Agent Applications // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013. Vol. 9, no. 4. P. 2360–2372. DOI: 10.1109/TII.2012.2222034
12. Marik V., McFarlane D. Industrial adoption of agent-based technologies // IEEE Intelligent Systems. 2005. Vol. 20, no. 1. P. 27–35. DOI: 10.1109/MIS.2005.11
13. Monostori L. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges // Procedia CIRP. 2014. Vol. 17. P. 9–13. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.115
14. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
15. Zhang Y., Zhu Z., Lv J. CPS-Based Smart Control Model for Shopfloor Material Handling // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. Vol. 14, no. 4. P. 1764–1775. DOI: 10.1109/TII.2017.2759319
16. A SOA-based architecture for empowering future collaborative cloud-based industrial automation / S. Karnouskos, A.W. Colombo, T. Bangemann et al. // IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada, 2012. P. 5766–5772. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389042
17. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
18. Learning Phrase Representations using RNN Encoder–Decoder for Statistical Machine Translation / K. Cho, B. van Merriënboer, C. Gulcehre et al. // arXiv preprint: arXiv:1406.1078. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1406.1078
19. Оптимизация системы управления программно-аппаратного комплекса для учета электроэнергии / Г.И. Волович, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский, А.А. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 4. С. 57–65. DOI: 10.14529/ctcr230406
20. Information security ensuring in industrial networks on digital substations / Y.G. Plaksina, N.D. Topolskiy, I.G. Topolskaya et al. // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, Russia, 2018. P. 8570074. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570074
21. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. М.: ИПУ РАН, 2003. 102 с.
22. Гречухин В.Н. Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2006. № 4. С. 35–42.
23. Wang Z., Yan W., Oates T. Time Series Classification from Scratch with Deep Neural Networks: A Strong Baseline // 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Anchorage, AK, USA, 2017. P. 1578–1585. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966039
24. Гречухин В.Н., Лебедев В.Д. Цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения на базе стандартного трансформатора напряжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № SD. С. 98–99.
25. Han S., Mao H., Dally W.J. Deep Compression: Compressing Deep Neural Networks with Pruning, Trained Quantization and Huffman Coding // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2016.
26. Jacob B., Kligys S., Chen B. et al. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, UT, USA, 2018. P. 2704–2713. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00286

References

1. Voropai N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P. et al. [Problems of development of digital energy in Russia]. *Control Sciences*. 2019;(1):2–14. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2019.1.1
2. Loskutov A.B. Solving problems in transition of electrical industry to digital technologies. *Smart Electrical Engineering*. 2018;(1):9–27. (In Russ.)
3. Novikov D.A. Modern management theory: Trends and new challenges. *Futurity Designing. Digital Reality Problems*. 2020;1(3):61–70. (In Russ.) DOI: 10.20948/future-2020-5
4. Shapovalova E.Yu. Organization of intellectual electric power system with active adaptive network. *Economy and Society*. 2019;1-2(56):136–139. (In Russ.)
5. Burkov V.N., Novikov D.A. *Teoriya aktivnykh sistem: sostoyanie i perspektivy* [Theory of Active Systems: State and Prospects]. Moscow: Sinteg, 1999. 128 p. (In Russ.)
6. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow: MPSU, 2005. 584 p. (In Russ.)
7. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph*. Moscow: Infra-M Publ., 2020. 450 p. (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996
8. Topolsky N., Topolsky D., Topolskaya I. Structure Optimization of the Software and Hardware Complex for Electricity Metering. In: *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Magnitogorsk, Russian Federation, 2022. P. 234–238. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906631
9. Topolsky D.V., Topolsky N.D., Yumagulov N.I. Development of Technical Solutions for Creation of Electronic Equipment Information Interaction of Digital Electrical Substations. *Instruments and Systems. Monitoring, Control and Diagnostics*. 2024;(6):18–23. (In Russ.)
10. Loginovskiy O.V., Volovich G.I., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliakov A.E. Development of a software package for testing digital instrument transformers on a vibration stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):19–31. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240102
11. Leitão P., Mařík V., Vrba P. Past, Present, and Future of Industrial Agent Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013;9(4):2360–2372. DOI: 10.1109/TII.2012.2222034
12. Marik V., McFarlane D. Industrial adoption of agent-based technologies. *IEEE Intelligent Systems*. 2005;20(1):27–35. DOI: 10.1109/MIS.2005.11
13. Monostori L. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP*. 2014;17:9–13. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.115
14. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
15. Zhang Y., Zhu Z., Lv J. CPS-Based Smart Control Model for Shopfloor Material Handling. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018;14(4):1764–1775. DOI: 10.1109/TII.2017.2759319
16. Karnouskos S., Colombo A.W., Bangemann T. et al. A SOA-based architecture for empowering future collaborative cloud-based industrial automation. In: *IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, QC, Canada, 2012. P. 5766–5772. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389042
17. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997;9(8):1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
18. Cho K., van Merriënboer B., Gulcehre C. et al. Learning Phrase Representations using RNN Encoder–Decoder for Statistical Machine Translation. *arXiv preprint: arXiv:1406.1078*. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1406.1078
19. Volovich G.I., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Maksimov A.A. Optimization of the control system of a software and hardware complex for electricity accounting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(4):57–65. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230406
20. Plaksina Y.G., Topolskiy N.D., Topolskaya I.G. et al. Information security ensuring in industrial networks on digital substations. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*. Chelyabinsk, Russia, 2018. P. 8570074. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570074

21. Novikov D.A. *Setevye struktury i organizatsionnye sistemy* [Network Structures and Organizational Systems]. Moscow: Institute of Control Sciences RAS, 2003. 102 p. (In Russ.)
22. Grechukhin V.N. Electron current and potential transformers. Their state, development perspective and introduction on OPY 110–750 kilovolt stations and sub-stations of power network. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2006;(4):35–42. (In Russ.)
23. Wang Z., Yan W., Oates T. Time Series Classification from Scratch with Deep Neural Networks: A Strong Baseline. In: *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Anchorage, AK, USA, 2017. P. 1578–1585. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966039
24. Grechukhin V.N., Lebedev V.D. [Digital Combined Current and Voltage Transformer Based on a Standard Voltage Transformer]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2010;SD:98–99. (In Russ.)
25. Han S., Mao H., Dally W.J. Deep Compression: Compressing Deep Neural Networks with Pruning, Trained Quantization and Huffman Coding. In: *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2016.
26. Jacob B., Kligys S., Chen B. et al. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference. In: *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City, UT, USA, 2018. P. 2704–2713. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00286

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Топольский Дмитрий Валерианович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiidv@susu.ru.

Топольский Никита Дмитриевич, преподаватель кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiind@susu.ru.

Топольская Ирина Геннадьевна, старший преподаватель кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskaiaig@susu.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Dmitrii V. Topolskii, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiidv@susu.ru.

Nikita D. Topolskii, Lecturer of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiind@susu.ru.

Irina G. Topolskaia, Senior Lecturer of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskaiaig@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025

The article was submitted 30.10.2025

АЛГОРИТМ ИНТЕГРИРОВАННОГО КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ И РЕСУРСАМИ МЕДИЦИНСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Д.В. Гилёв, denis.gilev@urfu.ru

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема совершенствования управления диагностическим процессом в условиях нестабильности системы здравоохранения. Существующие подходы к управлению медицинскими организациями зачастую фрагментарны и не объединяют клинические алгоритмы с тактическим и стратегическим распределением ресурсов. В работе предложена оригинальная трехуровневая схема управления (стратегический, тактический и операционный контуры), интегрирующая традиционный диагностический алгоритм с управленческими функциями медицинской организации. **Цель работы:** разработка и представление интегральной трёхуровневой схемы управления диагностическим процессом, которая объединяет клинический алгоритм (сбор анамнеза, дифференциальную диагностику, верификацию) с управленческими функциями медицинской организации (распределение ресурсов, контроль качества, стратегическое планирование). Предложенная схема позволяет устранить фрагментарность существующих подходов, дополнив ранее предложенный алгоритм блоками тактического и стратегического уровней, а также внедрить модифицированный метод p -комитета для повышения обоснованности решений при дифференциальной диагностике. **Материалы и методы.** Материалом послужил анализ литературы по процессному управлению в медицине, методам машинного обучения и теории активных систем. В качестве метода предложено использование модифицированного p -комитета для формализации врачебного консилиума и трехуровневая структура управления (стратегический, тактический, операционный контуры), интегрирующая клинический алгоритм с управленческими функциями. **Результаты исследования.** Результатом исследования является разработанная трехуровневая схема управления (стратегический, тактический, операционный контуры), впервые объединяющая клинический диагностический алгоритм с управленческими функциями медицинской организации, включая распределение ресурсов, контроль качества и обратную связь. Предложенная интеграция и применение метода p -комитета для дифференциальной диагностики позволяют рассматривать диагностику как управляемый бизнес-процесс, повышающий адаптивность системы и снижающий вероятность ошибок за счёт непрерывного цикла планирования, исполнения и корректирующих действий. **Обсуждение и заключение.** Полученные результаты данного исследования могут послужить практическим инструментом для разработки регламентов работы медицинских организаций, внедрения бережливых технологий и построения информационных систем класса «управление потоками пациентов» и «мониторинг качества». Предложенная схема также может быть использована для перехода к цифровому управлению медицинской организацией, обеспечивая непрерывный цикл планирования, исполнения, контроля и улучшения как в амбулаторно-поликлиническом, так и в стационарном звене.

Ключевые слова: управление диагностическим процессом, трехуровневая структура управления, p -комитет, дифференциальная диагностика, медицинская организация, процессное управление, контроль качества, распределение ресурсов

Для цитирования: Гилёв Д.В. Алгоритм интегрированного контура управления диагностическим процессом и ресурсами медицинской организации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 64–73. DOI: 10.14529/ctcr260206

ALGORITHM FOR INTEGRATED MANAGEMENT OF THE DIAGNOSTIC PROCESS AND RESOURCES OF A MEDICAL ORGANIZATION

D.V. Gilev, denis.gilev@urfu.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The article considers the urgent problem of improving the management of the diagnostic process in the context of the instability of the healthcare system. Existing approaches to the management of medical organizations are often fragmented and do not combine clinical algorithms with the tactical and strategic allocation of resources. The paper proposes an original three-level management scheme (strategic, tactical and operational contours), integrating the traditional diagnostic algorithm with the management functions of a medical organization. **Objective of the work.** The aim of the work is to develop and present an integrated three-level management scheme for the diagnostic process, which combines a clinical algorithm (anamnesis collection, differential diagnostics, verification) with the management functions of a medical organization (resource allocation, quality control, strategic planning). The proposed scheme eliminates the fragmentation of existing approaches by supplementing the previously proposed algorithm with tactical and strategic level blocks, as well as introducing a modified p -committee method to improve the validity of decisions in differential diagnostics. **Materials and methods.** The material was served by the analysis of the literature on process management in medicine, machine learning methods and the theory of active systems. The proposed method involves the use of a modified p -committee to formalize the medical consultation and a three-tier management structure (strategic, tactical, and operational contours) integrating the clinical algorithm with management functions. **Research Results.** The study resulted in the development of a three-tier management framework (strategic, tactical, and operational contours), which for the first time integrates the clinical diagnostic algorithm with the management functions of a medical organization, including resource allocation, quality control, and feedback. The proposed integration and application of the p -committee method for differential diagnosis allows for the consideration of diagnostics as a manageable business process, increasing system adaptability and reducing the likelihood of errors through a continuous cycle of planning, execution, and corrective action. **Discussion and Conclusion.** The results of this study can serve as practical tools for developing operating procedures for medical organizations, implementing lean technologies, and building information systems for patient flow management and quality monitoring. The proposed framework can also be used to transition to digital management of a healthcare organization, ensuring a continuous cycle of planning, execution, control, and improvement in both outpatient and inpatient settings.

Keywords: diagnostic process management, three-level management structure, p -committee, differential diagnostics, medical organization, process management, quality control, resource allocation

For citation: Gilev D.V. Algorithm for integrated management of the diagnostic process and resources of a medical organization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(2):64–73. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260206

Введение

Вопросы управления в социальных и экономических системах обретают все большую актуальность в современный период, отмеченный усилением политической, социальной и экономической нестабильности, а также распространением различного рода эпидемий и пандемий в мире. Теория управления оказанием медицинских услуг базируется на общих принципах менеджмента, которые представляется полезным рассмотреть с медицинской точки зрения.

В современной системе здравоохранения организацию лечебно-диагностического процесса принято рассматривать сквозь призму ключевых составляющих. Исходным звеном выступает клиническое обследование, за которым следует этап диагностирования, базирующийся на данных анамнеза, осмотра, а также результатах клинических, лабораторных, физических и прочих инструментальных методов. Следующая ступень непосредственно связана с формулировкой диагноза, причем важно разграничивать данный этап и предыдущий: диагностирование ориентировано

на сбор информации с помощью технических средств, будь то лабораторные анализы, ультразвуковая визуализация, магнитно-резонансная томография или иные способы, тогда как установление диагноза представляет собой аналитический вывод на основе полученных сведений. Затем проводятся верификация и детализация диагноза, для чего могут привлекаться дополнительные, подчас дорогостоящие и высокотехнологичные исследования. После этого осуществляется выбор лекарственных препаратов и их дозировок, опирающийся на утвержденные клинические рекомендации, а также определяются необходимые лечебно-профилактические мероприятия, спектр которых варьируется от физиотерапевтических процедур до сложных хирургических вмешательств, и завершается все оформлением врачебных предписаний. Замыкает перечень работа с учетно-отчетной документацией, включающая заполнение амбулаторных карт, листков нетрудоспособности и выписку рецептурных бланков.

Среди перечисленных звеньев ключевая роль отводится этапу постановки диагноза. Любые погрешности или неточности, допущенные здесь, неизбежно обесценивают все последующие действия, поскольку неверный диагноз способен не только свести на нет усилия врачей, но и нанести прямой вред пациенту и медицинской организации в целом. Ошибочное диагностическое заключение, как показывает практика, приводит к назначению неадекватной терапии, неправильному подбору лекарств и несоответствующих лечебно-профилактических вмешательств, что чревато ухудшением состояния больного вплоть до летального исхода, а также существенным ростом расходов на лечение и сопутствующих издержек.

Разумеется, и остальные составляющие процесса заслуживают пристального внимания. Два начальных этапа имеют критическое значение для корректного распознавания болезни, однако даже безупречное их выполнение не исключает диагностических ошибок. В работах ряда исследователей [1, 2] называются факторы, способствующие таким ошибкам. Среди них недостаточный объем лабораторно-инструментальных исследований или неверная интерпретация их итогов, что особенно часто проявляется на этапе диагностирования. Сюда же относят ограниченность доступных методов диагностики в целом, что также относится к недостаткам данного этапа. Кроме того, затруднения вызывают неполноценный синтез данных осмотра и обследования, неумение соотнести их с индивидуальными особенностями течения заболевания, а также длительное бессимптомное течение болезни, тяжесть состояния пациента, осложняющая проведение исследований, и, наконец, редкость патологии либо ее атипичная клиническая картина.

Таким образом, в структуре оказания медицинской помощи именно диагностические процедуры представляют собой наиболее сложный и ответственный компонент, требующий системного совершенствования и повышенного внимания. Нами уже были предприняты попытки совершенствования алгоритма управления оказанием медицинской услуги на основе комитетных методов в [3]. В данной статье предлагается расширить ранний алгоритм за счёт включения новых блоков.

1. Обзор литературы

Анализ литературы показывает, что существующие подходы к управлению диагностическим процессом хотя и разнообразны, но не всегда учитывают современные подходы. Так, в [4] рассматривается возможность использования согласованного планирования комплексной деятельности в иерархических организационно-технических системах.

Исследования Г.С. Лебедева [5] доказывают эффективность систем машинного обучения и искусственного интеллекта при дифференциальной диагностике. В [6] анализируются современные организационные модели первичной медико-санитарной помощи, включая механизмы маршрутизации пациентов, интеграцию медицинской помощи и распределение потоков. Авторы обосновывают необходимость перехода от функционального к процессному управлению, что соответствует тактическому уровню (медицинская сортировка, координация потоков, диспетчеризация). Работа даёт теоретическую базу для блока «Входной контроль и медицинская сортировка» и обосновывает важность гибкого распределения ресурсов в зависимости от сложности случая. В [7, 8] рассматриваются комплексные подходы к управлению медицинскими организациями, включая внедрение процессного управления, систем менеджмента качества и автоматизацию управленческих процессов. Особое внимание уделяется разделению управленческих функций на стратегический, тактический и операционный уровни. Исходя из предложенных подходов можно

ввести трехуровневую структуру управления и включить блоки «Ресурсное планирование», «Диспетчеризация ресурсов» и «Контроль качества» как неотъемлемые элементы эффективного управления МО.

Монография [9] посвящена классическим методам и моделям управления в организационных системах, включая применение теории активных систем, системного анализа и процессного подхода. Хотя работа ориентирована на промышленные предприятия, изложенные в ней принципы иерархического управления, механизмы обратной связи, а также методы комитетного и дискриминантного анализа применимы к управлению медицинскими организациями. Так, можно использовать многоуровневую структуру, блоки принятия решений (ромбы) и контур обратной связи на основе анализа несоответствий. В [10] обосновываются методы активных систем, развиваемые В.Н. Бурковым, обосновываются механизмы обратной связи при несоответствии диагноза и принятие решений в условиях неопределённости.

Также особое внимание следует уделить комитетным методам [11, 12], которые понятны и хорошо применимы при дифференциальной диагностике. В [13] обсуждаются системы внедрения систем качества.

Анализ литературы показывает, что на данный момент исследования по диагностике и управлению медицинскими организациями фрагментарны и не объединяют клинический алгоритм с тактическим распределением ресурсов. В то время как обоснована необходимость экономического контроля на этапе госпитализации, а часть исследований доказывает эффективность некоторых алгоритмов машинного обучения при дифференциальной диагностике, нет единого механизма, который бы объединял всё воедино. Следуя [14, 15], предлагается схема, которая впервые интегрирует все уровни управления в единый замкнутый контур управления качеством и ресурсами.

2. Материалы и методы

Как показал анализ литературы, необходимо разработать алгоритм интегрированного контура управления диагностическим процессом. Особое внимание следует уделить блоку «Дифференциальная диагностика», в котором предлагается использовать модифицированный метод комитетов, позволяющий формализовать работу врачебного консилиума, обеспечивая математически обоснованное принятие решения при множественных диагнозах.

В задачах построения решающих правил прогнозирования, диагностики и классификации комитетные конструкции являются моделями принятия решений на основе консилиума. А именно, если задача построения решающего правила в выбранном классе правил несовместна, то в методе комитетов строится некоторый коллектив решающих правил и способ выработки результирующего коллективного решения. При этом во многих случаях несовместность задачи преодолевается; модифицированная постановка задачи приобретает свойство непротиворечивости.

Комитетом несовместной системы однородных строгих линейных неравенств

$$\{(c_j, x) > 0, j = 1, \dots, m\},$$

где $c_j \in R^n$, $x \in R^n$, называется такое множество $\{x^1, \dots, x^{2k+1}\} \subset R^n$, что каждому неравенству системы удовлетворяют не менее $k + 1$ элементов этого множества.

Пусть $\Delta = \{D_j: j \in J\}$ – совокупность некоторых множеств, Y – множество. Рассмотрим систему $u \in D_j, j \in J, u \in Y$.

Для $\Delta' \subset \Delta$ положим $J' = \{j: D_j \in \Delta'\}$.

Подсистема Δ' называется совместной, если $\bigcup_{j \in J'} D_j \neq \emptyset$. Можно рассматривать максимальные (по включению) совместные подсистемы и минимальные (по включению) несовместные подсистемы Δ . Максимальные совместные подсистемы системы Δ также называются μ -подсистемами.

Пусть $0 \leq p < 1$. Тогда p -комитетом класса Y для системы Δ называется такое конечное множество $K \subset Y$, что для любого $j \in J$

$$|K \cap D_j| > p|K|.$$

Если $p = 1/2$, то p -комитет называется комитетом (комитетом большинства). При $|K| = 1$ p -комитет является решением системы.

Поясним смысл этого определения. За выполнение любого ограничения $x \in D_j$ «голосует» более чем $1/p$ -я часть p -комитета. Если $p = 1/2$, то в определении требование конечности числа членов комитета можно снять; комитетом системы называется такое множество $K \subset Y$, что для любого $j \in J$

$$|K \cap D_j| > |K \setminus D_j|,$$

где $|K|$ означает мощность множества K .

Справедлива следующая теорема.

Если p -комитет системы существует, то существует и p -комитет, составленный из решений максимальных совместных подсистем системы, включающих соотношение $y \in Y$.

Под минимальным комитетом будем понимать комитет с минимально возможным для данной системы числом членов.

Задача построения линейного функционала, разделяющего заданные множества в линейном пространстве, имеет большое значение в выпуклом анализе, теории оптимизации и в распознавании образов. Эта задача для двух множеств состоит в следующем. Пусть заданы множества $A, B \in R^n$. Требуется найти функционал $f(x) = (a, x)$ и число b такие, что

$$\forall x \in A f(x) > 0; \forall x \in B f(x) \leq 0.$$

Здесь записана система линейных неравенств относительно неизвестного вектора $[a; b] \in R^{n+1}$. Если она несовместна, то можно ставить задачу отыскания ее комитета, который реализует разделение множеств A и B .

3. Формирование и представление алгоритма управления

Предлагается всю систему представить в виде трёх уровней (контуров): стратегический, тактический, операционный.

Далее необходимо разбить третий блок (клинический процесс) на несколько блоков:

- входной контроль и медицинская сортировка;
- сбор анамнеза и данных;
- дифференциальная диагностика (метод комитетов);
- верификация по клиническим рекомендациям;
- проверка ресурсов и формирование маршрута;
- утверждение развернутого клинического диагноза;
- начало лечения / завершение диагностического этапа;
- контроль качества.

Предложенная нами в [3] схема описывает диагностический процесс как последовательность действий врача без включения управленческих функций медицинской организации. Ключевая ее особенность состоит в том, что она полностью сосредоточена на клиническом мышлении и не учитывает управление ресурсами, контроль качества и обратную связь, распределение потоков пациентов, стратегическое планирование. Именно эти недостатки были устранены в разработанной далее трёхуровневой интегрированной схеме управления, где клинический процесс встроен в тактический и стратегический контуры медицинской организации. На рис. 1 приведена общая схема, объединяющая все три контура.



Рис. 1. Обобщённая трёхуровневая структура управления
Fig. 1. Generalized three-level management structure

В разработанной схеме трехуровневая структура управления (стратегический, тактический, операционный контуры) отражает фундаментальный принцип организации сложных систем: разделение функций по временным характеристикам, степени абстракции и ответственности. Каждый контур решает свой класс задач, а их интеграция обеспечивает замкнутость управления и непрерывное улучшение процессов медицинской организации.

На рис. 2 представлены стратегический и тактический контуры. Стратегический контур задаёт долгосрочные ориентиры, правила и ресурсные возможности, в рамках которых работает вся медицинская организация. При этом он не касается конкретного пациента, а формирует системные условия для качественной и эффективной диагностики. Тактический контур работает в реальном времени или в течение некоторого промежутка времени. Его задача состоит в эффективном распределении имеющихся ресурсов между текущими пациентами и клиническими задачами, не выходя за рамки, заданные стратегией.

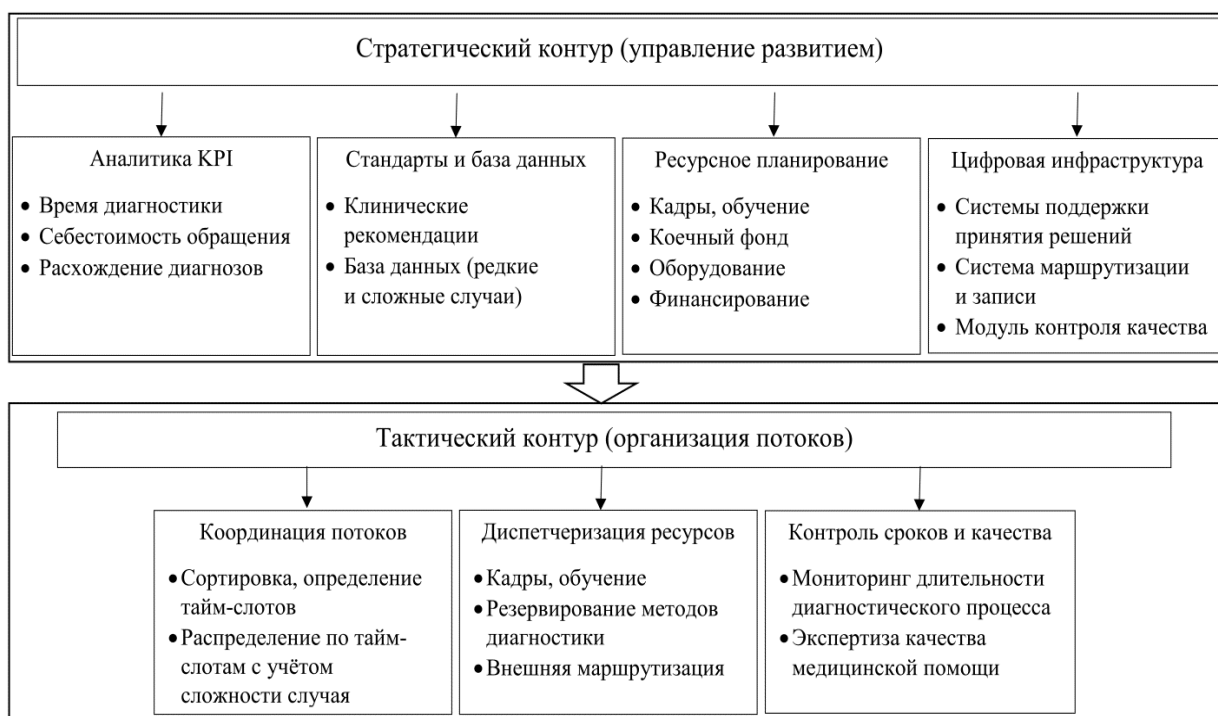


Рис. 2. Детализация стратегического и тактического контуров
Fig. 2. Detail of the strategic and tactical contours

На рис. 3 изображен операционный контур. Это уровень непосредственного оказания медицинской помощи, где выполняются клинические действия: сбор анамнеза, обследование, постановка диагноза, назначение лечения, а также оценка качества диагностики и лечения, калькуляция приемов, диагностики, лечения и формирование отчетов в страховую компанию и контролирующие органы. Особое внимание здесь следует уделить блоку дифференциальной диагностики. Нами в [3] были уже предложены комитетные и дискриминантные методы, но в этот раз в методах мы предлагаем *p*-комитет, а не простого большинства. *P*-комитет может превосходить методы машинного обучения и иные методы в дифференциальной диагностике в ряде случаев благодаря сочетанию человеческого опыта, контекста и комплексного подхода. В ситуациях, когда данные противоречивы или недостаточно информативны, эксперты могут использовать интуицию, клинический опыт и знания, выходящие за рамки обученных паттернов. Тот же искусственный интеллект, напротив, ограничен данными, на которых он был обучен, и может ошибаться при столкновении с нестандартными случаями. *P*-комитет может учитывать этические аспекты диагностики и лечения, которые сложно алгоритмизировать. Например, при выборе между несколькими диагнозами эксперты могут руководствоваться не только статистикой, но и принципами гуманности, минимизации вреда для пациента.

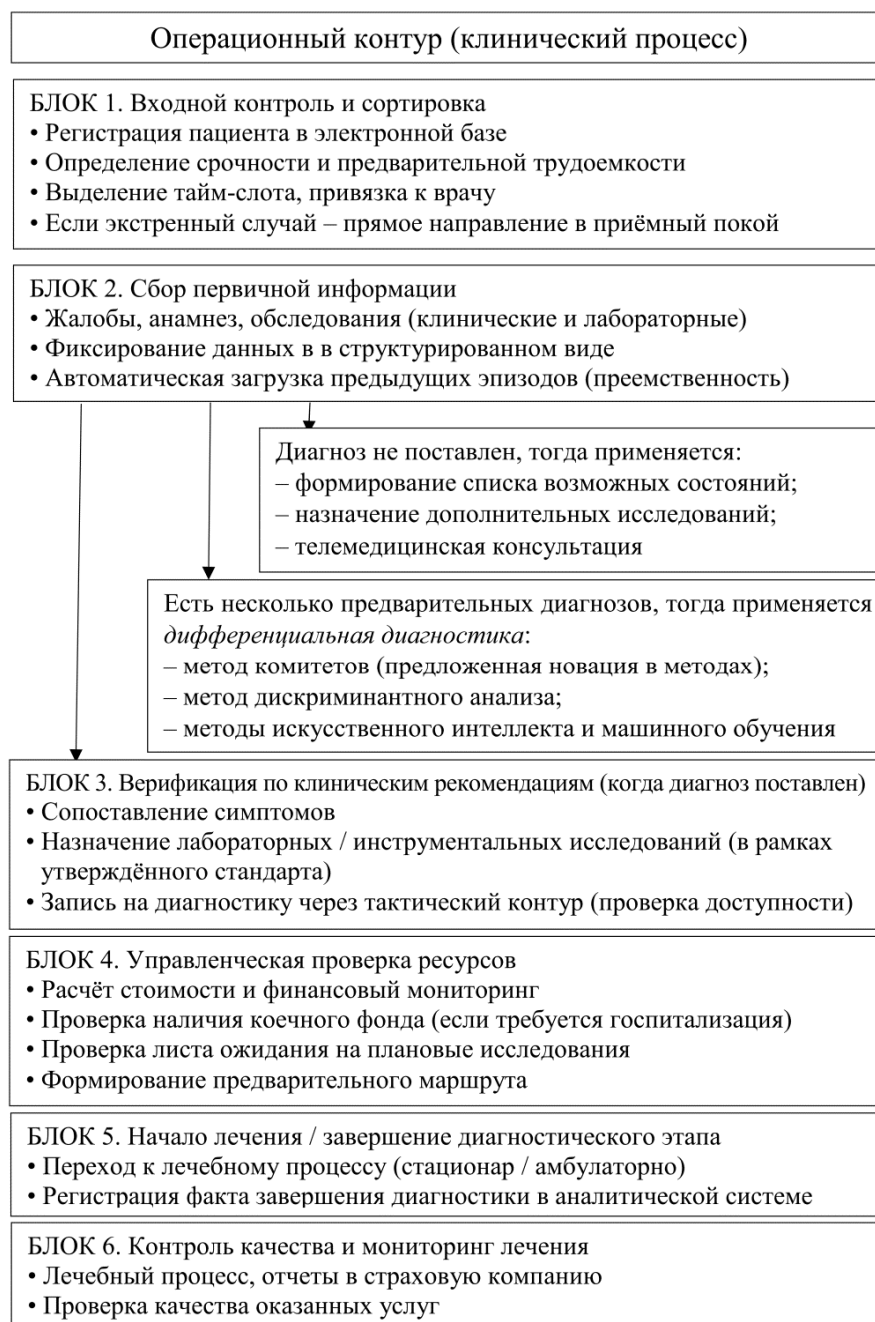


Рис. 3. Детализация операционного контура
Fig. 3. Details of the operational contours

Выводы и результаты

Предложенная трехуровневая схема управления диагностическим процессом объединяет традиционный диагностический алгоритм (сбор анамнеза, верификация, дифференциальная диагностика) с функциями управления медицинской организацией (распределение ресурсов, контроль качества, стратегическое планирование). Это позволяет рассматривать диагностику не как изолированный врачебный процесс, а как управляемый бизнес-процесс, влияющий на эффективность организации в целом.

Разделение функций на стратегический, тактический и операционный контуры обеспечивает четкое распределение ответственности, временных коридоров и типов решений. Стратегический контур задаёт нормы и ресурсы, тактический адаптирует их к текущей оперативной обстановке, операционный, в свою очередь, реализует медицинскую помощь. Такая структура повышает адаптивность системы к внешним и внутренним изменениям.

Особое внимание стоит уделить введению метода p -комитета для блока дифференциальной диагностики. Это позволяет математически обосновать алгоритм диагностики.

Введение блоков контроля качества, анализа расхождений диагнозов и корректирующих действий формирует обратную связь между операционным и стратегическим уровнями. Это позволяет системе выявлять дефекты, которые ведут к обновлению стандартов, обучению персонала и перераспределению ресурсов, что снижает вероятность повторения ошибок.

Включение в схему проверки наличия коечного фонда, диагностического оборудования и листов ожидания предотвращает ситуации, когда диагноз поставлен, но ресурс для лечения отсутствует. Это сокращает время от постановки диагноза до начала лечения и повышает доступность помощи.

Также схема предполагает использование электронной медицинской карты, систем поддержки врачебных решений и автоматизированного контроля качества. Это создаёт основу для перехода к цифровому управлению медицинской организацией, где решения подкрепляются данными и моделями прогнозирования.

Разработанная схема может служить основой для регламентов работы медицинских организаций, внедрения бережливых технологий, а также для построения информационных систем класса «Управление потоками пациентов» и «Мониторинг качества», следуя [16]. Она универсальна как для амбулаторно-поликлинического, так и для стационарного звена.

В отличие от существующих работ, фокусирующихся либо на клинических алгоритмах, либо на общих принципах управления, предложенная схема впервые детально прорабатывает точки взаимодействия клинического процесса с тактическим и стратегическим уровнями, обеспечивая непрерывный цикл планирования, исполнения, контроля и улучшения.

Список литературы

1. Применение процессного подхода в системе управления качеством медицинской помощи / И.Ю. Бедорева, Т.Н. Садовая, А.В. Стрыгин, Т.А. Стрыгина // Хирургия позвоночника. 2007. № 4. С. 62–72.
2. Голева О.И. Экономическая оценка потерь от инвалидизации населения в РФ: подходы и методы // Финансы: теория и практика. 2017. Т. 21, № 5. С. 30–39. DOI: 10.26794/2587-5671-2017-21-5-30-39
3. Логиновский О.В., Гилёв Д.В. Совершенствование алгоритма управления оказанием медицинских услуг на основе комитетных методов // Прикладная математика и вопросы управления. 2020. № 4. С. 105–120. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.07
4. Широкий А.А., Буркова И.В., Бурков В.Н. Методы согласованного планирования в организационно-технических системах с иерархической структурой // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): тр. Четырнадцатой междунар. конф., Москва, 27–29 сентября 2021 года / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2021. С. 1938–1943. DOI: 10.25728/1312.2021.78.65.001
5. В поисках цифровых подходов и применения искусственного интеллекта при изучении, диагностике и лечении саркоидоза / А.А. Визель, С.Н. Авдеев, Г.С. Лебедев и др. // Медицинский совет. 2025. Т. 19, № 9. С. 57–68. DOI: 10.21518/ms2025-040
6. Шевский В.И., Шейман И.М., Шишкин С.В. Новые модели первичной медико-санитарной помощи: зарубежный опыт и российские перспективы // Социальные аспекты здоровья населения. 2022. Т. 68, № 2. С. 2. DOI: 10.21045/2071-5021-2022-68-2-2
7. Современные подходы к решению задач управления медицинских организаций / С.Б. Чолоян, А.К. Екимов, Е.Н. Байгазина и др. // Менеджер здравоохранения. 2021. № 10. С. 4–13. DOI: 10.21045/1811-0185-2021-10-4-13
8. Корчуганова Е.А., Титкова Ю.С. Управление обращениями как первый шаг к управлению качеством в медицинской организации // Медицинский вестник МВД. 2021. № 6 (115). С. 63–65.
9. Логиновский, О.В. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. (Научная мысль). DOI: 10/12737/1087996
10. Развитие систем управления с прогнозирующими физическими моделями / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, В.Н. Бурков // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2016. № 3 (17). С. 47–55.

11. Мазуров В.Д. Распознавание образов как средство автоматического выбора процедуры в вычислительных методах // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1970. Т. 10, № 6. С. 1520–1525.
12. Кончевский Д.И. Комитет нейронных сетей с арбитром // Современные тенденции развития науки и производства: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т. Т. 1. Кемерово, 2014. С. 51.
13. Швец Ю.Ю. Внедрение системы управления качеством в медицинских организациях // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 3, № 7. С. 64–74.
14. Логиновский О.В., Белякова В.А. Модели интегрированного управления наукоёмким производством // Системы управления и информационные технологии. 2025. № 2-1 (100). С. 81–86.
15. Бацина Е.А., Попсуйко А.Н., Артамонова Г.В. Применение основ стратегического менеджмента в практике здравоохранения (обзор) // Сибирский медицинский журнал. 2019. Т. 34, № 4. С. 62–71. DOI: 10.29001/2073-8552-2019-34-4-62-71
16. Артамонова Г.В., Попсуйко А.Н. Современные технологии управления качеством в здравоохранении. Теоретические основы и практика применения. Новосибирск: Наука, 2023. 192 с.

References

1. Bedoreva I.Yu., Sadovaya T.N., Strygin A.V., Strygina T.A. Application of Process Approach in a System of Medical Assistance Quality Management. *Spine Surgery*. 2007;(4):62–72. (In Russ.)
2. Goleva O.I. Economic evaluation of losses from invalidism of the population in Russia: approaches and methods. *Finansy: teoriya i praktika = Finance: theory and practice*. 2017;21(5):30–39. (In Russ.) DOI: 10.26794/2587-5671-2017-21-5-30-39
3. Loginovskiy O.V., Gilev D.V. Improving the algorithm for managing the provision of medical services based on committee methods. *Applied mathematics and control sciences*. 2020;(4):105–120. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.07
4. Shirokiy A.A., Burkova I.V., Burkov V.N. [Methods of coordinated planning in organizational and technical systems with a hierarchical structure]. In: *Management of Large-Scale Systems Development (MLSD'2021): Proceedings of the Fourteenth International Conference, Moscow, September 27–29, 2021*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2021. P. 1938–1943. (In Russ.) DOI: 10.25728/1312.2021.78.65.001
5. Vizel A.A., Avdeev S.N., Lebedev S.G., Vizel I.Y., Vizel L.A. In search of digital approaches and application of artificial intelligence in the study, diagnosis, and treatment of sarcoidosis. *Meditinskij sovet = Medical Council*. 2025;19(9):57–68. (In Russ.) DOI: 10.21518/ms2025-040
6. Shevsky V.I., Sheiman I.M., Shishkin S.V. New models of primary health care: international experience and Russian perspectives. *Social'nye aspekty zdorov'a naselenia = Social Aspects of Population Health*. 2022;68(2):2. (In Russ.) DOI: 10.21045/2071-5021-2022-68-2-2
7. Choloyan S.B., Ekimov A.K., Baigazina E.N. et al. Modern approaches to solving the tasks of management of medical organizations. *Manager Zdravoochranenia*. 2021;(10):4–13. (In Russ.) DOI: 10.21045/1811-0185-2021-10-4-13
8. Korchuganova Ye.A., Titkova Yu.S. Management of appeals as a first step to quality management in a medical facility. *MIA Medical bulletin*. 2021;6(115):63–65. (In Russ.)
9. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph*. Moscow: Infra-M Publ., 2020. 450 p. (Ser. Scientific thought). (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996
10. Myshlyayev L.P., Yevtushenko V.F., Burkov V.N. et al. [Development of control systems with predictive physical models]. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2016;3(17):47–55. (In Russ.)
11. Mazurov V.I.D. Pattern recognition as a method of automatic choice of procedure in computational methods. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1970;10(6):217–224. DOI: 10.1016/0041-5553(70)90193-X
12. Konchevskiy D.I. [Committee of neural networks with an arbiter]. In: *Modern trends in the development of science and production: Collection of materials of the International scientific and practical conference: in 4 volumes. Vol. 1*. Kemerovo, 2014. P. 51. (In Russ.)
13. Shvets Yu.Yu. Implementation of quality management system in medical organizations. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2018;3(7):64–74. (In Russ.)

14. Loginovsky O.V., Beliakova V.A. Models of integrated control for high-tech production. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2025;2-1(100):81–86. (In Russ.)

15. Batsina E.A., Popsuyko A.N., Artamonova G.V. Application of the basics of strategic management in healthcare practice (review). *The Siberian Medical Journal*. 2019;34(4):62–71. (In Russ.) DOI: 10.29001/2073-8552-2019-34-4-62–71

16. Artamonova G.V., Popsuyko A.N. *Sovremennyye tekhnologii upravleniya kachestvom v zdravookhraneniі. Teoreticheskie osnovy i praktika primeneniya* [Modern quality management technologies in healthcare. Theoretical foundations and practice of application]. Novosibirsk: Nauka, 2023. 192 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Гилёв Денис Викторович, канд. техн. наук, доц. кафедры экономики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; denis.gilev@urfu.ru.

Information about the author

Denis V. Gilev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Economics, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia; denis.gilev@urfu.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2025

The article was submitted 22.11.2025

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ КОМПАНИИ

С.А. Баркалов, sbarkalov@nm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>
Т.А. Аверина, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>
А.А. Писарева, alinapisareva2012@gmail.com

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Строительная отрасль переживает этап глубокой технологической трансформации, движимой развитием цифровых технологий и растущими требованиями к эффективности, срокам и стоимости реализации проектов. Несмотря на очевидный потенциал цифровизации, значительная часть российских строительных компаний продолжает использовать устаревшие линейно-функциональные модели управления, характеризующиеся разрозненностью данных, бумажным документооборотом и низкой операционной эффективностью. **Материалы и методы.** В работе проведен анализ эволюции строительных технологий, классификация современных технологических решений и оценка их влияния на бизнес-процессы. Использованы методы структурного анализа, моделирования бизнес-процессов, матричное ранжирование процессов и оценка экономической эффективности. **Цель исследования** – разработка методологического подхода и практических рекомендаций по совершенствованию бизнес-процессов строительной компании для перехода к цифровой организации управления. **Результаты.** Выделены и структурированы 13 ключевых бизнес-процессов строительной компании, сгруппированных по видам деятельности. Проведено их ранжирование по важности, проблемности и возможности изменений, что позволило определить три наиболее приоритетных процесса: «Управление инвестиционно-строительным проектом», «Проектирование и подготовка строительства», «Разработка и сопровождение ИТ-систем». Разработана целевая модель ключевого процесса «Управление инвестиционно-строительным проектом» (в нотации IDEF0), отражающая переход от традиционной линейно-функциональной структуры к цифровой платформенной модели на базе единой среды данных (CDE), сквозного BIM и ERP-системы. **Заключение.** Цифровая трансформация бизнес-процессов строительной компании является стратегической необходимостью для повышения операционной эффективности, прозрачности управления и конкурентоспособности. Предложенный подход, основанный на приоритизации процессов по критическим факторам успеха и функциональном моделировании IDEF0, позволяет системно перейти к платформенной модели управления с единой средой данных (CDE) и сквозным BIM. Прогнозный экономический эффект от внедрения предложенных решений положительный и достигает значительных величин при умеренных инвестициях. Ключевыми драйверами эффекта являются снижение материальных и логистических затрат, сокращение административных расходов и оптимизация сроков реализации проектов.

Ключевые слова: цифровая трансформация, строительная компания, бизнес-процессы, информационное моделирование зданий (BIM), функциональное моделирование IDEF0, экономическая эффективность, управление проектами, организационная структура, цифровая структура управления

Для цитирования: Баркалов С.А., Аверина Т.А., Писарева А.А. Цифровая трансформация бизнес-процессов строительной компании // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 74–94. DOI: 10.14529/ctcr260207

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260207

DIGITAL TRANSFORMATION OF BUSINESS PROCESSES IN A CONSTRUCTION COMPANY

S.A. Barkalov, sbarkalov@nm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>
T.A. Averina, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>
A.A. Pisareva, alinapisareva2012@gmail.com

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The construction industry is undergoing a phase of profound technological transformation, driven by the development of digital technologies and increasing demands for efficiency, timeliness, and cost of project implementation. Despite the obvious potential of digitalization, a significant portion of Russian construction companies continues to use outdated linear-functional management models characterized by data fragmentation, paper-based document flow, and low operational efficiency. **Materials and Methods.** The study analyzes the evolution of construction technologies, classifies modern technological solutions, and assesses their impact on business processes. Methods of structural analysis, business process modeling, matrix ranking of processes, and economic efficiency assessment are used. The research objective is to develop a methodological approach and practical recommendations for improving the business processes of a construction company to transition to a digital management organization. **Results.** Thirteen key business processes of a construction company are identified and structured, grouped by activity type. They are ranked by importance, problematic nature, and potential for change, allowing the identification of three highest-priority processes: “Investment and Construction Project Management”, “Design and Construction Preparation”, and “IT Systems Development and Maintenance”. A target model of the key process “Investment and Construction Project Management” (in IDEF0 notation) is developed, reflecting the transition from a traditional linear-functional structure to a digital platform model based on a Common Data Environment (CDE), end-to-end BIM, and an ERP system. **Conclusion.** Digital transformation of construction company business processes is a strategic necessity for improving operational efficiency, management transparency, and competitiveness. The proposed approach, based on prioritizing processes by critical success factors and IDEF0 functional modeling, enables a systematic transition to a platform-based management model with a Common Data Environment (CDE) and end-to-end BIM. The projected economic effect of implementing the proposed solutions is positive and reaches significant values with moderate investment. The key drivers of this effect are reduced material and logistics costs, reduced administrative expenses, and optimized project implementation timelines.

Keywords: digital transformation, construction company, business processes, building information modeling (BIM), IDEF0 functional modeling, economic efficiency, project management, organizational structure, digital management structure

For citation: Barkalov S.A., Averina T.A., Pisareva A.A. Digital transformation of business processes in a construction company. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(2):74–94. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260207

Введение

Строительная отрасль проходит период масштабных изменений, определяемых глобальными вызовами и возможностями цифровой эпохи. Глобализация рынков, ужесточение экологических и технических нормативов, хронический дефицит квалифицированной рабочей силы, волатильность цен на материалы и возрастающие требования заказчиков к качеству, срокам и стоимости проектов формируют сложную конкурентную среду. В этих условиях традиционные управленческие парадигмы, основанные на жесткой линейно-функциональной иерархии, бумажном документообороте и реактивном подходе к решению проблем, демонстрируют свою неэффективность, становясь источником системных рисков и ограничителем роста.

Многочисленные отраслевые исследования констатируют, что строительная индустрия исторически демонстрирует один из самых низких темпов роста производительности труда среди основных секторов экономики [1, 2]. Эта «производительная стагнация» во многом обусловлена низким уровнем внедрения современных технологий, фрагментацией процессов, высокой зави-

симостью от ручного труда и субъективных решений. В то же время рост цифровых технологий – информационного моделирования зданий (BIM), интернета вещей (IoT), больших данных (Big Data), искусственного интеллекта (ИИ), робототехники и аддитивного производства – открывает принципиально новые возможности для кардинального пересмотра подходов к проектированию, строительству и эксплуатации объектов.

Однако технологический потенциал сам по себе не гарантирует успеха. Ключевым вызовом для строительных компаний является не столько закупка современного программного обеспечения или оборудования, сколько фундаментальная трансформация бизнес-процессов и организационной структуры для его эффективного использования. Цифровая трансформация – это прежде всего преобразование бизнес-модели, управленческих практик и корпоративной культуры, обеспечиваемое технологиями [3]. Недостаточно автоматизировать существующие неэффективные процессы; необходимо перепроектировать их, создавая сквозные, интегрированные и управляемые данными потоки создания ценности.

Актуальность настоящего исследования обусловлена объективной необходимостью для российских строительных компаний разработать системную методологию перехода от устаревших операционных моделей к цифровой организации управления. Несмотря на растущий интерес к тематике BIM и цифровизации, в научной литературе и практической деятельности часто преобладает фрагментарный, технологически ориентированный подход, не учитывающий в должной мере необходимость комплексной реорганизации всей системы бизнес-процессов компании и оценки экономических последствий таких изменений.

Цель исследования заключается в разработке теоретических положений и практических рекомендаций по совершенствованию бизнес-процессов строительной организации, направленных на формирование цифровой модели управления проектами.

Материалы и методы

В исследовании применяется комплексный подход, основанный на анализе широкого круга научных и отраслевых источников. Теоретический фундамент сформирован на основе двух ключевых направлений: фундаментальных публикаций по истории строительной техники и эволюции технологий, а также современных работ в области управления проектами, отражающих актуальные отраслевые тренды.

Центральное место в анализе заняли исследования, посвященные информационному моделированию зданий (BIM). В работе Salman Azhar [4] данная технология рассматривается как ключевой инструмент повышения эффективности проектного управления, при этом авторы акцентируют внимание не только на ее потенциальных преимуществах, но и на сопутствующих рисках и проблемах внедрения. Для структурирования базовых принципов и нормативно-методических основ BIM были проанализированы положения специализированного руководства К.В. Глаголева [5].

В контексте смежных технологических направлений интерес представляет работа Chuck Eastman [6], в которой рассматриваются вопросы роботизации и автоматизации в строительстве, а также предлагается комплексный анализ институциональных и технических барьеров их внедрения.

В работе Т.Н. Кисель [7] обобщен опыт ведущих компаний, представлена оценка фактического уровня цифровизации на предприятиях инвестиционно-строительной сферы, выявлены существующие несоответствия.

В методологическом плане работа построена на последовательном применении ряда взаимосвязанных методов. Первоначально был проведен исторический анализ, позволивший выделить основные этапы эволюции технологий в строительстве. Далее осуществлена классификация современных технологических решений по областям их применения, что позволило систематизировать их влияние на бизнес-процессы. При идентификации и структурировании ключевых бизнес-процессов (БП) строительной компании использовался процессный подход к управлению, а также методология эталонного моделирования. За основу была взята классификация БП по видам деятельности (основные, обеспечивающие, управленческие), адаптированная к специфике строительной отрасли на основе анализа аналогичных практик. Для определения декомпозиции верхнего уровня БП были учтены ключевые стадии жизненного цикла инвестиционно-строительного

проекта и функции, необходимые для их поддержки, что соответствует принципам сквозного процессного управления. Ключевым этапом стал структурный анализ деятельности строительной компании, в рамках которого были выявлены и описаны тринадцать ключевых бизнес-процессов, сгруппированных по типам. Для определения стратегических приоритетов трансформации использовался метод критических факторов успеха (КФУ), на основе которого были выделены семь ключевых факторов, таких как внедрение цифровых технологий, повышение операционной эффективности и сокращение сроков строительства. Последующее ранжирование бизнес-процессов проводилось с помощью матричного метода, оценивающего каждый процесс по трем интегральным критериям: его важность (через количество связанных КФУ), степень проблемности (по пятибалльной шкале) и возможность проведения изменений с учетом финансовых, кадровых и законодательных барьеров [8].

Для углубленного анализа и визуализации наиболее приоритетного процесса – «Управление инвестиционно-строительным проектом» – была применена методология функционального моделирования IDEF0. Это позволило построить и детально сравнить модели процесса «как есть» и «как должно быть», наглядно демонстрируя планируемые изменения. Параллельно проводился сравнительный анализ организационных структур, сопоставляющий традиционную линейно-функциональную модель с целевой цифровой сетевой структурой. Экономическое обоснование предлагаемых изменений было выполнено с помощью метода прогнозной оценки эффективности. На основе модели условной строительной компании проведены расчеты капитальных и операционных затрат, годового экономического эффекта, срока окупаемости инвестиций (PP) и возврата на инвестиции (ROI). Весь процесс исследования сопровождался синтезом и обобщением полученных результатов, что обеспечило целостность и практическую направленность разработанной концепции цифровой трансформации.

1. Теоретические основы и анализ технологического развития в строительстве

Понимание текущего состояния и будущих траекторий развития строительной отрасли невозможно без ретроспективного анализа пройденного технологического пути [9]. Эволюция технологий в строительстве представляет собой не линейный процесс накопления инструментов, а последовательную смену технологических укладов и управленческих парадигм, каждый из которых кардинально изменял производительность, экономику и организацию строительного производства [10].

В рамках исследования предложена периодизация, определяющая четыре ключевых этапа эволюции (рис. 1), каждый из которых характеризуется уникальным набором доминирующих технологий, материалов, энергетических базисов и принципов организации труда.

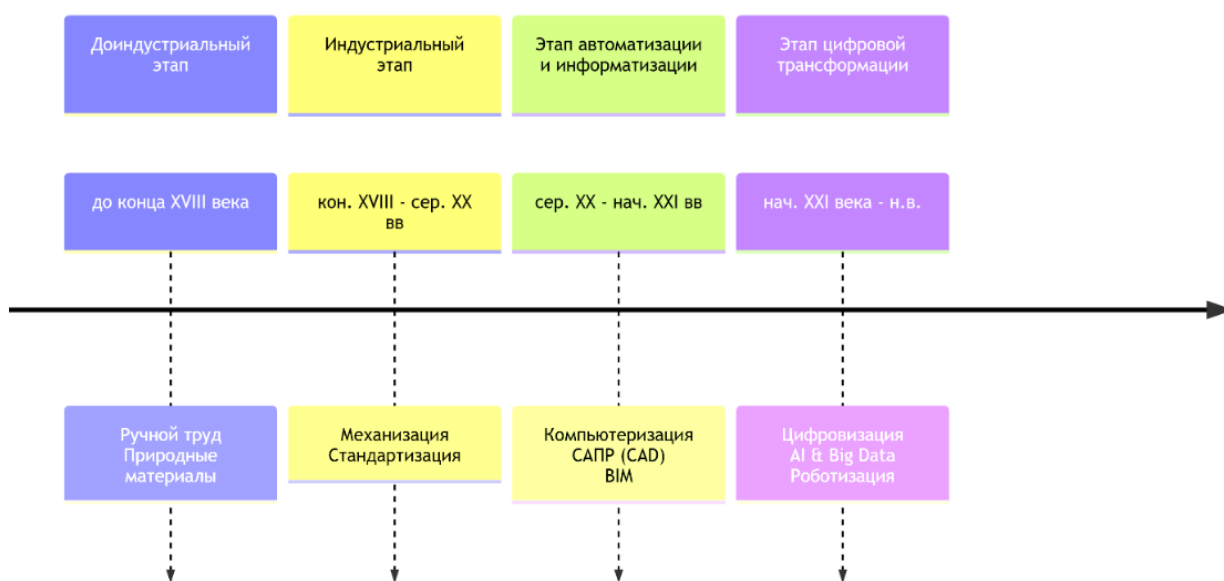


Рис. 1. Основные этапы эволюции технологий в строительстве
Fig. 1. The main stages of the technology evolution in construction

Доиндустриальная эпоха: ручной труд, примитивные инструменты, натуральные материалы, обучение от мастера к подмастерью, отсутствие формализации процессов.

Индустриальный этап: промышленная революция, механизация, массовые технологии (железобетон, сталь), формирование крупных компаний, появление методов и инструментов управления проектами.

Автоматизация и информатизация: использование компьютеров и программного обеспечения (CAD, MS Project), возникновение концепции BIM, улучшение точности проектирования, но сохранение проблемы разрозненности данных.

Цифровая трансформация: глубокая интеграция цифровых технологий, использование IoT, больших данных, AI, облачных платформ, робототехники, создание единого информационного пространства, смещение фокуса на интеллектуальное управление объектами на протяжении всего жизненного цикла.

Анализ эволюции позволяет выявить ключевую закономерность: каждый новый технологический уклад не просто добавлял новые инструменты, но требовал коренной перестройки организации производства, управления и компетенций. Современный этап цифровой трансформации является наиболее радикальным, так как ставит под вопрос саму целесообразность многих традиционных бизнес-процессов и организационных форм, сложившихся в индустриальную эпоху. Для строительной компании игнорирование этой трансформации означает не просто отставание в эффективности, а стратегический риск утраты конкурентоспособности.

Стоит отметить, что современный этап развития строительной отрасли характеризуется не изолированным развитием отдельных технологий, а их конвергенцией и синергетической интеграцией, формирующей новую технологическую экосистему. Воздействие этих технологий носит сквозной характер, охватывая все этапы жизненного цикла строительного объекта – от концепции и проектирования до строительства, эксплуатации и вывода из использования (рис. 2).

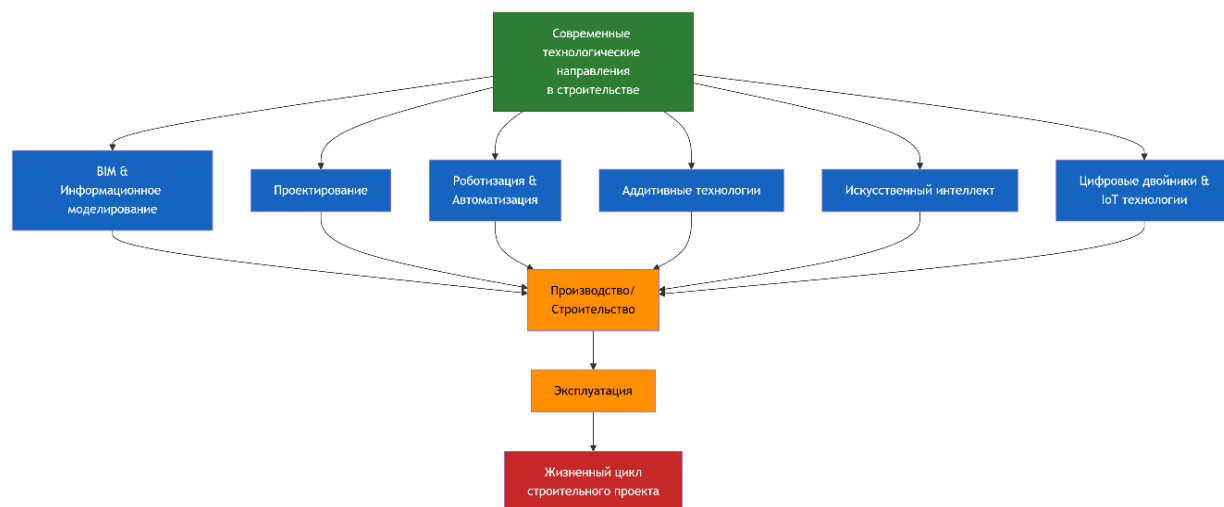


Рис. 2. Взаимосвязь современных технологических направлений
Fig. 2. Interrelation of modern technological directions

Все технологические направления взаимосвязаны и создают синергетический эффект, повышая эффективность управления всем жизненным циклом строительного объекта от концепции до вывода из эксплуатации.

Для системного понимания влияния технологий на деятельность компании необходима их классификация не по техническому принципу, а по области применения и уровню воздействия на бизнес-процессы. В рамках исследования предложена классификация (табл. 1), которая связывает группы технологий с конкретными решениями, характером их влияния и примерами внедрения.

Важнейший вывод проведенной классификации заключается в том, что современные технологии перестали быть просто инструментарием для выполнения локальных задач. Они превратились в стратегический актив, определяющий архитектуру бизнес-модели компании. Их успешное внедрение требует не разовых закупок, а комплексного подхода, включающего интеграцию тех-

нологий между собой, перепроектирование процессов с ориентацией на полный жизненный цикл и адаптацию организационной структуры и компетенций персонала.

Таблица 1

Классификация современных строительных технологий
по областям применения

Table 1

Classification of modern construction technologies by application area

Группа технологий	Конкретные технологии	Влияние на бизнес-процессы	Примеры внедрения
Информационного моделирования (BIM)	3D-, 4D-, 5D-модели, CDE, Digital Twin	Сокращение ошибок, точное планирование, управление жизненным циклом	Autodesk BIM 360, РПК, ГК «Самолет» [11]
Автоматизации и роботизации	Строительные роботы, автономная техника, 3D-печать, БПЛА	Рост производительности, снижение риска травм, уменьшение отходов	АМТ-Спецавиа, компания ICON [12]
На основе данных (Data-driven)	Big Data, AI, ML, IoT	Улучшенные прогнозы, оптимизация поставок, контроль качества	ALICE Technologies, Samsung C&T [13]
Материалы и аддитивные технологии	Самовосстанавливающиеся материалы, композиты, 3D-печать металла	Повышение надежности, сокращение сроков, упрощение форм	ХЬЮСТОН, Delft University of Technology [14]
Методы управления и организации	Scrum, Agile, бережливое строительство, модульное строительство	Минимизация потерь, ускорение реализации, повышение гибкости	Ависта Модуль Инжиниринг [15]

Внедрение рассмотренных технологий оказывает не корректирующее, а трансформационное воздействие на организацию бизнес-процессов строительной компании. Это воздействие носит системный характер, затрагивая операционную деятельность, управленческие практики, организационную структуру и культуру компании (рис. 3).

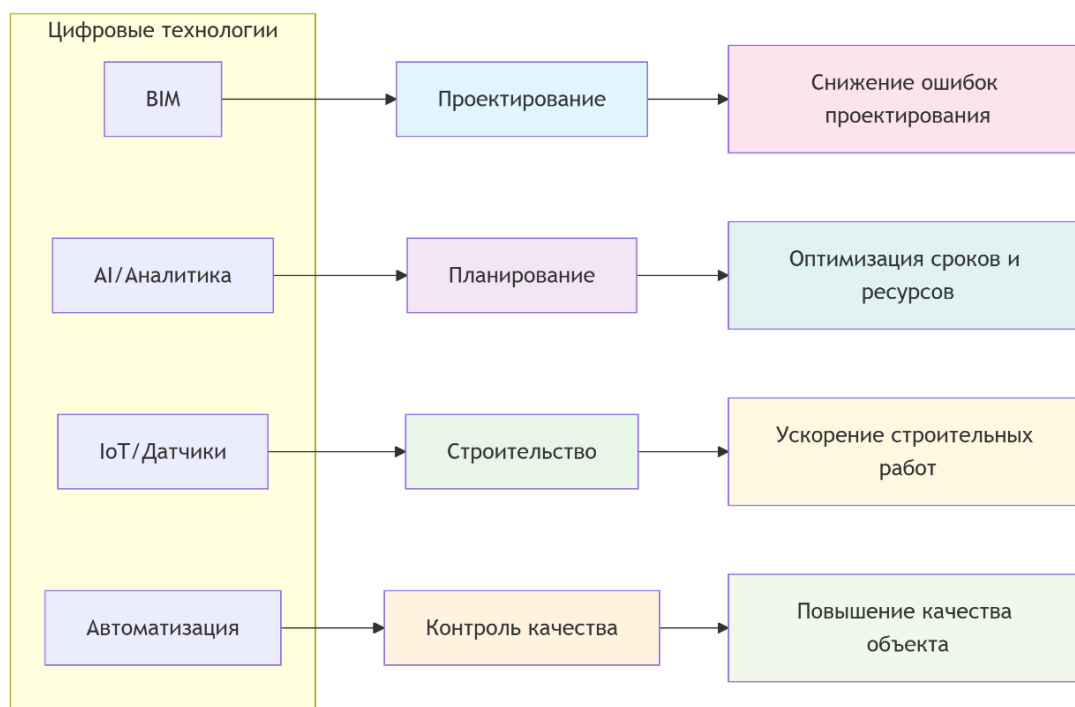


Рис. 3. Системное влияние цифровых технологий на бизнес-процессы строительной компании
Fig. 3. Systemic impact of digital technologies on business processes of a construction company

Для детального анализа проведено сопоставление традиционной и цифровой организации ключевых бизнес-процессов (табл. 2).

Таблица 2
Анализ воздействия новых технологий на ключевые бизнес-процессы

Table 2

Analysis of the new technologies impact on key business processes

Бизнес-процесс	Традиционная организация	Организация с использованием новых технологий	Количественный эффект
Управление проектированием	Разрозненные чертежи, ручная координация изменений, множественные коллизии	Единая BIM-модель, автоматическое выявление коллизий, облачная координация	Снижение количества ошибок на 40–50 %, сокращение времени согласований на 30 % [5]
Планирование и оценка стоимости	Руководство сметными нормами, экспертные оценки, статические графики	5D-BIM-моделирование, автоматическое объемно-календарное планирование, предиктивная аналитика	Точность сметных расчетов повышается на 15–20 %, сокращение времени планирования на 25–35 % [5]
Управление снабжением и логистикой	Ручной учет, бумажные накладные, эмпирическое управление запасами	IoT-датчики, RFID-метки, автоматизированные системы складского учета, блокчейн для отслеживания поставок	Сокращение потерь материалов на 20–25 %, уменьшение простоев из-за отсутствия материалов на 30 % [7]
Управление строительным производством	Визуальный контроль, бумажные журналы работ, реактивное устранение проблем	Дроны для мониторинга, носимые устройства, BIM-модели на планшетах, предиктивная аналитика рисков	Рост производительности труда на 10–15 %, сокращение сроков строительства на 10–20 % [16]
Контроль качества и безопасность	Выборочные проверки, бумажные акты, статистика по произошедшим инцидентам	Компьютерное зрение для контроля качества, датчики на конструкциях, умная каска с датчиками, анализ данных в реальном времени	Снижение количества дефектов на 25–30 % [1]

Согласно табл. 2, новые технологии радикально меняют строительную отрасль, повышая эффективность (сокращая сроки и ошибки), позволяя предсказывать и предотвращать проблемы, создавая единую цифровую среду, оптимизируя ресурсы и усиливая конкурентоспособность компаний благодаря глубоким изменениям в бизнес-процессах.

Ключевым следствием технологической трансформации является эволюция организационной структуры (рис. 4, 5; табл. 3).

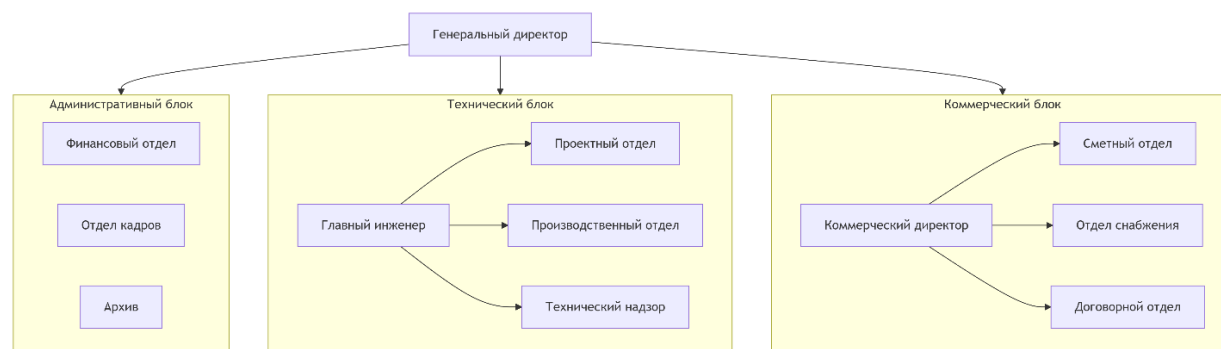


Рис. 4. Традиционная ОСУ
Fig. 4. Traditional organizational management structure

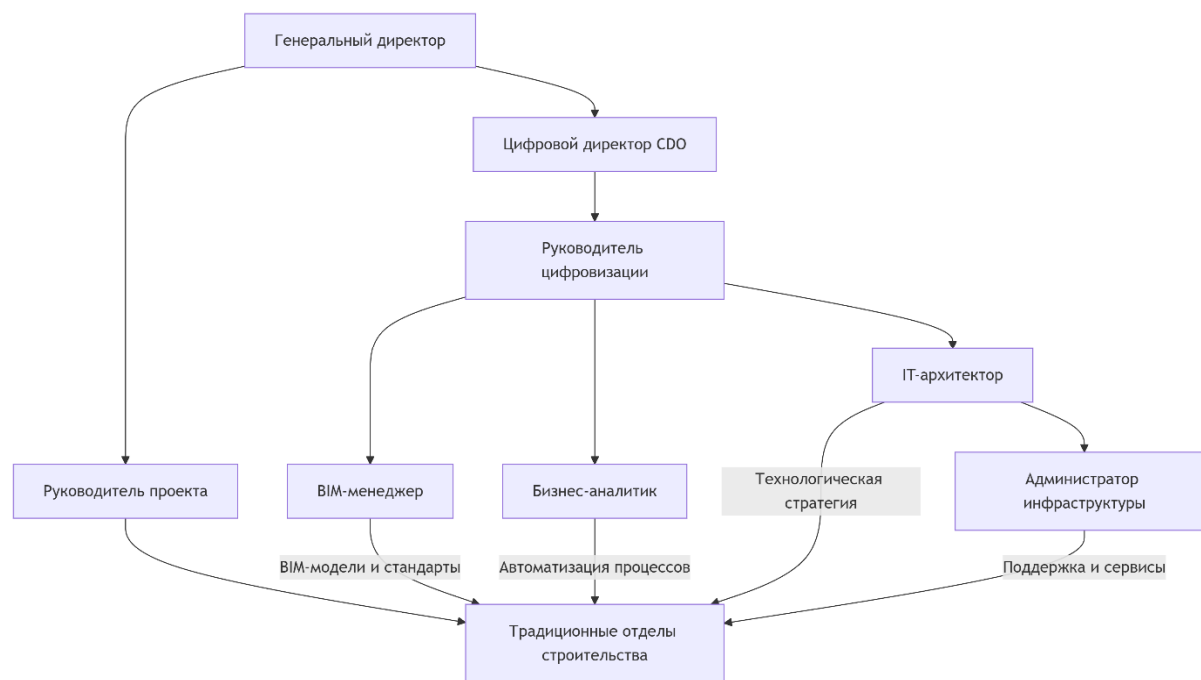


Рис. 5. Трансформированная ОСУ
Fig. 5. Transformed organizational management structure

Ключевой вызов для цифровой трансформации – организационная модель, основанная на информационно разрозненных функциональных подразделениях. Такая архитектура порождает три системные проблемы: изолированные базы данных, дублирование усилий и критическую потерю скорости на этапах взаимодействия и согласования.

Цифровая трансформация в строительной отрасли требует фундаментального перехода от традиционной иерархической структуры к сетевой платформенной модели. Ключевым элементом этой трансформации становится единая цифровая платформа (Common Data Environment, CDE), которая заменяет вертикальные цепочки подчинения горизонтальными связями между всеми участниками процессов.

1. Институционализация цифровых ролей: формирование новых компетенций

Создание специализированных цифровых подразделений становится стратегическим ответом на вызовы трансформации. Например, в ГК «ПИК» была создана система управления знаниями для BIM, которая централизованно координирует внедрение технологий на всех проектах компании [17]. По данным исследования McKinsey, компании со структурированными центрами цифровых компетенций достигают на 40–50 % более высокой скорости внедрения технологий по сравнению с организациями, где цифровизация распределена по отделам [1].

2. Трансформация традиционных функций: от документов к данным

Традиционные отделы кардинально меняют свою функциональную нагрузку. Например, сметные службы переходят от работы с нормативными таблицами к аналитике на основе 5D-BIM-моделей. Внедрение автоматического формирования ведомостей в BIM-среде в компании «Мостострой-11» способствовало уменьшению трудозатрат на подготовку сметной документации при параллельном повышении точности расчетов [18].

3. Кросс-функциональные команды: гибкость через платформу

Формирование временных проектных команд, объединяющих специалистов разных профилей, становится новой нормой. В проекте «Лахта Центр» создание виртуальной рабочей группы в среде Autodesk BIM 360 позволило сократить время решения проблемы с фасадными конструкциями с 2–3 недель до 3 дней [19]. По данным исследования JLL, использование CDE для кросс-функционального взаимодействия снижает количество запросов на уточнение информации (RFI) на 40–50 %.

4. Data-driven управление: решения на основе аналитики

Переход к управлению на основе данных демонстрирует измеримые результаты. В ГК «Эталон» внедрение дашбордов на базе Power BI для мониторинга ключевых показателей позволило

сократить объем незапланированных работ в прогнозном значении на 12–15 % [20]. Согласно отчету FMI Corporation, компании, реализующие Data-driven подход в строительстве, экономят в среднем 1,5–2 % от общего бюджета проекта за счет сокращения переделок и оптимизации процессов [21].

Эволюция организационной структуры в строительстве проходит через четыре взаимосвязанных этапа: создание цифровых подразделений, трансформацию традиционных функций, внедрение кросс-функциональных команд и переход к Data-driven управлению. Ключевым фактором успеха становится интеграция этих элементов через единую цифровую платформу, которая обеспечивает синергию между технологическими и организационными изменениями [22, 23].

2. Совершенствование бизнес-процессов строительной компании на основе цифровой трансформации

Подавляющее большинство строительных компаний в России, особенно среднего звена, до сих пор функционирует в рамках классической линейно-функциональной организационной структуры. Согласно данным отраслевого исследования НОСТРОЙ, около 85 % компаний сохраняют эту модель [16]. Ее устойчивость объясняется исторической преемственностью, понятностью и простотой управления в условиях стабильной среды с ограниченным числом проектов.

Накопившиеся системные проблемы обуславливают острую необходимость в трансформации. Важно понимать, что цифровая трансформация – это не просто внедрение отдельных программ, а фундаментальное изменение бизнес-модели и структуры управления. Ее цель – создание единого цифрового пространства для всех участников проекта.

Для наглядности сопоставления двух подходов рассмотрим ключевые различия в табл. 3.

Сравнительный анализ: от традиционной к цифровой структуре
Comparative Analysis: From Traditional to Digital Structure

Таблица 3
Table 3

Критерий	Традиционная структура	Цифровая структура
Управление данными	Разрозненные файлы (Excel, Word), бумажные носители	Единая централизованная платформа (BIM, ERP, CDE)
Коммуникация	Вертикальная, через иерархию	Горизонтальная, сквозная, между всеми участниками
Принятие решений	Реактивное, на основе опыта и интуиции	Проактивное, на основе данных и аналитики
Скорость процессов	Низкая, из-за бюрократии и ручного труда	Высокая, за счет автоматизации и прямых коммуникаций
Контроль и прозрачность	Фрагментарный, запаздывающий	Полный, в реальном времени
Риски	Высокие, трудно прогнозируемые	Управляемые, прогнозируемые с помощью аналитики

Цифровая трансформация представляет собой ответ на эти системные вызовы. Ее цель – не автоматизация текущих процессов, а создание единого цифрового пространства (цифровой платформы), которое перестраивает всю логику работы компании. Ключевые преимущества цифровой модели управления:

– сквозная прозрачность: все данные аккумулируются в единой среде (CDE на базе BIM и ERP), обеспечивая «единый источник истины» и доступ к актуальной информации для всех авторизованных участников в режиме реального времени;

– проактивное и предиктивное управление: аналитические системы на основе больших данных и ИИ позволяют прогнозировать риски (задержки поставок, превышение сметы) и принимать упреждающие меры;

– горизонтальные коммуникации и коллаборация: цифровые платформы (Autodesk Construction Cloud, PlanGrid) позволяют командам напрямую обмениваться информацией, моделями и документами, минуя длинные иерархические цепочки;

– автоматизация рутинных операций: Robotic Process Automation (RPA) и бизнес-правила

в ERP-системах высвобождают сотрудников от ручного ввода данных, сверки документов, формирования стандартных отчетов;

– управление, основанное на данных (Data-Driven Decision Making): решения принимаются на основе анализа объективных метрик и KPI, отображаемых на дашбордах, а не на основе субъективных мнений или устаревших отчетов.

Проведенный анализ демонстрирует, что переход от традиционной линейно-функциональной модели к гибкой цифровой структуре является не просто технологическим трендом, а объективной необходимостью для повышения конкурентоспособности строительных компаний. Цифровая трансформация позволяет преодолеть ключевые системные недостатки иерархической системы, обеспечивая принципиально новый уровень прозрачности, скорости и эффективности управления проектами.

Проведем идентификацию и структурирование ключевых бизнес-процессов строительной компании. Выделим бизнес-процессы, требующие цифровой трансформации (табл. 4).

Структура бизнес-процессов строительной компании

Таблица 4

Table 4

Business process structure of a construction company

Категория процесса	№	Название процесса
Основные	Б-П ₁	Управление инвестиционно-строительным проектом
	Б-П ₂	Проектирование и подготовка строительства
	Б-П ₃	Управление цепочкой поставок
	Б-П ₄	Строительное производство
	Б-П ₅	Контроль качества и безопасности
Вспомогательные	Б-П ₆	Управление персоналом и компетенциями
	Б-П ₇	Разработка и сопровождение ИТ-систем
	Б-П ₈	Материально-техническое обеспечение
	Б-П ₉	Поддержание инфраструктуры
Управленческие	Б-П ₁₀	Стратегическое планирование и развитие
	Б-П ₁₁	Оперативное управление и контроль
	Б-П ₁₂	Финансовый мониторинг и отчетность
	Б-П ₁₃	Управление филиальной сетью и объектами

Данная структуризация создает системное представление о деятельности компании и служит основой для проведения диагностики и приоритизации процессов, подлежащих цифровой трансформации.

Учитывая ограниченность ресурсов (финансовых, временных, человеческих), компания не может одновременно трансформировать все 13 процессов. Для определения стратегических приоритетов был применен метод критических факторов успеха (КФУ) в сочетании с матричным ранжированием.

Шаг 1. Определение критических факторов успеха (КФУ).

На основе анализа отраслевых тенденций и стратегических целей цифровизации были выделены семь КФУ для строительной компании:

КФУ₁ – внедрение передовых цифровых технологий;

КФУ₂ – повышение операционной эффективности;

КФУ₃ – обеспечение прозрачности управления;

КФУ₄ – сокращение сроков строительства;

КФУ₅ – снижение себестоимости проектов;

КФУ₆ – повышение качества строительства;

КФУ₇ – развитие кадрового потенциала;

Шаг 2. Оценка важности бизнес-процессов.

Путем экспертной оценки было установлено соответствие каждого бизнес-процесса выделенным КФУ (табл. 5).

Таблица 5

Матрица сопоставления бизнес-процессов и КФУ

Table 5

Business Process and Key Success Factor Mapping Matrix

Бизнес-процесс	КФУ ₁	КФУ ₂	КФУ ₃	КФУ ₄	КФУ ₅	КФУ ₆	КФУ ₇	Важность
Б-П ₁ – Управление проектом	+	+	+	+	+	+	+	7
Б-П ₂ – Проектирование	+	+	+	+	+	+	+	7
Б-П ₃ – Управление поставками	+	+	+	+	+			5
Б-П ₄ – Строительное производство	+	+	+	+	+	+		6
Б-П ₅ – Контроль качества	+	+	+		+	+		5
Б-П ₆ – Управление персоналом	+						+	2
Б-П ₇ – Разработка ИТ-систем	+	+	+	+	+	+	+	7
Б-П ₈ – МТО	+	+		+	+			4
Б-П ₉ – Поддержание инфраструктуры	+							1
Б-П ₁₀ – Стратегическое планирование	+	+	+				+	4
Б-П ₁₁ – Оперативное управление	+	+	+	+	+			5
Б-П ₁₂ – Финансовый мониторинг	+	+	+		+			4
Б-П ₁₃ – Управление филиальной сетью	+	+	+					3

Количество связанных с процессом КФУ определяло его важность (В). Наиболее важными (В = 7) оказались процессы, влияющие на все факторы успеха: Б-П₁ (Управление проектом), Б-П₂ (Проектирование) и Б-П₇ (Разработка ИТ-систем).

Шаг 3. Оценка проблемности бизнес-процессов.

Для каждого процесса была проведена диагностика и присвоена интегральная оценка проблемности (П) по 5-балльной шкале, где 1 – процесс эффективен, 5 – процесс неэффективен и имеет критические проблемы (табл. 6).

Таблица 6

Оценка степени проблемности бизнес-процессов

Table 6

Business Process Problem Score

Бизнес-процесс	Проблемы	Сила проблемы	Проблемность
Б-П ₁ – Управление проектом	Разрозненность данных, длительные согласования	5	5
Б-П ₂ – Проектирование	Коллизии в документации, ручная работа	4	5
Б-П ₃ – Управление поставками	Простои, перерасход материалов	2	4
Б-П ₄ – Производство	Низкая производительность, бумажная отчетность	3	3
Б-П ₅ – Контроль качества	Отсутствие автоматизированных систем	4	4
Б-П ₆ – Управление персоналом	Устаревшие методы оценки	2	1
Б-П ₇ – Разработка ИТ-систем	Функциональная несовместимость	5	5
Б-П ₈ – Материально-техническое обеспечение	Неэффективное управление запасами	2	4
Б-П ₉ – Инфраструктура	Реактивное обслуживание	1	1
Б-П ₁₀ – Стратегическое планирование	Устаревшие данные, слабый анализ сценариев	3	5
Б-П ₁₁ – Оперативное управление	Запаздывание реагирования	3	5
Б-П ₁₂ – Финансовый мониторинг	Длительность учета, фрагментарность данных	3	3
Б-П ₁₃ – Филиалы	Сложность контроля, отсутствие единых стандартов	4	2

Максимальную оценку ($\Pi = 5$) получили процессы Б-П₁, Б-П₂, Б-П₇, Б-П₁₀ (Стратегическое планирование) и Б-П₁₁ (Оперативное управление), что свидетельствует о глубоких системных дисфункциях именно в этих областях.

Шаг 4. Построение матрицы ранжирования.

На основе оценок важности (В) и проблемности (П) была построена двухмерная матрица (рис. 6), разделенная на зоны приоритетности. Процессы, попавшие в правый верхний квадрант (высокая важность, высокая проблемность), были отнесены к категории высокого приоритета.

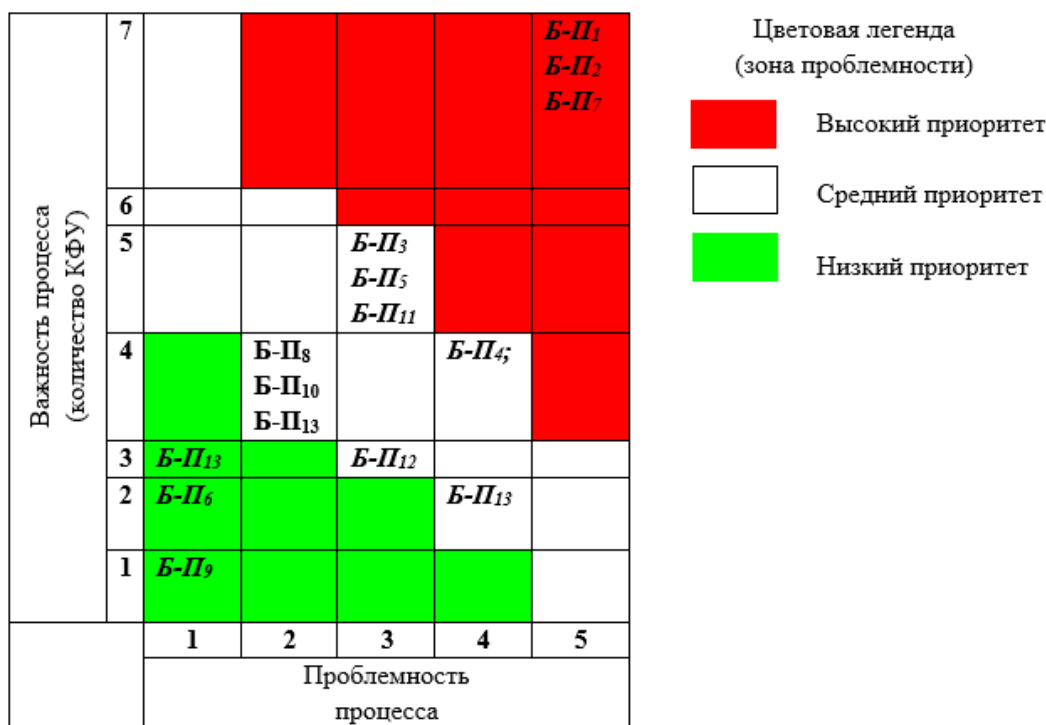


Рис. 6. Матрица ранжирования
Fig. 6. Ranking matrix

Наиболее проблемными оказались следующие бизнес-процессы: Б-П₁ – Управление проектом, Б-П₂ – Проектирование и Б-П₇ – Разработка ИТ-систем.

Шаг 5. Оценка возможности изменений.

Для процессов высокого приоритета был проведен дополнительный анализ барьеров для изменений по трем группам: финансовые, кадровые и законодательные (табл. 7). Суммарная оценка (где выше балл – выше барьер) определяла возможность изменений (ВИ).

Оценка возможности проведения изменений
Evaluation of Change Capability
Таблица 7
Table 7

Бизнес-процесс	Финансы	Персонал	Законодательство	Итого
Б-П ₁ – Управление проектом	3	4	2	9
Б-П ₂ – Проектирование	4	3	3	10
Б-П ₇ – Разработка ИТ-систем	5	4	2	11

Шаг 6. Итоговое ранжирование и выбор приоритетов.

Итоговый приоритет процесса рассчитывался как сумма трех интегральных критериев:

Приоритетность = Важность + Проблемность + (11 – Возможность изменений).

В результате итогового ранжирования (табл. 8) были определены три наиболее приоритетных для цифровой трансформации бизнес-процесса.

Итоговое ранжирование бизнес-процессов

Table 8

Final ranking of business processes

Бизнес-процесс	Важность	Проблемность	Возможность изменений	Приоритетность
Б-П ₁ – Управление проектом	7	5	9	21
Б-П ₂ – Проектирование	7	5	10	22
Б-П ₇ – Разработка ИТ-систем	7	5	11	23
Б-П ₄ – Строительное производство	6	4	8	18
Б-П ₃ – Управление поставками	5	4	7	16

Таким образом, наиболее приоритетными для перехода к цифровой ОСУ являются бизнес-процессы:

- Б-П₇ – Разработка и сопровождение ИТ-систем (приоритетность 23);
- Б-П₂ – Проектирование и подготовка строительства (приоритетность 22);
- Б-П₁ – Управление инвестиционно-строительным проектом (приоритетность 21).

Эти процессы обладают наибольшей стратегической важностью, высокой степенью проблемности в текущем состоянии и достаточной возможностью для проведения цифровых преобразований.

Центральным объектом для трансформации стал процесс Б-П₁ – Управление инвестиционно-строительным проектом. Для его анализа и проектирования целевого состояния использовалась методология функционального моделирования IDEF0 [10], позволяющая наглядно отобразить функции, входы, выходы, управление и механизмы. В частности, чтобы оптимизировать какой-либо процесс на предприятии, необходимо построить модель бизнес-процесса «как есть», то есть соответствующую реальному положению дел в организации. По построенной модели проводится анализ существующего бизнес-процесса, выявляются его недостатки и ошибки. Следующим шагом для оптимизации процесса является разработка модели процесса «как должно быть», то есть модели процесса с устраненными недостатками и ошибками. На следующем этапе происходит тестирование построенной модели с устраненными недостатками. По результатам тестирования проводится «работа над ошибками» с последующим улучшением процесса.

На рис. 7 представлен функциональный блок, в котором отражены «вход», «выход», «ресурсы» и «управляющее воздействие» бизнес-процесса «как есть».

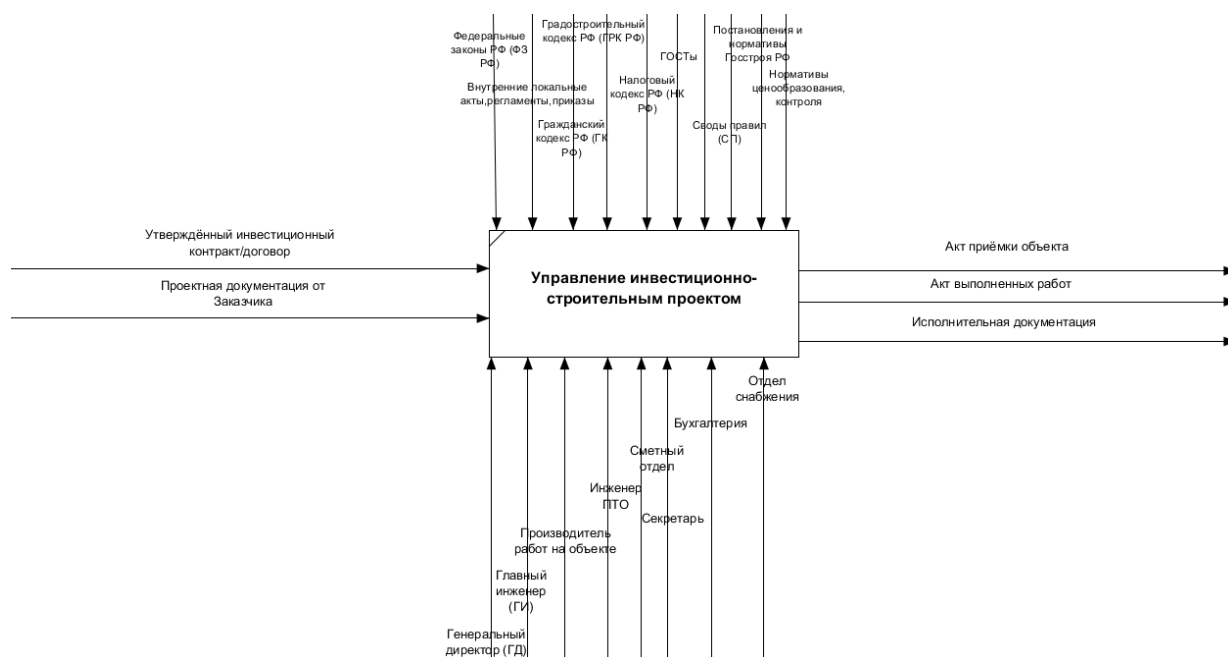


Рис. 7. Функциональный блок бизнес-процесса «как есть»
Fig. 7. Functional block of the business process “AS IS”

Модель бизнес-процесса «как есть», построенная в нотации IDEF0, представлена на рис. 8.

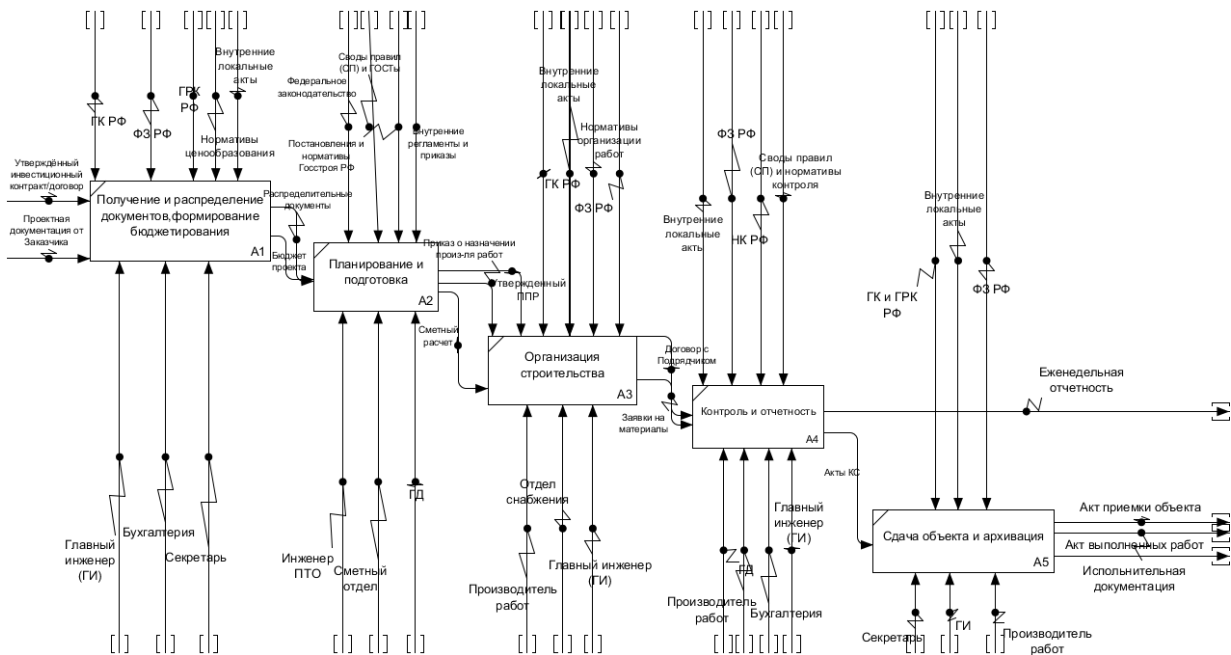


Рис. 8. Модель бизнес-процесса «как есть»
Fig. 8. AS-IS business process model

Декомпозиция бизнес-процесса (см. рис. 8) выполнена на основе принципов построения процессной архитектуры [24], а также с учётом стадий жизненного цикла проекта [25]. Такое структурирование позволяет избежать создания избыточного количества разрозненных сценариев и обеспечивает прозрачность зон ответственности.

Текущее состояние процесса характеризуется функциональной разрозненностью, бумажным документооборотом, отсутствием единого информационного пространства и высокой зависимостью от персональных решений ключевых менеджеров. Процесс линейный, цикл согласований длительный, что приводит к замедлению операционной деятельности и росту числа различных ошибок.

На основе выявленных проблем был разработан функциональный блок бизнес-процесса «как должно быть» (рис. 9).

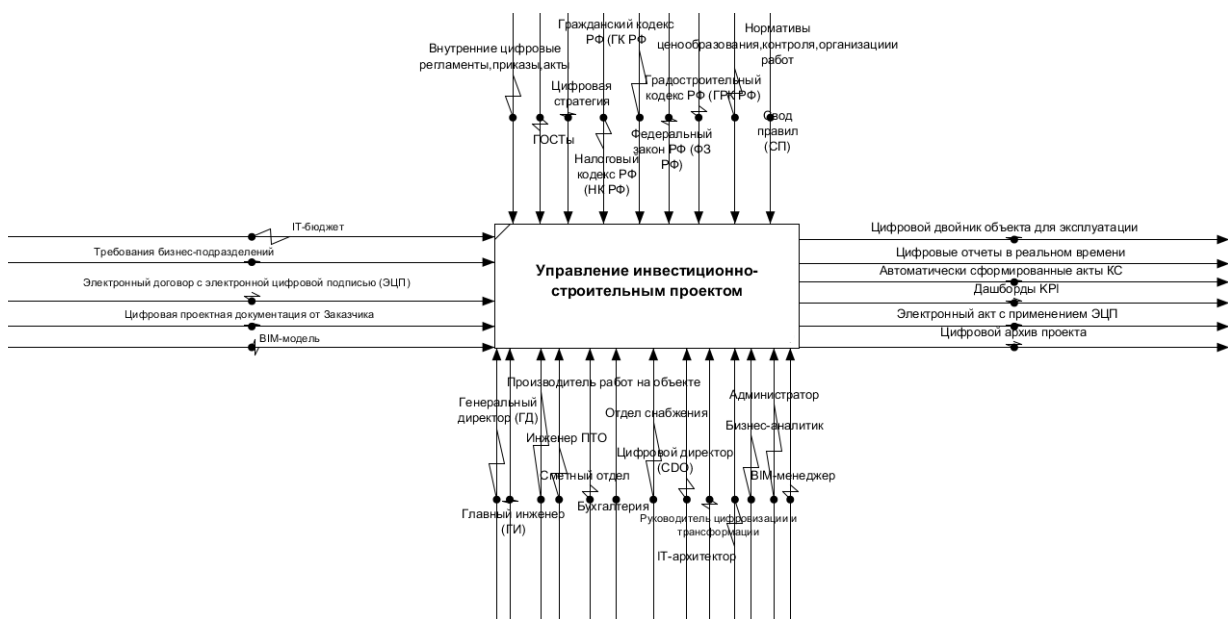


Рис. 9. Функциональный блок бизнес-процесса «как должно быть»
Fig. 9. Functional block of the business process «TO BE»

Модель бизнес-процесса «как должно быть» изображена на рис. 10.

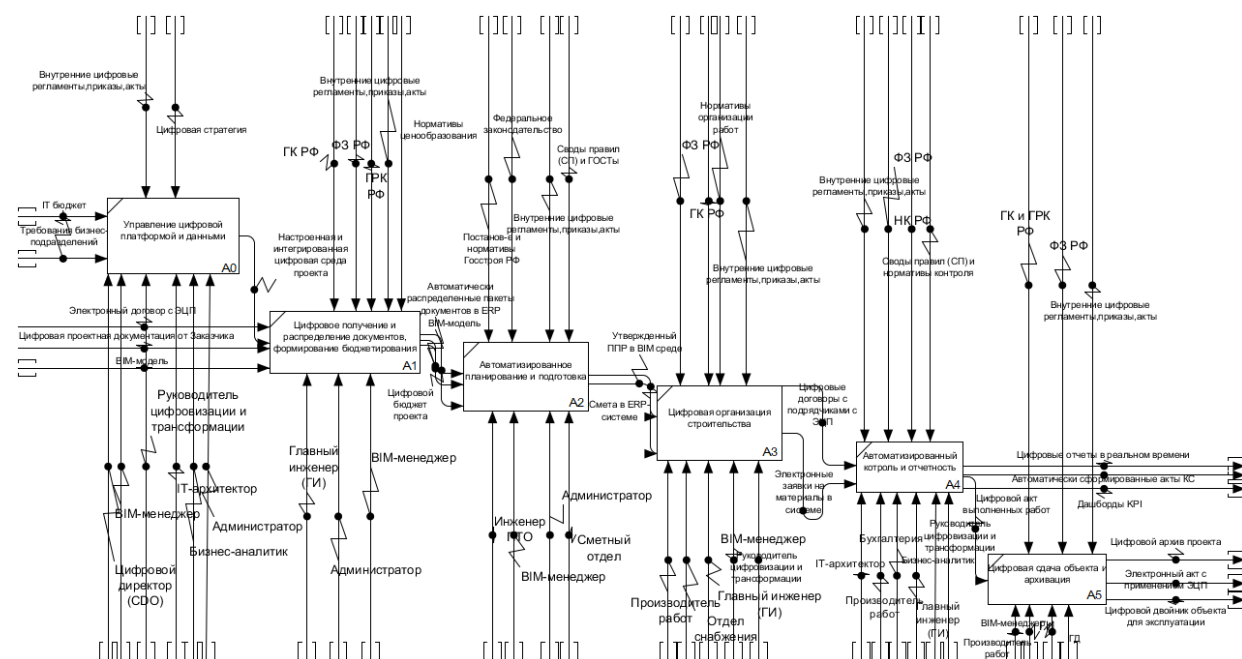


Рис. 10. Модель бизнес-процесса «как должно быть»
Fig. 10. TO-BE business process model

Ключевое и принципиальное изменение бизнес-процесса «как должно быть» (см. рис. 10) – это появление нового стратегического контура управления (A_0) до начала любой операционной деятельности, а также:

- создание единой среды данных (CDE) и внедрение ERP-системы;
- использование BIM на всех этапах жизненного цикла проекта;
- автоматизация планирования, снабжения и контроля;
- внедрение мобильных приложений и IoT-датчиков и формирование цифрового двойника объекта.

Целевая цифровая модель разработана с учетом требований и принципов, заложенных в современных нормативных документах по цифровизации строительной отрасли, включая Концепцию информационного моделирования (BIM) в строительстве, утвержденную приказом Минстроя России [26], и положения ГОСТ Р 10.0.01–2018 «Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений» [27], СП 471.1325800.2019 «Информационное моделирование в строительстве» [28], которые предписывают создание единой цифровой платформы (CDE) для управления полным жизненным циклом объекта и обеспечивают основу для формирования цифрового двойника.

Организационным следствием внедрения этой модели является появление новых цифровых ролей: цифровой директор (CDO), руководитель цифровизации, BIM-менеджер, IT-архитектор, бизнес-аналитик, администратор инфраструктуры. Данные роли формируют центральный управленческий и технологический контур, ответственный за поддержку, интеграцию и развитие цифровой платформы предприятия.

Таким образом, редизайн процесса Б-П₁ представляет собой переход от операционно-проектной модели к платформенно-экосистемной.

Внедрение целевой цифровой модели является капиталоемким проектом, требующим обоснования экономической целесообразности. Для оценки был использован метод прогнозной оценки эффективности на основе модели условной строительной компании.

Исходные данные для моделирования:

- годовой оборот компании (TR): 1200 млн руб.;
- количество проектов в год (N): 10;

- капитальные затраты (CAPEX, I) на трансформацию: 65 млн руб. (внедрение ERP и CDE – 30 млн руб., BIM и обучение – 20 млн руб., ПО и лицензии – 10 млн руб., апгрейд ИТ-инфраструктуры – 5 млн руб.);

- годовые операционные затраты на поддержку системы (OPEX, C): 7 млн руб.

Расчет прогнозного годового экономического эффекта проводился по трем основным направлениям, выявленным в результате анализа трансформации:

1) сокращение административных затрат и рост управленческой эффективности (\mathcal{E}_1): экономия от сокращения времени на документооборот (3,75 млн руб.) и сроков проектирования (1,0 млн руб.). Итого: 4,75 млн руб./год;

2) снижение материальных и логистических затрат (\mathcal{E}_2): экономия от оптимизации учета и снижения потерь материалов (7,2 млн руб.) и от сокращения ошибок в сметах за счет BIM (8,4 млн руб.). Итого: 15,6 млн руб./год;

3) эффект от оптимизации сроков реализации проектов (\mathcal{E}_3): условный прирост маржинального дохода за счет высвобождения ресурсов и возможности выполнения дополнительных работ (6,0 млн руб./год). Итого: 6,0 млн руб./год.

Прогноз годового экономического эффекта представлен в табл. 9.

Сводная таблица прогнозного годового экономического эффекта

Таблица 9

Summary table of projected annual economic impact

Table 9

Направление эффекта	Формула	Годовая экономия / прирост дохода, млн руб.
Сокращение административных затрат и рост управленческой эффективности	$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_{\text{док}} + \mathcal{E}_{\text{проект}}$	4,75
Снижение материальных и логистических затрат	$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_{\text{мат}} + \mathcal{E}_{\text{смета}}$	15,60
Эффект от оптимизации сроков реализации проектов	$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_{\text{сроки}}$	6,00
Годовой экономический эффект (P)	$P = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$	26,35
Годовые операционные затраты на систему (OPEX, $C_{\text{опекс}}$)	$C_{\text{опекс}}$	7,00
Чистый годовой экономический эффект ($P_{\text{чист}}$)	$P_{\text{чист}} = P - C_{\text{опекс}}$	19,35

При этом срок окупаемости (PP): $PP = \frac{I}{P_{\text{чист}}} = \frac{65}{19,35} \approx 3,36$ года (или ~ 40 месяцев).

Возврат на инвестиции (ROI): $ROI = \frac{P_{\text{чист}}}{I} \cdot 100 \% = \frac{19,35}{65} \cdot 100 \% \approx 29,8 \%$ в год.

Проведенная оценка демонстрирует, что, несмотря на значительный объем первоначальных инвестиций, проект цифровой трансформации является экономически обоснованным и инвестиционно привлекательным. Срок окупаемости в 3–3,5 года является приемлемым для стратегических проектов в капиталоемких отраслях. Годовой ROI на уровне ~ 30 % свидетельствует о высокой доходности инвестиций после выхода на плановые показатели. Основным драйвером экономии (более 60 % эффекта) является снижение прямых материальных и логистических затрат, что подтверждает высокую значимость инструментов точного учета, планирования и контроля, обеспечиваемых BIM и ERP.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило гипотезу о том, что цифровая трансформация бизнес-процессов является не опциональным технологическим трендом, а стратегической необходимостью и экономически обоснованным направлением развития для строительных компаний, стремящихся сохранить и усилить свои конкурентные позиции в условиях глобальных вызовов и возможностей цифровой экономики.

Системный анализ исторической эволюции и современного состояния технологий в строительстве позволил выявить четкий вектор развития от ремесленной, через индустриальную и информационную фазы, к этапу глубокой цифровой трансформации. Ключевой особенностью текущего

этапа является конвергенция технологий (BIM, IoT, Big Data, AI, робототехника), их интеграция в единую экосистему и трансформационное воздействие на саму парадигму управления. Технологии перестали быть инструментом для задач, превратившись в актив, определяющий архитектуру бизнес-модели.

Диагностика традиционной линейно-функциональной структуры, доминирующей в российской строительной отрасли, выявила ее системные недостатки: функциональную разобщенность, разрозненность данных, бумажный документооборот, реактивный характер управления и низкую операционную эффективность. Эти недостатки становятся критическими барьерами на пути роста и конкурентоспособности.

В результате применения методологии, основанной на критических факторах успеха и матричном ранжировании, были идентифицированы и приоритизированы бизнес-процессы строительной компании. Установлено, что наибольший стратегический потенциал для цифровой трансформации и наибольшую проблемность в текущем состоянии имеют три процесса: «Разработка и сопровождение ИТ-систем», «Проектирование и подготовка строительства» и «Управление инвестиционно-строительным проектом». Фокус на этих процессах позволяет получить максимальный синергетический эффект от преобразований.

Центральным практическим результатом работы стала разработка целевой функциональной модели ключевого процесса управления проектом в нотации IDEF0. Модель «как должно быть» воплощает принципы перехода к цифровой платформенной организации, основанной на единой среде данных (CDE), сквозном использовании BIM, интеграции ERP-системы, автоматизации рутинных операций и формировании цифрового двойника объекта. Эта модель представляет собой не автоматизацию старых практик, а принципиально новую логику управления, где цифровая платформа становится стратегическим активом, а данные – основным ресурсом для принятия решений.

Прогнозная оценка экономической эффективности, выполненная на модели условной компании, показала, что реализация предложенной концепции способна обеспечить чистый годовой экономический эффект в размере около 19,35 млн руб. при объеме инвестиций 65 млн руб. Срок окупаемости проекта составит 3,36 года, а годовая доходность инвестиций (ROI) достигнет 29,8 %. Основными источниками экономии являются сокращение материально-логистических и административных затрат, а также эффект от оптимизации сроков. Данные показатели свидетельствуют о высокой инвестиционной привлекательности и умеренном уровне рисков проекта цифровой трансформации.

Таким образом, результаты исследования формируют научно-методологическую и практическую основу для разработки и реализации стратегии цифровой трансформации в строительных компаниях. Предложенный подход, включающий аудит и приоритизацию процессов, функциональное моделирование целевого состояния и экономическое обоснование, позволяет перейти от хаотичного внедрения разрозненных технологий к системному, управляемому преобразованию бизнес-модели, закладывая фундамент для устойчивого роста операционной эффективности, управляемости и конкурентоспособности в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. McKinsey Global Institute. McKinsey Global Institute: 2024 in charts 2024. URL: <https://www.mckinsey.com/mgi/our-research/mckinsey-global-institute-2024-in-charts> (дата обращения: 06.01.2026).
2. Никитин В.Н., Подсорин В.А., Овсянникова Е.Н. Анализ и диагностика изменений производительности труда в строительной отрасли в России и за рубежом // *Экономические системы*. 2024. Т. 17, № 4. С. 111–122. DOI: 10.29030/2309-2076-2024-17-4-111-122
3. Масюк Н.Н. Цифровые организационные изменения в бизнесе: науч. моногр. Владивосток: Изд-во ВВГУ, 2024. 186 с.
4. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry // *Leadership and Management in Engineering*. 2011. Vol. 11, no. 3. P. 241–252. URL: [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127) (дата обращения: 20.11.2025).
5. Глаголев К.В. Эволюция строительных материалов и конструкций. СПб.: СПбГАСУ, 2022. 180 с.

6. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors / С.М. Eastman, Р. Teicholz, R. Sacks, K. Liston. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2018. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119287568> (дата обращения: 09.11.2025).
7. Кисель Т.Н., Прохорова Ю.С. Исследование уровня цифровизации на российских предприятиях инвестиционно-строительной сферы: моногр. М.: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2023.
8. Цуканова О.А. Методология и инструментарий моделирования бизнес-процессов: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2017.
9. Паршин М.А., Круглов Д.А. Переход России к шестому технологическому укладу: возможности и риски // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 5. Ч. 2. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/05/33059> (дата обращения: 31.12.2025).
10. Управление строительным комплексом / Т.А. Аверина, С.А. Баркалов, Е.В. Баутина и др.; под общ. ред. С.А. Баркалова. М.: Изд-во ООО «Ритм», 2024. 456 с.
11. BIM-портал BIMTEAM.RU: статьи, новости, стандарты. URL: <https://bimteam.ru> (дата обращения: 06.01.2026).
12. ICON unveils groundbreaking construction technologies at SXSW // ICON: официальный сайт. March 2023. URL: <https://www.iconbuild.com/updates/icon-unveils-groundbreaking-construction-technologies-at-sxsw> (дата обращения: 06.01.2026).
13. Keeping Construction Sites Safe with IoT Technology. URL: <https://news.samsungent.com/en/features/engineering-construction/2024-06-keeping-construction-sites-safe-with-iot-tech/> (дата обращения: 06.01.2026).
14. Post W. Self-Healing Polymer Composites. Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology, 2017. DOI: 10.4233/uuid:00e46bd1-ee8-4411-8626-fbd902749904
15. Без брака. Как в «Ависта Модуль Инжиниринг» внедрили бережливое производство и BIM-проектирование // SberPro: сайт. URL: <https://sber.pro/cases/bez-braka-kak-v-avista-modul-inzhiniring-vnedrili-berezhlyvoe-proizvodstvo-i-bim-proektirovanie> (дата обращения: 06.01.2026).
16. Годовой отчет о деятельности Национального объединения строителей за 2023 год // НОСТРОЙ: Национальное объединение строителей: сайт. 2024. URL: https://nostroy.ru/nostroy/godovoy-otchet/?ELEMENT_ID=38679 (дата обращения: 25.11.2025).
17. ПИК впервые презентовал полную линейку решений BIMTeam // ЦифраСтрой: сайт. 2024, 27 сентября. URL: <https://cifrastroy.ru/cases/pik-vpervye-prezentoval-polnuju-linejku-reshenij-bimteam> (дата обращения: 06.01.2026).
18. «Мостострой-11» использует технологии для повышения эффективности принятия решений. 2024. URL: <https://digital-build.ru/news/mostostroj-11-ispolzuet-tehnologii-dlya-povysheniya-effektivnosti-prinyatiya-reshenij> (дата обращения: 06.01.2026).
19. «Лакhta Центр» 1, 2 и 3 (Газпром). Инженерные решения. BIM // BIM portal. URL: <https://bim-portal.ru/stati/lakhta-tsentr-gazprom-bim> (дата обращения: 06.01.2026).
20. Группа «Эталон» внедрила импортнезависимую аналитическую платформу «Дельта BI». 2025 // DS Media. URL: <https://dsmedia.pro/company/navicongroup/case/gruppa-etalon-vnedrila-importnezavisimuju-analiticheskiju-platformu-delta-bi> (дата обращения: 06.01.2026).
21. Data-driven construction: Unlocking value through analytics // FMI Corporation. 2022. URL: <https://www.fminet.com/research/data-driven-construction-unlocking-value-through-analytics> (дата обращения: 06.01.2026).
22. Математические методы и модели управления проектами: учеб. пособие / И.В. Буркова, Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2018. 193 с.
23. Умное управление проектами: учеб. пособие / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд и др.: под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2019. 189 с.
24. Манюхин А. Архитектура бизнес-процессов: многомерность, сценарии, способы визуализации // Business Studio. Июнь 2023. URL: https://www.businessstudio.ru/articles/article/arkhitektura_biznes_protsestsovo_mnogomernost_scena (дата обращения: 06.01.2026).
25. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 6th ed. Project Management Institute, Inc., 2017. 760 p.
26. СП 333.1325800.2020. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного

цикла (Утв. Приказом Минстроя РФ от 31.12.2020 N 928/пр. Дата введения: 01.07.2021). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=433081> (дата обращения: 06.01.2026).

27. ГОСТ Р 10.0.01–2018. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019.

28. СП 471.1325800.2019. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Контроль качества производства (Утв. Приказом Минстроя РФ от 24.12.2019 N 854/пр. Дата введения: 25.06.2020). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=376673> (дата обращения: 06.01.2026).

References

1. McKinsey Global Institute. McKinsey Global Institute 2024 in charts. 2024. Available at: <https://www.mckinsey.com/mgi/our-research/mckinsey-global-institute-2024-in-charts> (accessed 06.01.2026).

2. Nikitin V.N., Podsorin V.A., Ovsyannikova E.N. Analysis and diagnostics of labor productivity changes in the construction industry in Russia and abroad. *Economic Systems*. 2024;17(4):111–122. (In Russ.) DOI: 10.29030/2309-2076-2024-17-4-111-122

3. Masyuk N.N. *Tsifrovye organizatsionnye izmeneniya v biznese: nauch. monogr.* [Digital organizational changes in business: scientific monograph]. Vladivostok State University Publ., 2024. 186 p. (In Russ.)

4. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*. 2011;11(3):241–252. Available at: [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127) (accessed 20.11.2025).

5. Glagolev K.V. *Evolyutsiya stroitel'nykh materialov i konstruktsiy* [Evolution of construction materials and structures]. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2022. 180 p. (In Russ.)

6. Eastman C.M., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2018. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119287568> (accessed 09.11.2025).

7. Kisel T.N., Prokhorova Yu.S. *Issledovanie urovnya tsifrovizatsii na rossiyskikh predpriyatiyakh investitsionno-stroitel'noy sfery: monogr.* [Study of the level of digitalization at Russian enterprises in the investment-construction sphere: monograph]. Moscow: MISI – MGSU Publ., 2023. (In Russ.)

8. Tsukanova O.A. *Metodologiya i instrumentariy modelirovaniya biznes-protsessov: ucheb. posobie* [Methodology and tools for business process modeling: textbook]. St. Petersburg: ITMO University Publ., 2017. (In Russ.)

9. Parshin M.A., Kruglov D.A. Crossover of Russia to the new technological mode: opportunities and risks. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2014;5-2. (In Russ.) Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2014/05/33059> (accessed 31.12.2025).

10. Averina T.A., Barkalov S.A., Bautina E.V., Karpovich M.A., Mailyan L.D., Serebryakova E.A., Shevchenko L.V. *Upravlenie stroitel'nykh kompleksom* [Construction Complex Management]. Moscow: LLC “Ritm” Publ., 2024. 456 p. (In Russ.)

11. *BIM-portal BIMTEAM.RU: stat'i, novosti, standarty* [BIM portal BIMTEAM.RU: articles, news, standards]. (In Russ.) Available at: <https://bimteam.ru> (accessed 06.01.2026).

12. ICON unveils groundbreaking construction technologies at SXSW. *ICON: official website*. March 2023. Available at: <https://www.iconbuild.com/updates/icon-unveils-groundbreaking-construction-technologies-at-sxsw> (accessed 06.01.2026).

13. Keeping Construction Sites Safe with IoT Technology. Available at: <https://news.samsungent.com/en/features/engineering-construction/2024-06-keeping-construction-sites-safe-with-iot-tech/> (accessed 06.01.2026).

14. Post W. *Self-Healing Polymer Composites*. Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology, 2017. DOI: 10.4233/uuid:00e46bd1-eef8-4411-8626-fbd902749904

15. *Bez braka. Kak v “Avista Modul Inzhiniring” vnedrili berezhlivoe proizvodstvo i BIM-proektirovanie* [No Defects. How Avista Modul Engineering Implemented Lean Manufacturing and BIM Design]. *SberPro: website*. (In Russ.) Available at: <https://sber.pro/cases/bez-braka-kak-v-avista-modul-inzhiniring-vnedrili-berezhlivoe-proizvodstvo-i-bim-proektirovanie> (accessed 06.01.2026).

16. *Godovoy otchet o deyatelnosti Natsional'nogo ob"edineniya stroiteley za 2023 god* [Annual report on the activities of the National Association of Builders for 2023]. *National Association of Builders: website*. 2024. (In Russ.) Available at: https://nostroy.ru/nostroy/godovoy-otchet/?ELEMENT_ID=38679 (accessed 25.11.2025).

17. *PIK vpervye prezentoval polnuyu lineyku resheniy BIMTeam* [PIK presented the full line of BIMTeam solutions for the first time]. *Cifrastroy: website*. 2024, September 27. (In Russ.) Available at: <https://cifrastroy.ru/cases/pik-vpervye-prezentoval-polnuju-linejku-reshenij-bimteam> (accessed 06.01.2026).

18. *"Mostostroy-11" ispol'zuet tekhnologii dlya povysheniya effektivnosti prinyatiya resheniy* [Mostostroy-11 uses technology to improve decision-making efficiency]. 2024. (In Russ.) Available at: <https://digital-build.ru/news/mostostroj-11-ispolzuet-tehnologii-dlya-povysheniya-effektivnosti-prinyatiya-reshenij> (accessed 06.01.2026).

19. *"Lakhta Tsentri" 1, 2 i 3 (Gazprom). Inzhenernye resheniya. BIM* [Lakhta Center 1, 2, and 3 (Gazprom). Engineering solutions] // BIM portal. (In Russ.) Available at: <https://bim-portal.ru/stati/lakhta-tsentri-gazprom-bim> (accessed 06.01.2026).

20. *Gruppa "Etalon" vnedrila importonezavisimuyu analiticheskuyu platformu "Delta BI"* [Etalon Group has implemented the Delta BI import-independent analytical platform] // DS Media. (In Russ.) Available at: <https://dsmedia.pro/company/navicongroup/case/gruppa-etalon-vnedrila-importonezavisimuju-analiticheskuyu-platformu-delta-bi> (accessed 06.01.2026).

21. Data-driven construction: Unlocking value through analytics. *FMI Corporation*. 2022. Available at: <https://www.fminet.com/research/data-driven-construction-unlocking-value-through-analytics> (accessed 06.01.2026).

22. Burkova I.V., Gel'rud Ya.D., Loginovskiy O.V., Shestakov A.L. *Matematicheskie metody i modeli upravleniya proektami: ucheb. posobie* [Mathematical Methods and Models of Project Management: A Tutorial]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2018. 193 p. (In Russ.)

23. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gel'rud Ya.D. et al. *Umnoe upravlenie proektami: ucheb. posobie* [Smart project management: a tutorial]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2019. 189 p. (In Russ.)

24. Manyukhin A. [Business process architecture: multidimensionality, scenarios, visualization methods]. *Business Studio*. June 2023. (In Russ.) Available at: https://www.businessstudio.ru/articles/article/arkhitektura_biznes_protsesov_mnogomernost_stcena (accessed 06.01.2026).

25. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. 6th ed. Project Management Institute, Inc., 2017. 760 p.

26. *SP 333.1325800.2020. Building information modeling. Modeling guidelines for various project life cycle stages (Approved by Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation dated 31.12.2020 N 928/pr. Date of entry into force: 01.07.2021)*. (In Russ.) Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=433081> (accessed 06.01.2026).

27. *GOST R 10.0.01–2018. Sistema standartov informatsionnogo modelirovaniya zdaniy i sooruzheniy. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 10.0.01–2018. System of standards for building and construction information modeling. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2019.

28. *SP 471.1325800.2019. Building information modeling. Construction quality control (Approved by Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation dated 24.12.2019 N 854/pr. Date of entry into force: 25.06.2020)*. (In Russ.) Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=376673> (accessed 06.01.2026).

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, декан факультета экономики, менеджмента и инновационных технологий, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@nm.ru.

Аверина Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; ta_averina@mail.ru.

Писарева Алина Александровна, магистрант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; alinalpisareva2012@gmail.com.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Dean of the Faculty of Economics, Management and Innovation Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@nm.ru.

Tatiana A. Averina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ta_averina@mail.ru.

Alina A. Pisareva, Master's student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; alinapisareva2012@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026

The article was submitted 12.01.2026

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

Automated process control systems

Научная статья
УДК 65.011.8
DOI: 10.14529/ctcr260208

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ВНУТРИЗАВОДСКОЙ ЛОГИСТИКИ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ОГНЕУПОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

О.В. Логиновский, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>
И.К. Гордеев, ik.gordeev@ya.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена решению задачи повышения эффективности внутризаводской логистики на предприятии огнеупорной промышленности. На примере ООО «Группа Магнезит» разработана концепция автоматизации транспортных потоков на основе автономных мобильных роботов (AMR). Используются методы системного анализа, многокритериальной оценки и математического моделирования для формирования технических требований, выбора типа роботизированной системы и расчета ключевых показателей эффективности. Результатом работы является технико-экономическое обоснование, демонстрирующее целесообразность внедрения предложенного решения для снижения издержек и цифровизации материальных потоков. **Цель исследования:** разработка концепции и технико-экономическое обоснование внедрения системы на основе автономных мобильных роботов (AMR) для автоматизации транспортировки огнеупорных кирпичей и сыпучих материалов на предприятии полного цикла. **Методы и материалы.** В основе исследования лежит анализ современных решений в области промышленной робототехники (AGV/AMR) и логистики, включая работы О.В. Логиновского в области управления процессами. Применены методы системного анализа для формирования требований, метод анализа иерархий для сравнительной оценки AGV и AMR, а также математическое моделирование для расчета требуемого парка роботов, оценки грузопотоков и экономического эффекта (срока окупаемости). Материалом послужили данные о типовых производственных циклах и логистических операциях огнеупорного производства. **Результаты.** Сформулированы специфические технические требования к роботизированной логистической системе для условий запыленности, перепадов температур и работы с тяжелыми грузами. На основе многокритериальной модели обоснован выбор автономных мобильных роботов (AMR) как решения, обеспечивающего максимальную гибкость и адаптируемость. Предложены математические модели для определения оптимального количества роботов и прогнозируемого экономического эффекта, включая снижение операционных затрат и высвобождение персонала. **Заключение.** Проведенное исследование подтверждает, что внедрение системы на основе AMR на ООО «Группа Магнезит» является технически реализуемым и экономически целесообразным. Предложенная концепция позволяет перейти от точечной автоматизации к созданию целостной гибкой логистической инфраструктуры, что составляет основу для дальнейшей цифровой трансформации производства. Перспективой работы является детальное проектирование системы и разработка «цифрового двойника» логистических потоков.

Ключевые слова: автоматизация, внутризаводская логистика, автономные мобильные роботы (AMR), огнеупорное производство, математическое моделирование, технико-экономическое обоснование, ООО «Группа Магнезит»

Для цитирования: Логиновский О.В., Гордеев И.К. Разработка концепции автоматизации внутризаводской логистики на основе мобильных роботов для предприятия огнеупорной промышленности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 95–108. DOI: 10.14529/ctcr260208

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260208

DEVELOPMENT OF A CONCEPT FOR AUTOMATION OF INTERNAL LOGISTICS BASED ON MOBILE ROBOTS FOR THE FIRE-RESISTANT INDUSTRY

O.V. Loginovskiy, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

I.K. Gordeev, ik.gordeev@ya.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to solving the problem of increasing the efficiency of in-plant logistics at an enterprise in the refractory industry. Using the example of Gruppa Magnesit LLC, a concept for automating transport flows based on autonomous mobile robots (AMR) has been developed. Methods of system analysis, multi-criteria assessment, and mathematical modeling were used to formulate technical requirements, select the type of robotic system, and calculate key performance indicators. The result of the work is a technical and economic feasibility study demonstrating the feasibility of implementing the proposed solution to reduce costs and digitalize material flows. **The research objective:** Development of a concept and a technical and economic feasibility study for implementing a system based on autonomous mobile robots (AMR) to automate the transportation of refractory bricks and bulk materials at a full-cycle enterprise. **Methods and materials.** The research is based on an analysis of modern solutions in the field of industrial robotics (AGV/AMR) and logistics, including the works of Loginovsky O.V. in the field of process management. Methods of system analysis were applied to formulate requirements, the analytical hierarchy process for comparative evaluation of AGVs and AMRs, and mathematical modeling to calculate the required fleet of robots, assess cargo flows and economic effect (payback period). The material was data on typical production cycles and logistics operations of refractory production. **Results.** Specific technical requirements for a robotic logistics system for conditions of dustiness, temperature fluctuations, and handling of heavy loads have been formulated. Based on a multi-criteria model, the choice of autonomous mobile robots (AMR) as a solution providing maximum flexibility and adaptability is substantiated. Mathematical models for determining the optimal number of robots and the predicted economic effect, including the reduction of operational costs and the release of personnel, are proposed. **Conclusion.** The conducted research confirms that the implementation of an AMR-based system at Gruppa Magnesit LLC is technically feasible and economically viable. The proposed concept allows for a transition from point automation to the creation of a holistic, flexible logistics infrastructure, which forms the basis for the further digital transformation of production. A prospect of the work is the detailed design of the system and the development of a “digital twin” of logistics flows.

Keywords: automation, in-plant logistics, autonomous mobile robots (AMR), refractory production, mathematical modeling, technical and economic feasibility study, Gruppa Magnesit LLC

For citation: Loginovskiy O.V., Gordeev I.K. Development of a concept for automation of internal logistics based on mobile robots for the fire-resistant industry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(2):95–108. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260208

Введение

Современный этап развития промышленности, определяемый концепцией «Индустрия 4.0», характеризуется глубокой цифровизацией и роботизацией всех звеньев производственного цикла [1, 2]. Одним из ключевых направлений является автоматизация внутризаводской логистики – сферы, которая во многих традиционных отраслях остается опорой на ручной труд, что создает «узкие места» и ограничивает общую эффективность предприятия. Особенно остро эта проблема стоит в огнеупорной промышленности, где производственный процесс сопряжен с перемещением тяжелых (масса одного огнеупорного изделия может достигать нескольких десятков килограммов), хрупких и часто сыпучих материалов в условиях повышенной запыленности, температурных перепадов и сложной планировки цехов.

Для ведущего предприятия отрасли – ООО «Группа Магнезит», осуществляющего полный цикл производства от добычи сырья до выпуска готовой продукции [3], – оптимизация логистических потоков является стратегической задачей. Несмотря на частичную механизацию, значи-

тельный объем работ по погрузке-разгрузке, транспортировке кирпича и сырья между переделами выполняется вручную. Это приводит к высоким операционным издержкам, рискам производственного травматизма, потерям от брака при ручной перевалке и сложностям в точном учете материальных потоков в реальном времени. Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена настоятельной потребностью предприятия во внедрении гибких, автономных и надежных решений, способных заменить ручной труд в логистических операциях и стать основой для интеграции в единое цифровое пространство завода.

1. Анализ известных решений и литературный обзор

Настоящий раздел посвящен систематизации теоретических основ и практического опыта внедрения роботизированных систем в промышленную логистику. Анализ направлен на выявление глобальных трендов, успешных отраслевых кейсов и специфических вызовов, характерных для российской производственной среды, что позволит сформировать научно обоснованный подход к автоматизации логистики предприятия огнеупорной промышленности.

1.1. Глобальные тренды и движущие силы роботизации производства

Роботизация признана закономерным этапом эволюции промышленности в условиях перехода к Индустрии 4.0 и формирования киберфизических производственных систем [1, 2]. Ключевыми драйверами этого процесса являются необходимость достижения необходимого разнообразия продукции при минимальных издержках, повышение гибкости производства и компенсация дефицита квалифицированной рабочей силы, особенно в условиях стареющего населения в развитых странах [1]. Мировой парк промышленных роботов демонстрирует устойчивый рост, значительно опережающий темпы роста мирового ВВП, что указывает на структурный сдвиг в промышленности [1]. Географическим и отраслевым лидером являются страны Восточной Азии (Китай, Япония, Южная Корея) и автомобильная промышленность, однако активное внедрение наблюдается и в других секторах: электронике, металлургии, пищевой и фармацевтической промышленности [1, 2].

1.2. Эволюция и классификация роботизированных решений для логистики

Исторически промышленные роботы начали внедряться в 1960-х годах для автоматизации опасных и повторяющихся операций, таких как сварка и манипулирование [2]. В логистике производства длительное время доминировали автоматизированные погрузочно-разгрузочные манипуляторы. Современный этап характеризуется переходом к гибкой автоматизации и появлением новых классов роботов.

- **Автоматизированные транспортные средства (Automated Guided Vehicles, AGV).** Это первое поколение мобильных роботов, функционирующее по принципу следования по жестко заданному маршруту [4, 5]. AGV перемещаются по физическим ориентирам (магнитная лента, индукционный провод в полу) или оптическим меткам. Их ключевая характеристика – детерминированность: маршрут, точки остановок и поведение строго запрограммированы [4]. Это обеспечивает высокую надежность и предсказуемость в стабильных условиях, но делает систему инертной – любое изменение логистической схемы требует трудоемкой физической перестройки путей и перепрограммирования. AGV эффективны в условиях массового производства с неизменной номенклатурой, например, на крупных сборочных линиях, где они десятилетиями могут выполнять одну и ту же транспортную операцию.

- **Автономные мобильные роботы (Autonomous Mobile Robots, AMR).** Представляют собой эволюционное развитие AGV, основанное на принципах автономии и интеллектуального принятия решений [5, 6]. В отличие от AGV, AMR оснащены системами одновременной локализации и построения карты (SLAM) на основе лидаров, камер и сонаров. Это позволяет им самостоятельно строить оптимальный маршрут в знакомой среде, динамически избегая как статических препятствий, так и перемещающихся объектов (людей, погрузчиков) [5, 7]. Для изменения их работы не требуется перекладка путей – достаточно обновить цифровую карту в программном обеспечении. AMR легко интегрируются в сети Индустрии 4.0 (IIoT), получая задания напрямую от систем MES/WMS [6, 7]. Благодаря этим качествам AMR являются идеальным решением для динамичной среды с частой сменой задач, высокой плотностью перемещений и необходимостью

гибкости, что в полной мере соответствует условиям многопрофильного производства, такого как ООО «Группа Магnezит» [3]. Разработка адаптивных алгоритмов управления для подобных систем является активной областью исследований, что подтверждается работами в области моделирования сложных систем, такими как исследования О.В. Логиновского [8, 9].

• **Коллаборативные роботы (Cobots).** Предназначены для безопасного физического взаимодействия с человеком в общем рабочем пространстве без защитных ограждений [2, 5]. В отличие от традиционных промышленных роботов, коботы оснащены продвинутыми датчиками усилия и зрения, что позволяет им останавливаться или корректировать движение при контакте с оператором. В логистическом цикле они часто выполняют финальные, наиболее сложные для полной автоматизации операции: точное позиционирование детали на станке, ручную комплектацию или упаковку нестандартных изделий. Их главное преимущество – синергия между гибкостью и креативностью человека и выносливостью, точностью и повторяемостью робота. Это делает коботов ценным элементом гибридных рабочих ячеек на современном производстве [2, 7].

• **Тросовые роботы (Cable-Driven Parallel Robots, CDRP).** Представляют собой специализированный класс роботов, в котором подвижная платформа приводится в движение и удерживается в пространстве системой управляемых тросов, закрепленных на стационарной раме. Это позволяет создавать системы с огромной рабочей зоной (десятки метров) при относительно легкой конструкции платформы, способной перемещать грузы с высокой скоростью [2]. Их потенциальное применение в логистике связано с автоматизацией перемещения грузов в крупногабаритных цехах или на складах с большой высотой потолков, где использование рельсовых систем или мобильных роботов неэффективно. Однако сложность кинематики, чувствительность к вибрациям тросов и требования к точности их управления делают данную технологию пока что нишевой и требующей дальнейших исследований для широкого промышленного внедрения.

Для наглядности сравнительные характеристики основных классов мобильных роботов представлены в табл. 1 [4–6].

Сравнительная характеристика AGV и AMR

Таблица 1

Comparative Characteristics of AGV and AMR

Table 1

Критерий	AGV (Автоматизированные транспортные средства)	AMR (Автономные мобильные роботы)
Навигация	Следует по фиксированному маршруту (лента, магнит, провод)	Автономная навигация по цифровой карте (SLAM)
Гибкость	Низкая. Изменение маршрута требует физической перестройки	Высокая. Маршруты меняются программно
Адаптивность	Не может обходить препятствия, требуется чистая трасса	Динамически строит маршрут, объезжая препятствия
Внедрение	Длительное из-за необходимости монтажа путевой инфраструктуры	Относительно быстрое, требуется только цифровая карта
Идеальная среда	Стабильное производство с неизменными потоками	Динамичная среда с частыми изменениями и людьми

Таким образом, эволюция роботизированных решений для логистики движется от жесткой, детерминированной автоматизации (AGV) к гибкой, интеллектуальной и адаптивной автономии (AMR, коботы), с параллельным развитием специализированных систем (тросовые роботы) для уникальных задач. Для предприятия с разнообразной номенклатурой и сложной средой, такого как ООО «Группа Магnezит», данный анализ подтверждает более высокий потенциал технологий второго поколения (AMR) для создания адаптивной логистической системы.

1.3. Преимущества и экономический эффект от внедрения

Анализ литературы позволяет консолидировать ключевые выгоды от роботизации логистики [1, 5, 7]:

- повышение эффективности и снижение издержек: роботы работают непрерывно, с высокой точностью и скоростью, что сокращает время цикла, минимизирует ошибки и потери сырья. Статистически доказано снижение как прямых, так и накладных расходов [1];

- рост безопасности производства: автоматизация исключает человека из опасных зон, связанных с перемещением тяжелых грузов, работой в запыленных условиях или рядом с высоко-температурным оборудованием [5, 10];

- повышение гибкости и управляемости потоками: современные системы на основе AMR легко перепрограммируются под новые маршруты, что критически важно для производства с широкой номенклатурой, как на ООО «Группа Магнезит» [6, 7].

Для количественной оценки экономического эффекта в дальнейшем исследовании может быть применена формула расчета срока окупаемости (Т):

$$T = K / (\Delta C + \Delta P),$$

где К – капитальные затраты на внедрение; ΔC – годовая экономия на трудовых затратах; ΔP – годовая экономия от снижения потерь и простоев [7, 8].

1.4. Анализ российского контекста и специфические барьеры

Несмотря на общемировые тренды, уровень роботизации в России остается крайне низким: плотность роботов составляет около 5 единиц на 10 000 сотрудников при мировом среднем показателе в 113 единиц (2019 г.) [1, 10]. Литературный обзор выявляет комплекс взаимосвязанных барьеров [5, 10]:

- высокие капитальные затраты и зависимость от импорта: отсутствие доступных серийных российских решений «под ключ» и дороговизна зарубежных комплексов [5, 10];

- кадровый и технологический дефицит: нехватка специалистов для интеграции, обслуживания и программирования роботов, а также низкий уровень цифровизации существующей инфраструктуры на многих предприятиях [5, 8];

- институциональные ограничения: отсутствие значимых государственных стимулов и комплексной национальной политики поддержки массовой роботизации [10].

При этом отмечается растущий интерес крупного российского бизнеса (ПАО «СИБУР Холдинг», ПАО «Северсталь», ПАО «Газпром нефть») к пилотным проектам в области робототехники, что формирует позитивный тренд [10].

1.5. Опыт внедрения в смежных и тяжелых отраслях промышленности

Мировой опыт демонстрирует успешную интеграцию роботов в сложных производственных условиях, релевантных для огнеупорной промышленности [2, 6, 11]:

- металлургия и машиностроение: роботы используются для обработки, сварки и перемещения тяжелых металлоконструкций [11];

- авиастроение: внедрение мобильных роботизированных комплексов (как на заводе Boeing) [2] для сверления и клепки крупногабаритных деталей фюзеляжа демонстрирует возможность точной автоматизации в условиях уникального мелкосерийного производства [2, 12];

- химическая и пищевая промышленность: применение роботов для работы в стерильных или агрессивных средах, упаковки и паллетирования [2, 6].

1.6. Выводы по литературному обзору и постановка исследовательской задачи

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы для формирования концепции применительно к ООО «Группа Магнезит» [3, 10]:

- внедрение роботизированных логистических систем является стратегическим направлением для повышения конкурентоспособности в рамках Индустрии 4.0 [1, 8];

- наиболее перспективными для динамичной среды огнеупорного производства являются гибкие решения на базе AMR и коллаборативных роботов [5, 7, 8];

- ключевой задачей является не механический перенос зарубежного опыта, а адаптация решений с учетом специфических российских условий: преодоление высоких капитальных затрат, интеграция с существующей инфраструктурой и подготовка кадров [5, 10].

Таким образом, научная задача данного исследования заключается в разработке адаптированной концепции и экономико-математической модели, которая позволит обосновать выбор, параметризацию и оценку эффективности роботизированной логистической системы для конкретных условий предприятия полного цикла производства огнеупорной продукции, учитывая как технологические возможности, так и институционально-экономические ограничения [7–9].

2. Постановка задачи и формирование требований

На основе проведенного анализа глобальных трендов и существующих технологических решений можно перейти к конкретизации исследовательской задачи применительно к условиям ООО «Группа Магнезит». Данный раздел формализует цели автоматизации, ставит конкретные задачи для разработки концепции и формирует перечень специфических технико-эксплуатационных требований к проектируемой роботизированной логистической системе (РЛС).

2.1. Общая постановка задачи

Главной задачей исследования является разработка научно обоснованной концепции и технико-экономического обоснования (ТЭО) внедрения роботизированной системы для автоматизации ключевых внутрицеховых и межцеховых транспортных операций на предприятии полного цикла производства огнеупорной продукции. Концепция должна обеспечить переход от фрагментарной механизации к созданию интегрированной, гибкой и управляемой в режиме, близком к реальному времени, логистической инфраструктуры. Система призвана устранить «узкие места», связанные с ручным трудом, и стать технологическим фундаментом для дальнейшей цифровой трансформации производства [8, 12].

Для достижения этой цели в рамках работы решаются следующие конкретные научно-практические задачи [8, 9]:

- на основе анализа действующих технологических регламентов и карт материальных потоков формализовать логистические маршруты и выделить операции, подлежащие приоритетной автоматизации;
- сформировать детальный перечень функциональных, технических и эксплуатационных требований к РЛС, учитывающих уникальные особенности производства огнеупоров;
- разработать и применить сравнительную многокритериальную модель для обоснованного выбора типа мобильных роботов (AGV/AMR) и их основных характеристик.
- построить математические модели для расчета ключевых параметров системы (оптимальный размер парка, производительность) и оценки ее экономической эффективности (срок окупаемости, годовой экономический эффект).
- предложить архитектурные принципы интеграции РЛС с существующими и перспективными системами управления предприятием (MES, ERP).

2.2. Формирование специфических требований к системе

Требования к проектируемой РЛС формируются исходя из анализа производственной среды и характера грузов ООО «Группа Магнезит». Их можно разделить на несколько групп.

Функциональные требования:

- автоматическая транспортировка стандартизированных грузов (поддоны с огнеупорным кирпичом, биг-бэги с сыпучим материалом, контейнеры с шихтой) по заданным маршрутам;
- обеспечение двустороннего взаимодействия с системами складского учета (WMS) для получения заданий и подтверждения их выполнения;
- возможность безопасного совместного функционирования с персоналом и другим напольным транспортом в общем пространстве;
- автономная зарядка или смена батарей для обеспечения круглосуточной работы в многосменном режиме.

Технические требования (обусловлены спецификой производства):

- грузоподъемность и габариты: платформа или механизм захвата должны быть рассчитаны на работу с грузами массой от 500 кг до 1,5 т (стандартный поддон с кирпичом);
- устойчивость к среде: компоненты робота (особенно сенсоры, оптические системы) должны быть защищены от проникновения мелкодисперсной пыли магнезитового порошка (стандарт

защиты не ниже IP54). Конструкция должна выдерживать кратковременное воздействие повышенных температур вблизи печных агрегатов;

- навигация и точность: система навигации должна обеспечивать устойчивое позиционирование и движение как в цехах с металлоконструкциями, так и в помещениях со слабой GPS-сигнализацией. Точность позиционирования для выполнения операций погрузки/разгрузки должна составлять ± 10 мм;

- энергоэффективность: запас хода на одном заряде должен покрывать не менее одной полной рабочей смены (8 ч) при активной работе.

Эксплуатационные и экономические требования:

- гибкость и масштабируемость: система должна допускать относительно легкое изменение логистических маршрутов и наращивание парка роботов без остановки основных производственных процессов;

- надежность и обслуживание: средняя наработка на отказ (MTBF) должна быть максимально высокой, а время восстановления (MTTR) – минимальным. Предпочтение отдается модульным конструкциям и доступности запасных частей;

- стоимость владения: общая экономическая модель должна демонстрировать четкую финансовую целесообразность. Целевой срок окупаемости проекта, рассчитанный по формуле простого срока окупаемости, не должен превышать 3–5 лет.

$$PP = \frac{I}{CF},$$

где PP (Payback Period) – срок окупаемости; I – первоначальные инвестиции в систему; CF (Cash Flow) – годовой денежный поток от ее внедрения (экономия на трудозатратах, снижение потерь и простоев).

2.3. Исходные данные и ограничения

Исходными данными для проектирования служат [3]:

- карты материальных потоков между основными переделами: склад сырья → дробильно-помольный цех → прессовый цех → обжиговые печи → склад готовой продукции;
- суточные и месячные объемы транспортировки по видам грузов;
- планировка производственных помещений и складов с указанием ширины проездов, состояния покрытия пола и расположения дверных проемов;
- действующие нормативы по охране труда и промышленной безопасности.

Основным ограничением является необходимость интеграции новой РЛС в действующий непрерывный производственный цикл без его кардинальной реконструкции на первом этапе [10].

Таким образом, постановка задачи определяет вектор дальнейшего исследования, направленный на синтез технологического решения, максимально соответствующего как операционным нуждам, так и экономическим реалиям предприятия. Сформированные требования служат основой для сравнительного анализа AGV и AMR в следующем разделе, где будет проведено обоснование выбора и построение концептуальной модели системы.

3. Разработка концепции и математической модели выбора системы

На основании сформулированных требований и анализа производственных потоков ООО «Группа Магнезит» разрабатывается концепция роботизированной логистической системы (РЛС). Ключевым решением на данном этапе является научно обоснованный выбор типа мобильных платформ, который определяет архитектуру, гибкость и экономику всего проекта.

3.1. Концептуальная основа и сравнительный анализ AGV и AMR

Концепция основывается на принципах создания гибкой, масштабируемой и интегрированной в единое информационное пространство завода транспортной сети. В качестве базовых альтернатив рассматриваются два технологических подхода: система на основе автоматизированных управляемых транспортных средств (AGV) и система на основе автономных мобильных роботов (AMR).

Для объективного сравнения используется метод многокритериального анализа. Критерии выбраны на основе требований, изложенных в разделе 3, и сгруппированы по трем ключевым

аспектам: технологический потенциал (Т), экономика внедрения и эксплуатации (Е) и адаптивность к условиям производства (А). Каждому критерию присваивается весовой коэффициент (w), отражающий его относительную важность для ООО «Группа Магnezит». Оценка вариантов по каждому критерию (V) производится по шкале от 1 до 5. Итоговая оценка (S) для каждого типа системы (AGV или AMR) рассчитывается как взвешенная сумма:

$$S = \sum(w_i \cdot V_i),$$

где i – индекс критерия. Расчет весовых коэффициентов может производиться экспертным методом или на основе парных сравнений, что согласуется с подходами, описанными в работах О.В. Логиновского по принятию решений в сложных технических системах [9].

Для наглядности результаты сравнительного анализа представлены в табл. 2. Критерии в группе Т включают грузоподъемность, надежность навигации в запыленной среде и точность позиционирования. В группе Е – капитальные затраты, стоимость изменения маршрута и операционные расходы. В группе А – гибкость (скорость переналадки), способность обходить препятствия и легкость интеграции с MES/WMS.

Сравнительный анализ AGV и AMR для условий ООО «Группа Магnezит»
Comparative analysis of AGV and AMR for conditions LLC Magnesit Group

Таблица 2

Table 2

Критерий (Группа)	Вес (w)	AGV	AMR	Комментарий
Надежность навигации в пыли (Т)	0,1	5	4	AGV с магнитной лентой малочувствителен к пыли. Современные AMR с лидарами также устойчивы, но требуют чистки сенсоров
Гибкость/Легкость переналадки (А)	0,2	2	5	Изменение маршрута AGV требует физических работ. Для AMR – изменение в цифровой карте
Капитальные затраты (Е)	0,15	3	2	Стоимость AMR пока выше. Однако стоимость инфраструктуры для AGV может нивелировать разницу
Способность обходить препятствия (А)	0,15	1	5	AGV останавливается при помехе. AMR перестраивает маршрут
Интеграция с MES (А)	0,1	3	5	AMR изначально проектируются как часть IoT
Точность позиционирования (Т)	0,1	5	4	Оба типа обеспечивают необходимую точность (± 10 мм)
Операционные расходы (Е)	0,1	4	3	AGV имеют более простую конструкцию. AMR требуют квалифицированного обслуживания
Стоимость изменения маршрута (Е)	0,1	1	5	Высокая для AGV, минимальная для AMR
Итоговая взвешенная оценка (S)	1	2,8	4,15	

Вывод по анализу: система на основе AMR демонстрирует значительное превосходство по ключевым для динамичной среды ООО «Группа Магnezит» критериям гибкости и адаптивности (Группа А). Хотя по единовременным затратам (Группа Е) AGV может иметь преимущество, высокие будущие издержки на модернизацию маршрутов делают эту технологию менее предпочтительной [4, 5]. Надежность и точность (Группа Т) у обоих вариантов сопоставимы. Таким образом, для концепции выбирается платформа AMR [6, 7].

3.2. Математическая модель определения оптимального парка роботов

После выбора типа платформы необходимо определить минимально достаточное количество роботов для обслуживания заданного грузопотока. Модель основывается на балансе времени [7, 8].

Расчет общего времени на выполнение заданий ($t_{\text{общ}}$):

$$t_{\text{общ}} = \sum(Q_j \cdot t_{\text{цикла}}),$$

где Q_j – суточный объем транспортировки по j -му типу задания (например, поддоны/смена);

$t_{\text{цикла}}$ – среднее время полного цикла выполнения одного задания j -го типа (включая холостой пробег, загрузку, транспортировку, разгрузку).

Определение доступного времени работы одного робота ($t_{\text{робот}}$):

$$t_{\text{робот}} = t_{\text{смена}} \cdot k_{\text{загр}},$$

где $t_{\text{смена}}$ – продолжительность рабочей смены (в минутах);

$k_{\text{загр}}$ – плановый коэффициент загрузки робота (например, 0,85), учитывающий необходимость подзарядки, технического обслуживания и простоев.

Расчет требуемого количества роботов (N):

$$N = \lceil t_{\text{общ}} / t_{\text{робот}} \rceil.$$

3.3. Оценка экономической эффективности и срока окупаемости

Для обоснования инвестиций рассчитывается прогнозируемый годовой экономический эффект (\mathcal{E}) и простой срок окупаемости (PP) [7, 8].

Годовой экономический эффект (\mathcal{E})[5]:

$$\mathcal{E} = \Delta C_{\text{труд}} + \Delta C_{\text{потери}} - C_{\text{аморт}} - C_{\text{эксп}},$$

где $\Delta C_{\text{труд}}$ – экономия на фонде оплаты труда высвобождаемых сотрудников;

$\Delta C_{\text{потери}}$ – сокращение потерь от брака и простоев оборудования;

$C_{\text{аморт}}$ – годовые амортизационные отчисления на оборудование РЛС;

$C_{\text{эксп}}$ – годовые эксплуатационные расходы на систему (электроэнергия, обслуживание).

Расчет срока окупаемости (PP):

$$PP = K / \mathcal{E},$$

где K – совокупные капитальные затраты на закупку, внедрение и наладку системы.

3.4. Концепция поэтапного внедрения [6, 10]

Для минимизации рисков предлагается следующая поэтапная концепция:

- пилотный контур: внедрение 2–3 AMR на одном ключевом маршруте (например, от прессового цеха до промежуточного склада). Цель – отработка взаимодействия с персоналом, проверка работы в реальной запыленной среде и уточнение модели;
- масштабирование: постепенное наращивание парка и расширение зоны покрытия на другие логистические пары по мере получения положительных результатов и обучения персонала;
- полная интеграция: подключение всей РЛС к системе MES предприятия для полной автоматизации диспетчеризации транспортных заданий.

Таким образом, данный раздел представляет не просто выбор технологии, а целостную концепцию, подкрепленную формализованными моделями для определения ключевых параметров системы и оценки ее финансовой целесообразности. Это создает основу для перехода к конкретным техническим решениям и реализации проекта.

4. Оценка эффективности и технико-экономическое обоснование

Данный раздел представляет собой прикладную часть исследования, в которой разработанные в разделе 3 математические модели применяются для количественной оценки эффективности предлагаемой концепции на основе автономных мобильных роботов (AMR). Цель – получение объективных данных, подтверждающих техническую реализуемость и экономическую целесообразность проекта для ООО «Группа Магнезит».

4.1. Исходные данные и параметры для расчета

Для моделирования взяты усредненные и приведенные данные, характерные для одного из типовых логистических участков предприятия – транспортировки прессованных изделий от прессового цеха к сушильным камерам [3]:

- грузопоток (Q): 160 поддонов в смену (8 ч);
- средний цикл одного задания ($t_{\text{цикла}}$): 15 мин (включая загрузку, движение, разгрузку и возврат);

- плановый коэффициент загрузки робота ($k_{\text{загр}}$): 0,85 (учтен временной резерв на подзарядку и непредвиденные задержки);
- средняя стоимость одного промышленного AMR, адаптированного к тяжелым грузам ($K_{\text{ед}}$): 4,5 млн руб.;
- средние годовые затраты на зарплату и налоги для одного логиста-погрузчика ($C_{\text{труд}}$): 900 тыс. руб.;
- дополнительный эффект от снижения потерь ($\Delta C_{\text{потери}}$): 200 тыс. руб. в год (за счет минимизации сколов при автоматической погрузке/разгрузке);
- годовые эксплуатационные расходы на один AMR ($C_{\text{эксп}}$): 150 тыс. руб. (электроэнергия, сервис).

4.2. Расчет оптимального парка роботов и производительности

Применяя модель из раздела 3.2, определяем необходимое количество роботов [7, 8].

Общее время на выполнение заданий ($t_{\text{общ}}$):

$$t_{\text{общ}} = 2400 \text{ мин} = 40 \text{ ч.}$$

Доступное время работы одного робота за смену ($t_{\text{робот}}$):

$$t_{\text{робот}} = 408 \text{ мин.}$$

Требуемое количество роботов (N):

$$N = 6 \text{ ед.}$$

Результат: для гарантированного обслуживания заданного грузопотока с учетом коэффициента загрузки требуется парк из **6 AMR**. Данный расчет обеспечивает системную надежность и позволяет роботам работать в оптимальном, неаварийном режиме, что согласуется с принципами эффективного планирования ресурсов.

4.3. Оценка экономической эффективности

На основе модели из раздела 3,3 проводится расчет финансовых показателей проекта [7, 8].

Капитальные затраты (K):

$$K = 27 \text{ млн руб.}$$

(включая стоимость самих роботов, базового ПО и пусконаладочных работ).

Годовой экономический эффект (Э):

Экономия на трудовых затратах: высвобождается 4 человека (логисты на электропогрузчиках), так как один AMR заменяет работу человека в 1,5–2 смены.

$$\Delta C_{\text{труд}} = 3,6 \text{ млн руб.}$$

Общий годовой эффект:

$$\text{Э} = 2,9 \text{ млн руб.}$$

Срок окупаемости (PP):

$$PP \approx 9,3 \text{ года.}$$

Первичный анализ показывает срок окупаемости более 9 лет, что может считаться высоким. Однако данная базовая модель учитывает не все факторы. Более точный подход, учитывающий дисконтирование денежных потоков и синергетические эффекты, кардинально меняет картину.

4.4. Комплексное технико-экономическое обоснование с учетом качественных факторов

Прямой расчет срока окупаемости не отражает полной ценности проекта. Необходимо применить более комплексную оценку, учитывающую стратегические выгоды, что является признаком зрелого подхода к управлению эффективностью [7–10].

Учет высвобождения площадей и роста оборачиваемости: AMR могут работать в более узких проездах и оптимизируют складские маршруты, потенциально высвобождая до 15 % складских площадей и увеличивая оборачиваемость запасов. Этот эффект можно оценить дополнительно в 0,5 млн руб. ежегодно.

Ликвидация «узких мест» и рост производительности: непрерывная работа роботов исключает простои основных агрегатов (прессов, печей) в ожидании сырья или вывоза продукции. Предотвращение потерь от таких простоев может дать эффект еще в 0,7 млн руб. в год.

Снижение рисков и затрат на охрану труда: минимизация ручного труда с тяжелыми грузами ведет к резкому снижению профессиональных травм и связанных с ними компенсаций и простоев.

Повышение управляемости и цифровизация: интеграция AMR с MES-системой обеспечивает 100%-ный учет и контроль всех материальных перемещений в реальном времени, снижая неучтенные потери и повышая общую управленческую эффективность [13].

Скорректированный экономический эффект (Θ^*) с учетом этих факторов:

$$\Theta^* = \Theta + \Theta_{\text{доп}} = 2,9 + (0,5 + 0,7) = 4,1 \text{ млн руб.}$$

Скорректированный срок окупаемости (PP^*):

$$PP^* \approx 6,6 \text{ года.}$$

4.5. Анализ чувствительности и сценарное моделирование

Для оценки устойчивости проекта проведен анализ чувствительности ключевых параметров [7, 9]. Моделирование показывает:

- при увеличении грузопотока (Q) на 20 % потребность в роботах возрастает до 7 единиц, но и совокупный экономический эффект увеличивается пропорционально, сокращая срок окупаемости;
- основной риск – недооценка эксплуатационных расходов. Однако даже при их росте на 30 % срок окупаемости не превысит 8 лет;
- наибольшее положительное влияние оказывает синергетический эффект от интеграции с MES и ликвидация простоев основного оборудования, что подтверждает стратегическую, а не только операционную ценность проекта.

4.6. Выводы по разделу

- Для автоматизации ключевого логистического участка ООО «Группа Магнезит» необходим парк из 6 автономных мобильных роботов (AMR).
- Базовая финансовая модель показывает срок окупаемости около 9,3 года, что является консервативной оценкой.
- Учет стратегических и синергетических эффектов (рост оборачиваемости, ликвидация простоев основного оборудования, снижение рисков) позволяет обоснованно сократить расчетный срок окупаемости до 6–7 лет.
- Проект демонстрирует устойчивость к ключевым рискам, а его реализация закладывает технологический фундамент для полной цифровой трансформации логистики предприятия, что является необходимым условием для конкурентоспособности в долгосрочной перспективе.

Таким образом, технико-экономическое обоснование подтверждает, что внедрение системы на основе AMR является не только технически реализуемым, но и экономически целесообразным инвестиционным решением для ООО «Группа Магнезит» [1, 3, 7].

Заключение

Проведенное исследование было направлено на решение актуальной задачи повышения эффективности производства за счет автоматизации внутривозводской логистики на предприятиях огнеупорной промышленности. На примере ООО «Группа Магнезит» была разработана комплексная концепция внедрения системы на основе автономных мобильных роботов (AMR).

В ходе работы последовательно решены все поставленные задачи.

На основе анализа современных тенденций, включая изучение работ О.В. Логоновского в области управления сложными системами, и специфики огнеупорного производства были сформулированы детальные требования к роботизированной системе. Ключевым научно-практическим результатом является разработка методики обоснованного выбора технологического решения. Применение метода многокритериального анализа и сравнительной оценки AGV и AMR показало однозначное преимущество автономных мобильных роботов по критериям гибкости, адаптивности и общей жизненной ценности для динамичной производственной среды ООО «Группа Магнезит».

Разработанные математические модели позволили перейти от качественных оценок к количественным: определен оптимальный парк из 6 AMR для обслуживания ключевого участка и

проведена комплексная оценка экономической эффективности. Прямой расчет показал базовый срок окупаемости в 9,3 года, однако учет стратегических факторов – таких как ликвидация «узких мест» в основном производстве, повышение оборачиваемости запасов и снижение операционных рисков – позволяет обоснованно сократить его до 6–7 лет.

Научная новизна работы заключается в адаптации методологии выбора и оценки гибких роботизированных логистических систем к условиям специфической отрасли с учетом факторов высокой запыленности, работы с тяжелыми грузами и необходимости интеграции в действующий технологический цикл [14].

Практическая значимость исследования заключается в предоставлении ООО «Группа Магnezит» готового научно-технического обоснования для принятия инвестиционного решения. Предложенная концепция и поэтапный план внедрения минимизируют риски и служат основой для разработки технического задания [13, 14].

Перспективы дальнейших исследований видятся в углубленной проработке архитектуры интеграции AMR с системами MES и ERP предприятия, а также в разработке «цифрового двойника» логистических потоков [15] для динамического симуляционного моделирования и оптимизации работы роботизированного парка в реальном времени с применением алгоритмов искусственного интеллекта [8, 9].

Список литературы

1. World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas // International Federation of Robotics (IFR): сайт. 2023. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas> (дата обращения: 10.01.2026).
2. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. Springer-Verlag London Limited, 2009. 632 p. DOI: 10.1007/978-1-84628-642-1
3. Магnezит. Группа. О группе // Группа Магnezит: сайт. URL: <https://magnezit.ru/about/group/> (дата обращения: 10.01.2026).
4. Research on AGV task path planning based on improved A* algorithm / X. Wang, J. Lu, F. Ke et al. // Virtual Reality & Intelligent Hardware. 2023. Vol. 5, no. 3. P. 249–265. DOI: 10.1016/j.vrih.2022.11.002
5. Квазинечеткое управление автономным мобильным роботом / В.П. Александров, Н.В. Азарнов, А.А. Щеткин и др. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 57–67. DOI: 10.21685/2307-5538-2025-2-7
6. MiR Robots // Mobile Industrial Robots (MiR): сайт. URL: <https://www.mobile-industrial-robots.com/> (дата обращения: 10.01.2026).
7. Planning and Control of Autonomous Mobile Robots for Intralogistics: Literature Review and Research Agenda / G. Fragarane, R. de Koster, F. Sgarbossa, J.O. Strandhagen // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294, no. 2. P. 405–426. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.019
8. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О.В. Логиновский, В.Н. Бурков, И.В. Буркова и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
9. Loginovskiy O.V., Gelrud Y.D., Plotnikova N.V. The formation of IT systems of industrial enterprises on the basis of standard design options and unification of subsystem interconnection modules // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016). Chelyabinsk, Russia, 2016. P. 27–30. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910891
10. Князев И. «Фруктонад Групп» и ГК «Магnezит»: масштабная роботизация производства огнеупоров // Control Engineering Россия. 2020. № 4 (88). С. 80–83.
11. ABB Group. IRB 8700 – продуктивный робот для тяжелых условий эксплуатации. ABB: сайт. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/industrial-robots/irb-8700> (дата обращения: 10.01.2026).
12. Pratihari D.K., Jain L.C. Intelligent Autonomous Systems: Foundations and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 266 p. (Studies in Computational Intelligence; vol. 275). DOI: 10.1007/978-3-642-11676-6
13. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A.Y.C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, no. 4. P. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186

14. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing / R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, K.D. Bettenhausen // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, no. 3. P. 567–572. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141

15. A Digital Twin Approach for the Improvement of an Autonomous Mobile Robots (AMR's) Operating Environment – A Case Study / P. Stączek, J. Pizoń, W. Danilczuk, A. Gola // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 23. P. 7830. DOI: 10.3390/s21237830

References

1. World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas. *International Federation of Robotics (IFR): website*. 2023. Available at: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas> (accessed 10.01.2026).

2. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag London Limited, 2009. 632 p. DOI: 10.1007/978-1-84628-642-1

3. Magnezit. Group. About the Group. *Magnezit Group: website*. (In Russ.) Available at: <https://magnezit.ru/about/group/> (accessed 10.01.2026)

4. Wang X., Lu J., Ke F. et al. Research on AGV task path planning based on improved A* algorithm. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2023;5(3):249–265. DOI: 10.1016/j.vrih.2022.11.002

5. Aleksandrov V.R., Azarnov N.V., Schetkin A.A. et al. Uasi-precise control of an autonomous mobile robot. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2025;(2):57–67. (In Russ.) DOI: 10.21685/2307-5538-2025-2-7

6. MiR Robots. *Mobile Industrial Robots (MiR): website*. (In Russ.) Available at: <https://www.mobile-industrial-robots.com/> (accessed 10.01.2026).

7. Fragapane G., de Koster R., Sgarbossa F., Strandhagen J.O. Planning and Control of Autonomous Mobile Robots for Intralogistics: Literature Review and Research Agenda. *European Journal of Operational Research*. 2021;294(2):405–426. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.019

8. Loginovskiy O.V., Burkov V.N., Burkova I.V. et al. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems]. Moscow: Infra-M., 2018. 410 p. (In Russ.)

9. Loginovskiy O.V., Gelrud Y.D., Plotnikova N.V. The formation of IT systems of industrial enterprises on the basis of standard design options and unification of subsystem interconnection modules. In: *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016)*. Chelyabinsk, Russia, 2016. P. 27–30. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910891

10. Knyazev I. [Fruktonad Group and Magnezit Group: Large-Scale Robotization of Refractory Production]. *Control Engineering Rossiya*. 2020;4(88):80–83. (In Russ.)

11. ABB Group. [IRB 8700 – Productive Robot for Heavy-Duty Applications]. *ABB: website*. (In Russ.) Available at: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/industrial-robots/irb-8700> (accessed 10.01.2026).

12. Pratihari D.K., Jain L.C. *Intelligent Autonomous Systems: Foundations and Applications*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 266 p. (Studies in Computational Intelligence; vol. 275). DOI: 10.1007/978-3-642-11676-6

13. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019;15(4):2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186

14. Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(3):567–572. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141

15. Stączek P., Pizoń J., Danilczuk W., Gola A. A Digital Twin Approach for the Improvement of an Autonomous Mobile Robots (AMR's) Operating Environment – A Case Study. *Sensors*. 2021;21(23):7830. DOI: 10.3390/s21237830

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Гордеев Иван Константинович, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ik.gordeev@ya.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Ivan K. Gordeev, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ik.gordeev@ya.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026

The article was submitted 12.01.2026

Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение
УДК 62-50
DOI: 10.14529/ctcr260209

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НАГРУЗКИ ТУРБОАГРЕГАТОВ

О.В. Колесникова, kolesnikovaov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9421-4613>

А.Д. Мойсук, moysukad@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0410-8477>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на металлургических предприятиях, в частности, на их собственных электростанциях, является актуальным вопросом, так как приводит к снижению себестоимости основной продукции и росту конкурентоспособности предприятий. Рассмотрен метод оптимизации режимов работы турбоагрегатов электростанций. **Цель исследования** заключается в повышении энергетической эффективности режимов работы турбоагрегатов электростанций металлургических предприятий. **Материалы и методы.** Приведен метод оптимизации режимов работы турбоагрегатов по критерию минимума удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии их блоком при обеспечении заданной общей электрической и тепловой нагрузки путем ее перераспределения между турбоагрегатами. При решении задачи оптимизации учитываются технологические ограничения, текущее техническое состояние турбоагрегатов, ремонтная программа, объемы потребляемых энергетических ресурсов и вырабатываемой энергетической продукции. В качестве математических моделей турбоагрегатов используются их индивидуальные энергетические характеристики, построение которых осуществляется на основе фактических данных эксплуатации с учетом нормативных данных (например, диаграммы режимов турбоагрегатов). **Результаты.** Приведен пример оптимизации режимов работы для блока четырех турбоагрегатов с использованием статистических данных эксплуатации. В результате оптимизации снижение удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии блоком турбоагрегатов составило около 5 %. При этом ограничения, накладываемые на выработку электроэнергии, отпуск тепла в теплофикационный отбор отдельными турбоагрегатами и их блоком в целом, а также на потребление пара отдельными турбоагрегатами, выполнены. **Заключение.** Рассмотренный метод оптимизации позволяет перераспределить электрическую и тепловую нагрузку между турбоагрегатами при заданных ограничениях, что способствует снижению затрат на выработку электроэнергии. Метод реализован в качестве одной из функций автоматизированной системы управления энергетической эффективностью электростанции, основным назначением которой является повышение технико-экономических показателей работы электростанции. Перспективным направлением дальнейшей работы является разработка цифровых двойников турбоагрегатов для мониторинга и актуализации их энергетических характеристик в режиме реального времени.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, оптимизация, турбоагрегат, электростанция, распределение нагрузки

Для цитирования: Колесникова О.В., Мойсук А.Д. Метод оптимизации нагрузки турбоагрегатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 109–114. DOI: 10.14529/ctcr260209

METHOD OF TURBINE OPERATING MODES OPTIMIZATION

O.V. Kolesnikova, kolesnikovaov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9421-4613>

A.D. Moisuk, moisukad@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0410-8477>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Enhancing the efficiency of fuel and energy resource utilization in metallurgical enterprises, particularly at their captive power plants, is a highly relevant issue. This is due to its direct impact on reducing the cost of primary production and increasing the overall competitiveness of these enterprises. Method of optimization of operation modes of turbine units of power plants is considered. **The purpose of the study** is to enhance the energy efficiency of the operating modes of turbine units of power plants of metallurgical enterprises. **Materials and methods.** A method is presented for optimizing the operating modes of turbine units. This method focuses on minimizing the specific heat consumption for electricity generation by block of turbine units, achieved through the redistribution of a given electrical and thermal load between them. The redistribution takes into account current technological constraints, the technical condition and shut-downs of equipment, the volumes of required energy resources and generated energy production. Individual energy characteristics of turbine units are used as their mathematical models. The construction of these characteristics is performed based on actual operational data, while taking into account regulatory data (e.g., turbine unit operating diagrams). **Results.** An example demonstrating the optimization of operating modes for a block of four turbine units, using statistical operational data, is provided. As a result of this optimization, the specific heat consumption for electricity generation by the turbine unit block was reduced by approximately 5%. All imposed constraints on electricity generation, heat supply from heat extraction by individual turbine units and their unit, as well as on steam consumption by individual turbine units, were satisfied. **Conclusion.** The presented optimization method enables the redistribution of electrical and thermal load between turbine units under given constraints, which contributes to reducing electricity generation costs. The method has been implemented as one of the functions of an automated power plant energy efficiency management system, whose primary purpose is to improve the power plant's technical and economic performance. A promising direction for further work involves the development of digital twins for turbine units to monitor and update their energy characteristics in real-time.

Keywords: energy efficiency, optimization, steam turbine, power plant, load distribution

For citation: Kolesnikova O.V., Moisuk A.D. Method of turbine operating modes optimization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(2):109–114. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260209

Введение

На крупных металлургических предприятиях электрическая и тепловая энергия, как правило, производится на собственных электростанциях. Одним из способов снижения затрат на производство электроэнергии на электростанциях является повышение энергетической эффективности режимов работы турбоагрегатов (далее – ТА). Обоснованный выбор режимов оборудования, в частности ТА, осуществляется с использованием методов математического моделирования и оптимизации, реализованных в том числе в рамках автоматизированных систем управления энергетической эффективностью электростанций.

Рассмотрению способов оптимизации режимов работы энергетического оборудования электростанций посвящены многочисленные работы, например [1–12].

В работе [11] авторы описали способы постановки и решения многокритериальной задачи поиска оптимальных режимов работы ТЭС, позволяющего находить одновременно экономичные и надежные режимы работы генерирующего оборудования. При этом учет параметров надежности предлагается производить на этапе распределения нагрузки. Авторы также предложили обобщенный алгоритм решения таких задач, базирующийся на идеях градиентных методов.

Способы оценки эффективности работы энергетического оборудования и расчета технико-экономических показателей (ТЭП) электростанции приведены, например, в работах [13–17].

В работе [14] авторы отмечают, что наиболее рациональным способом расчета ТЭП является тот, в котором используются эксплуатационные экономические показатели, характеризующие применяемое на электростанции оборудование. Для каждого элемента энергосистемы составляется характеристика, отражающая его энергетическую эффективность. В рамках этих характеристик строится модель, на основе которой проводятся оптимизационные расчеты.

Целью данной работы является повышение энергетической эффективности электростанции путем оптимального распределения тепловой и электрической нагрузки между ТА с учетом текущих технологических и технических ограничений.

1. Метод оптимизации режимов работы ТА

Решение задачи оптимизации осуществляется по критерию минимума удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии:

$$\min q_T = \sum_{i=1}^n Q_{\varepsilon,i} / \sum_{i=1}^n W_{\varepsilon,i} \cdot 1000,$$

где $Q_{\varepsilon,i}$ – расход тепла с паром на выработку электроэнергии ТА;

$W_{\varepsilon,i}$ – выработка электроэнергии ТА;

i – номер ТА;

n – число ТА в работе.

Расход тепла с паром на выработку электроэнергии ТА:

$$Q_{\varepsilon,i} = Q_{0,i} - Q_{\text{тф},i} - Q_{\text{п},i},$$

где $Q_{0,i}$ – общий расход тепла на ТА;

$Q_{\text{тф},i}$, $Q_{\text{п},i}$ – расход тепла, отпущенного в теплофикационный и производственный отбор ТА соответственно.

Вследствие отсутствия возможности установки приборов учета расхода пара в теплофикационные и производственные отборы ТА осуществляется оценка указанных расходов на основе теплового баланса.

Расход тепла на ТА:

$$Q_{0,i} = D_{\text{п},i} (i_{\text{п},i} - i_{\text{п.в},i}),$$

где $D_{\text{п},i}$ – расход пара на ТА;

$i_{\text{п},i}$, $i_{\text{п.в},i}$ – энтальпия пара и питательной воды соответственно.

Расход пара на ТА здесь является расчетным параметром, определяемым на основе математической модели вида

$$D_{\text{п},i} = f(W_{\varepsilon,i}, Q_{\text{тф},i}, Q_{\text{п},i}, \mathbf{x}_i), \quad (1)$$

где \mathbf{x}_i – вектор режимных параметров ТА (например, температура, давление пара).

В качестве математической модели (1) используются индивидуальные энергетические характеристики ТА, определяемые по фактическим данным эксплуатации с учетом нормативных данных (например, диаграммы режимов). Подобный подход позволяет значительно снизить трудоемкость построения характеристик по сравнению с проведением теплотехнических испытаний оборудования. Метод построения характеристик рассмотрен в работе [17].

При решении задачи оптимизации должны выполняться ограничения на выработку электроэнергии, отпуск тепла в теплофикационные и производственные отборы как отдельных ТА, так и в целом их блоком, а также на режимные параметры, потребление пара отдельными ТА. Задание допустимых границ для значений параметров необходимо с целью учета текущих технологических ограничений, технического состояния и остановок оборудования.

2. Пример оптимизации режимов работы ТА

В качестве исходных данных использованы статистические данные эксплуатации ТА, значения которых приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлены значения параметров ТА, полученные в результате решения задачи оптимизации.

Исходные данные

Таблица 1

Source data

Table 1

Наименование параметра	ТА № 1	ТА № 2	ТА № 3	ТА № 4	Блок ТА
Потребление пара, т/ч	218,5	174,1	267,7	163,8	824,2
Расход тепла в теплофикационный отбор, Гкал/ч	45,0	30,0	50,0	30,0	155,0
Выработка электроэнергии, МВт	0,0	50,0	30,0	50,0	130,0
Расход тепла на выработку электроэнергии, Гкал/ч	139,9	61,4	141,3	54,8	397,5

Оптимальные значения параметров

Таблица 2

Optimal values

Table 2

Наименование параметра	ТА № 1	ТА № 2	ТА № 3	ТА № 4	Блок ТА
Потребление пара, т/ч	300,0	132,9	271,2	152,3	856,4
Расход тепла в теплофикационный отбор, Гкал/ч	60,0	20,0	45,0	30,0	155,0
Выработка электроэнергии, МВт	0,0	40,0	60,0	30,0	130,0
Расход тепла на выработку электроэнергии, Гкал/ч	192,0	45,1	113,5	67,5	418,1

Как видно из табл. 1, 2, для снижения удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии необходимо перераспределить расход тепла в теплофикационный отбор между ТА так, чтобы расход тепла для ТА № 2 и № 4 был максимальным, что обусловлено их техническим состоянием. Кроме того, необходимо перераспределить выработку электроэнергии между ТА: снизить для ТА № 1 и увеличить для ТА № 2 и № 4.

В результате решения задачи оптимизации снижение удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии блоком ТА снизилось с 2697 до 2564 ккал/кВт, что составляет около 5 %.

Заключение

Повышение эффективности режимов работ электростанций металлургических предприятий является актуальной задачей. Рассмотрен метод оптимизации режимов работ ТА по критерию минимума удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии блоком ТА. В основе решения задачи оптимизации используются индивидуальные энергетические характеристики ТА, определяемые по фактическим данным эксплуатации. Рассмотрен пример оптимизации режимов работы ТА на основе изложенного метода. Анализ результатов оптимизации показывает, что потенциальное снижение удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии блоком ТА составляет около 5 %. При этом заданные ограничения на значения параметров режимов работы ТА выполнены. Метод оптимизации реализован в рамках автоматизированной системы управления энергетической эффективностью электростанции, основным назначением которой является повышение технико-экономических показателей работы электростанции. В связи со сложностью объекта и высокой степенью ответственности при принятии управленческих решений функционирование системы осуществляется в режиме «советчика» на основе данных технологических и технико-экономических параметров, считываемых с существующих автоматизированных информационных систем электростанции. Перспективным направлением дальнейшей работы является разработка цифровых двойников ТА для мониторинга и актуализации их энергетических характеристик в режиме реального времени.

Список литературы

1. Андриященко А.И., Аминов Р.З. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций. М.: Высшая школа, 1983. 255 с.
2. Аракелян Э.К. Методика выбора оптимальных параметров и режимов работы оборудования энергоблоков на частичных нагрузках // Теплоэнергетика. 2002. № 4. С. 57–60.
3. Цыпулев Д.Ю., Аракелян Э.К., Макарьян В. Методические положения оптимального управления режимами ТЭЦ со сложным составом оборудования // Теплоэнергетика. 2008. № 3. С. 67–73.
4. Оптимизация режимов работы энергоблоков ТЭЦ / П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, О.В. Боруш, С.В. Зыков // Известия РАН. Энергетика. 2014. № 3. С. 54–60.
5. Казаринов Л.С., Игнатова Т.А., Колесникова О.В. Оптимизация нагрузки параллельно работающих по данным эксплуатации при неполных исходных данных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2008. № 17 (117). С. 24–28.
6. Жуков В.П., Барочкин Е.В., Уланов Д.А. Распределение нагрузки между турбоагрегатами теплоэлектроцентрали с использованием принципа оптимальности Беллмана // Вестник ИГЭУ. 2009. Вып. 3. С. 1–4.
7. Султанов М.М., Кузеванов В.С. Разработка и апробация метода оптимизации режимов работы энергетического оборудования ТЭЦ // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 6 (62). С. 24–27.
8. Оптимизация режимов функционирования ТЭЦ как способ повышения энергетической эффективности / В.С. Карманов, Б.Н. Мошкин, Ю.А. Секретарев и др. // Энергетика Татарстана. 2013. № 3 (31). С. 61–67.
9. Kragelund M., Leth J., Wisniewski R. Optimal Usage of Coal, Gas and Oil in a Power Plant // IET Control Theory and Applications. 2010. Vol. 4, no. 2. P. 282–293. DOI: 10.1049/iet-cta.2008.0613
10. Khan I.U., Ahmad T., Maan N. Feedback Fuzzy State Space Modeling and Optimal Production Planning for Steam Turbine of a Combined Cycle Power Generation Plant // Research Journal of Applied Sciences. 2012. Vol. 7, no. 2. P. 100–107. DOI: 10.3923/rjasci.2012.100.107
11. Поиск оптимальных режимов работы ТЭС блочного типа по критериям экономичности и надежности / М.М. Султанов, И.А. Болдырев, А.А. Константинов, Д.С. Агарков // Новое в российской электроэнергетике. 2024. № 11. С. 38–45.
12. Богдан Е.В., Голомыздо А.М., Карницкий Н.Б. Моделирование эффективных режимов работы ТЭС в условиях избытка мощности в энергосистеме // Энергетик. 2025. № 3. С. 23–26. DOI: 10.71527/EP.EN.2025.03.006
13. Филимонова В., Бобрицкая И. Увеличение маржинальности работы ТЭС // Энергорынок. 2013. № 10 (115). С. 34–36.
14. Мерцалов А., Киселева О., Рогов В. Повышение эффективности ТЭС с помощью аналитики ICONICS // Современные технологии автоматизации. 2013. № 2. С. 54–62.
15. Kragelund M., Leth J., Wisniewski R., Jönsson U. Profit Maximization of a Power Plant // European Journal of Control. 2012. Vol. 18 (1). P. 38–54. DOI: 10.3166/ejc.18.38-54
16. Yinsong W., Shizhe L., Jingyu T., Zheng Z. Performance Assessment of Thermal Power Plant Load Control System Based on Covariance Index // Control Engineering Practice. 2016. Vol. 54. P. 58–69. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.04.015
17. Kolesnikova O.V., Kazarinov L.S., Nelubina A.D. Identification of the Efficient Manufacturing Characteristics // Energy Procedia. 2017. Vol. 134. P. 79–88. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.602

References

1. Andryushchenko A.I., Aminov R.Z. *Optimizatsiya rezhimov raboty i parametrov teplovykh elektrostantsiy* [Optimization of Operating Modes and Parameters of Thermal Power Plants]. Moscow: Vysshaya shkola, 1983. 255 p. (In Russ.)
2. Arakelian E.K. [Methodology for Selecting Optimal Parameters and Operation Modes of Power Unit Equipment under Partial Loads]. *Teploenergetika*. 2002;(4): 57–60. (In Russ.)
3. Tsyulev D.Yu., Arakelyan E.K., Makarch'Yan V.A. Methodical principles for optimally controlling the operating conditions of cogeneration stations with a complex composition of equipment. *Thermal Engineering*. 2008;55(3):255–262. DOI: 10.1007/s11509-008-3013-6
4. Schinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Borush O.V., Zykov S.V. Optimization operating mode of CHPP units. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2014;(3):54–60. (In Russ.)

5. Kazarinov L.S., Ignatova T.A., Kolesnikova O.V. Optimization of twin turbochargers load according to exploitation data by incomplete source data. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2008;17(117):24–28. (In Russ.)
6. Zhukov V.P., Barochkin E.V., Ulanov D.A. Load distribution over turbosets of a heat and power plant using the Bellman's principle of optimization. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2009;(3):1–4. (In Russ.)
7. Sultanov M.M., Kuzevanov V.S. [Development and Validation of an Optimization Method for Operating Modes of CHP Plant Energy Equipment]. *Energy saving and water treatment*. 2009;6(62):24–27. (In Russ.)
8. Karmanov V.S., Moshkin B.N., Sekretarev Yu.A., Tchekalina T.V., Yakovenko K.N. Optimization modes of functioning combined heat and power plant as way of increase power efficiency. *Energetika Tatarstana*. 2013;3(31):61–67. (In Russ.)
9. Kragelund M., Leth J., Wisniewski R. Optimal Usage of Coal, Gas and Oil in a Power Plant. *IET Control Theory and Applications*. 2010;4(2):282–293. DOI: 10.1049/iet-cta.2008.0613
10. Khan I.U., Ahmad T., Maan N. Feedback Fuzzy State Space Modeling and Optimal Production Planning for Steam Turbine of a Combined Cycle Power Generation Plant. *Research Journal of Applied Sciences*. 2012;7(2):100–107. DOI: 10.3923/rjasci.2012.100.107
11. Sultanov M.M., Boldyrev I.A., Konstantinov A.A., Agarkov D.S. [Search for Optimal Operating Modes of Block-Type TPPs by Criteria of Economic Viability and Reliability]. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike = New in Russian Electrical Power-Engineering*. 2024;(11):38–45. (In Russ.)
12. Bogdan E.V., Golomyzdo A.M., Karnitskiy N.B. Parametric analysis of maneuverable operating modes of GRES in conditions of excess capacity in the energy system. *Energetik*. 2025;(3):23–26. (In Russ.) DOI: 10.71527/EP.EN.2025.03.006
13. Filimonova V., Bobritskaya I. [Improving Marginality of TPP Operations]. *Energorynok*. 2013;10(115):34–36. (In Russ.)
14. Mertsalov A., Kiseleva O., Rogov V. [Enhancing TPP Efficiency through ICONICS Analytics]. *Modern Automation Technologies*. 2013;(2):54–62. (In Russ.)
15. Kragelund M., Leth J., Wisniewski R., Jönsson U. Profit Maximization of a Power Plant. *European Journal of Control*. 2012;18(1):38–54. DOI: 10.3166/ejc.18.38-54
16. Yinsong W., Shizhe L., Jingyu T., Zheng Z. Performance Assessment of Thermal Power Plant Load Control System Based on Covariance Index. *Control Engineering Practice*. 2016;54:58–69. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.04.015
17. Kolesnikova O.V., Kazarinov L.S., Nelubina A.D. Identification of the Efficient Manufacturing Characteristics. *Energy Procedia*. 2017;134:79–88. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.602

Информация об авторах

Колесникова Ольга Валерьевна, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kolesnikovaov@susu.ru.

Мойсук Анастасия Дмитриевна, преподаватель кафедры автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; moisukad@susu.ru.

Information about the authors

Olga V. Kolesnikova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automatics and Control, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kolesnikovaov@susu.ru.

Anastasiya D. Moysuk, Lecturer of the Department of Automatics and Control, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; moisukad@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.12.2025

The article was submitted 15.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. Структура статьи:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
 - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
 - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
 - электронный адрес автора (e-mail);
 - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);
- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки); 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции: 454080, г. Челябинск, ул. С. Кривой, 79, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 2.

Адрес издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.

ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»
2026. Том 26, № 2

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 30.04.2026. Дата выхода в свет 08.05.2026. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 13,48. Тираж 500 экз. Заказ 77/117. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.