

ISSN: 3033-9820

СЕТЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Research and Development in Modern Science

№ 2 / 2026

<https://modernrd.ru/>

Главный редактор журнала:

Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва

Заместитель главного редактора: Куровская Наталья Анатольевна, генеральный директор ООО «Академия Науки и Образования», Донецк, Российская Федерация

Члены редакционной коллегии:

Арлазаров Владимир Викторович, доктор технических наук, руководитель отдела, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Россия, Москва.

Белоконь Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, Ставрополь.

Благовещенский Владислав Германович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной информатики, МИРЭА — Российский технологический университет, Россия, Москва.

Борзин Роман Юрьевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры информатики и технологии программирования, Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волжский.

Борzych Никита Юрьевич, кандидат технических наук, кафедра практической и прикладной информатики, МИРЭА — Российский технологический университет, Россия, Москва.

Васильев Евгений Михайлович, доктор технических наук, профессор, кафедра электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж.

Вилисов Валерий Яковлевич, доктор технических наук, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики, информатики и вычислительной техники, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Мытищи.

Голубева Ольга Леонидовна, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Инноватики и управления», Челябинский государственный университет, Россия, Челябинск.

Деревянов Максим Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов, Самарский государственный технический университет, Россия, Самара.

Дубенко Юрий Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники, Кубанский государственный технологический университет, Россия, Краснодар.

Закиева Елена Шавкатовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технической кибернетики, Уфимский университет науки и технологий, Россия, Уфа.

Какорин Даниил Дмитриевич, кандидат технических наук, кафедра технологии металлов и материаловедения, Тверской государственный технический университет, Россия, Тверь.

Кивчун Олег Романович, доктор технических наук, доцент, доцент образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия, Калининград.

Крахмалев Олег Николаевич, доктор технических наук, доцент, кафедра прикладной механики и инжиниринга технических систем, автоматизированных систем управления

биотехнологическими процессами, Российский биотехнологический университет, Россия, Москва.

Малютин Олег Сергеевич, кандидат технических наук, начальник отдела информационных технологий и компьютерного моделирования научно-технического центра, Сибирская пожарно-спасательная академия, Россия, Красноярск.

Манцеров Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, директор Образовательно-научного института промышленных технологий машиностроения, заведующий кафедрой «Автоматизация машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород.

Моисеева Татьяна Владимировна, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории анализа и моделирования сложных систем, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Россия, Самара.

Пальгуев Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники радиофизического факультета, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, Нижний Новгород.

Романюк Елена Васильевна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Академия государственной противопожарной службы, Россия, Москва.

Рындин Никита Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры искусственного интеллекта и цифровых технологий, Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж.

Серебрякова Елена Анатольевна, доктор технических наук, доцент кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж.

Стрижко Михаил Александрович, кандидат технических наук, кафедра «Автоматика и телекоммуникации», Донецкий национальный технический университет, Россия, Донец.

Усовик Игорь Вячеславович, доктор технических наук, доцент, кафедра 604 «Системный анализ и управление», Федеральный научно-клинический центр космической медицины и биологии ФМБА, Россия, Королев.

Холостов Константин Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий, Академия управления МВД России, Россия, Москва.

Хусаинов Эмиль Ильшатovich, кандидат технических наук, инженер Политехнической школы Югорского государственного университета, Югорский государственный университет, Россия, Ханты-Мансийск.

Шмалько Елизавета Юрьевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Россия, Москва.

Шнякина Елена Александровна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко, Россия, Оренбург.

Яблоков Александр Евгеньевич, доктор технических наук, кафедра прикладной механики и инжиниринга технических систем, Российский биотехнологический университет, Россия, Москва.

Учредитель и издатель:

ООО «АКАДЕМИЯ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ»

Адрес учредителя: 283086, Донецкая народная республика, г. о. Донецк, г. Донецк, ул. Артема, д. 41, ком. 306в.

ИНН: 9303040432

КПП: 930301001

ОГРН: 1259300002103

Телефон: +7(909)679-60-04

Сайт: <https://modernrd.ru/>

Регистрационный номер СМИ: Эл № ФС77-92148

ISSN: 3033-9820

Издатель: Куровская Наталья Анатольевна, Генеральный директор ООО «АНО».

Адрес издателя: г. Москва

© Research and Development in Modern Science, 2026 г.

Периодичность 4 раза в год.

**В ЖУРНАЛЕ ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО СЛЕДУЮЩИМ НАУЧНЫМ
СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ:**

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)»

ПОРЯДОК РАССМОТРЕНИЯ СТАТЕЙ

Все представленные рукописи первоначально проверяются редакцией на соответствие тематике журнала и проводят проверку на оригинальность (с использованием соответствующих программно-аппаратных комплексов). Прошедшие этот этап статьи передаются на анонимное рецензирование членам редакционной коллегии или привлеченным внешним экспертам. При условии получения положительных рецензий без замечаний по существу исследования статья принимается к публикации, включается в редакционный портфель и размещается в очередном номере журнала.

Научный журнал «Research and Development in Modern Science» занимается публикацией научно-практических исследований в соответствии с номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

Наш журнал стремится сделать процесс публикации максимально удобным для авторов, поэтому допускает различные варианты оформления библиографических ссылок и списка литературы.

Список источников оформляется по ГОСТ 7.0.5-2008 и приводится в конце статьи под заголовком «Список источников». При этом допускаются следующие форматы библиографических ссылок:

- Внутритекстовые ссылки (по стандарту APA)
- Подстрочные ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)
- Затекстовые ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)

Мы предоставляем авторам гибкость в оформлении, чтобы минимизировать бюрократические барьеры и сосредоточиться на содержании научного исследования. Главное — единообразие внутри самой статьи.

ПЛАТА ЗА ПУБЛИКАЦИЮ

Редакция не взимает с авторов плату за подготовку, размещение или печать материалов.

При использовании опубликованных материалов журнала ссылка на «Research and Development in Modern Science» обязательна.

Полная или частичная перепечатка материалов допускается только по письменному разрешению авторов статей или редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикаций.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Chief Editor:

Gavriushin Sergei Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Systems of Production Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Deputy Chief Editor: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, General Director of “Academy of Science and Education” LLC, Donetsk, Russian Federation

Editorial Board:

Arlazarov Vladimir Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Belokon Dmitrii Aleksandrovich, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia.

Blagoveshchenskii Vladislav Germanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Informatics, MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia.

Borzin Roman Iurevich, PhD in Technical Sciences, Assistant of the Department of Informatics and Programming Technology, Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia.

Borzykh Nikita Iurevich, PhD in Technical Sciences, Department of Practical and Applied Informatics, MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia.

Vasilev Evgenii Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Vilisov Valerii Iakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi, Russia.

Golubeva Olga Leonidovna, PhD in Technical Sciences, Lecturer at the Department of Innovation and Management, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia.

Derevianov Maksim Iurevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Control and Systems Analysis of Heat-Power and Sociotechnical Complexes, Samara State Technical University, Samara, Russia.

Dubenko Iurii Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Engineering, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia.

Zakieva Elena Shavkatovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.

Kakorin Daniil Dmitrievich, PhD in Technical Sciences, Department of Metal Technology and Materials Science, Tver State Technical University, Tver, Russia.

Kivchun Oleg Romanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Educational and Research Cluster “Institute of High Technologies”, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

Krakhmalev Oleg Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Engineering of Technical Systems / Automated Control Systems for Biotechnological Processes, Russian Biotechnological University, Moscow, Russia.

Maliutin Oleg Sergeevich, PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Information Technologies and Computer Modeling, Scientific and Technical Center, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Krasnoyarsk, Russia.

Mantserov Sergei Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Industrial Engineering Technologies, Head of

the Department of Manufacturing Automation, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Moiseeva Tatiana Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory for Analysis and Modeling of Complex Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Palguyev Dmitrii Anatolevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering, Faculty of Radiophysics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia.

Romaniuk Elena Vasilevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia.

Ryndin Nikita Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Artificial Intelligence and Digital Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Serebriakova Elena Anatolevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Digital and Sectoral Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Strizhko Mikhail Aleksandrovich, PhD in Technical Sciences, Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia.

Usovik Igor Viacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department 604 "Systems Analysis and Control", Federal Scientific and Clinical Center for Space Medicine and Biology of the FMBA of Russia, Korolev, Russia.

Kholostov Konstantin Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Technologies, Management Academy of the Ministry of the Interior of Russia, Moscow, Russia.

Khusainov Emil Ilshatovich, PhD in Technical Sciences, Engineer, Polytechnic School of Yugra State University, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia.

Shmalko Elizaveta Iurevna, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Shniakina Elena Aleksandrovna, PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Computer Software and Automated Systems, Orenburg State University, Orenburg, Russia.

Iablokov Aleksandr Evgenevich, Doctor of Technical Sciences, Department of Applied Mechanics and Engineering of Technical Systems, Russian Biotechnological University, Moscow, Russia.

Founder and publisher:

LLC "ACADEMY OF SCIENCE AND EDUCATION"

Founder's address: 41 Artem str., room 306b, Donetsk city, Donetsk People's Republic, 283086.

INN: 9303040432

KPP: 930301001

OGRN: 1259300002103

Phone: +7 (909)679-60-04

Website: <https://modernrd.ru/>

Media registration number: El No. FS77-92148

ISSN: 3033-9820

Publisher: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, CEO of ANO LLC.

Publisher's address: Moscow

© Research and Development in Modern Science, 2026 г.

The frequency is 4 times a year.

THE JOURNAL PUBLISHES ARTICLES ON THE FOLLOWING SCIENTIFIC SPECIALTIES:

2.3.1. "System analysis, information management and processing, statistics (technical sciences)"

2.3.3. "Automation and control of technological processes and production facilities (technical sciences)"

2.3.4. "Management in organizational systems (technical sciences)"

PROCEDURE FOR REVIEWING ARTICLES

All submitted manuscripts are initially checked by the editorial staff for compliance with the journal's subject matter and checked for originality (using appropriate software and hardware systems). Articles that have passed this stage are submitted for anonymous review to members of the editorial board or external experts involved. Subject to receiving positive reviews without comments on the research substance, the article is accepted for publication, included in the editorial portfolio and placed in the next issue of the journal.

The scientific journal "Research and Development in Modern Science" publishes scientific and practical research in accordance with the nomenclature of scientific specialties for which academic degrees are awarded.

Our journal strives to make the publication process as convenient as possible for authors, so it allows for various design options for bibliographic references and references.

The list of sources is drawn up in accordance with GOST 7.0.5-2008 and is given at the end of the article under the heading "List of sources". The following formats of bibliographic references are allowed:

- Intra-text links (according to the APA standard)
- Footnotes (according to GOST 7.0.5-2008)
- Non-text links (according to GOST 7.0.5-2008)

We provide authors with flexibility in design to minimize red tape and focus on the content of their research. The main thing is uniformity within the article itself.

PUBLICATION FEE

The editorial board does not charge authors a fee for the preparation, placement or printing of materials.

When using published journal materials, a link to "Research and Development in Modern Science" is required.

Full or partial reprint of materials is allowed only with the written permission of the authors of the articles or the editorial board.

The editors' point of view does not always coincide with the authors' point of view.

ОГЛАВЛЕНИЕ

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).....	10
Блохин А.В. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ОБНАРУЖЕНИЕМ РЕЖИМНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ	10
Акопян Б.К. ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ С ТЫСЯЧАМИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНЫХ VDD	28
Григорьев Е.К., Никонов Ю.Ю. НЕЧЁТКИЕ КОГНИТИВНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА	48
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)	69
Кулешов И.В., ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ОСНОВА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ МЕХАНООБРАБОТКИ	69
Еремеева В.А., Шаронов П.А. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГРАНУЛИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ: МНОГОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПЕРЕКРЁСТНЫХ СВЯЗЕЙ И ПРЕДИКТИВНОЙ НАСТРОЙКОЙ	93
Шабашов А.А. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОЙ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ.....	110
Язев П.А. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО МОДЕЛЬНО-ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	128
2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)	148
Ефременков И.Д. УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ .	148
Кириленко Н.Е., Копелиович М.В. АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ СЕТЕВЫХ ПОТОКОВ	166
Спешилов Е.А. СТАТИСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ С АДАПТИВНЫМИ ПРЕДЕЛАМИ.....	188

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Научная статья

УДК 621.311.1:519.23

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ОБНАРУЖЕНИЕМ РЕЖИМНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Блохин Александр Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель, Омский государственный технический университет, Россия, Омск, blokhin.omgtu@inbox.ru

Аннотация. Точность краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии критически влияет на операционную надежность и экономическую эффективность функционирования современных энергосистем. Традиционные детерминированные подходы демонстрируют существенное снижение качества прогноза при возникновении структурных сдвигов, вызванных аномальными метеорологическими условиями, технологическими авариями или календарными факторами. В работе предложен режимно-зависимый вероятностный механизм прогнозирования, который интегрирует скрытые марковские модели (НММ) с гибридной архитектурой авторегрессионного интегрированного скользящего среднего (ARIMA) и рекуррентных нейронных сетей с долговременной памятью (LSTM). В отличие от существующих решений, скрытое состояние системы оценивается исключительно по фильтрованным апостериорным вероятностям, доступным на момент формирования прогноза. Такой подход исключает использование будущих наблюдений при формировании прогноза и сохраняет временную последовательность обработки данных. Экспериментальная проверка на почасовых данных четырех географически разнородных зон ENTSO-E за трехлетний период показала статистически значимое превосходство разработанной архитектуры. На горизонте 168 часов средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) снизилась до 3,21%, а непрерывный ранговый

вероятностный балл (CRPS) достиг значения 412,8 МВт, что свидетельствует о корректной калибровке неопределенности предиктивного распределения. Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения режимно-адаптивных алгоритмов в диспетчерские комплексы для оптимизации объемов резервирования и минимизации финансовых рисков на оптовых рынках электроэнергии.

Ключевые слова: краткосрочное прогнозирование нагрузки; скрытые марковские модели; режимные переключения; вероятностное прогнозирование; гибридные архитектуры; нестационарные временные ряды; управление энергосистемами.

Original article

POWER SYSTEM LOAD FORECASTING WITH DETECTION OF MODE SWITCHES

Blokhin Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Omsk State Technical University, Omsk, Russia, blokhin.omgtu@inbox.ru

Annotation. The accuracy of short-term electricity consumption forecasting critically impacts the operational reliability and economic efficiency of modern power systems. Traditional deterministic approaches demonstrate a significant reduction in forecast quality when structural shifts occur due to abnormal meteorological conditions, technological accidents, or calendar factors. This paper proposes a mode-dependent probabilistic forecasting mechanism that integrates hidden Markov models (HMMs) with a hybrid architecture of an autoregressive integrated moving average (ARIMA) and recurrent neural networks with long-short-term memory (LSTM). Unlike existing solutions, the hidden state of the system is estimated exclusively based on filtered posterior probabilities available at the time of forecast generation. This approach eliminates data leakage from the future and ensures strict causal relationships

in the time series. Experimental testing on hourly data from four geographically diverse ENTSO-E zones over a three-year period demonstrated statistically significant superiority of the developed architecture. Over a 168-hour horizon, the mean absolute percentage error (MAPE) decreased to 3.21%, and the continuous rank probability score (CRPS) reached 412.8 MW, indicating correct calibration of the predictive distribution uncertainty. The obtained results confirm the feasibility of implementing mode-adaptive algorithms in dispatch systems to optimize backup capacity and minimize financial risks in wholesale electricity markets.

Keywords: short-term load forecasting; hidden Markov models; mode switching; probabilistic forecasting; hybrid architectures; non-stationary time series; power system management.

Введение. Функционирование современных электроэнергетических систем связано с необходимостью точного балансирования генерации и потребления в режиме реального времени. Базовым инструментом решения данной задачи служит краткосрочное прогнозирование нагрузки [1]. С математической точки зрения процесс потребления электрической энергии представляет собой сложный нестационарный временной ряд, формирующийся под воздействием множества экзогенных и эндогенных факторов [2]. Традиционно исследователи фокусируются на выявлении внутренних циклических закономерностей, таких как суточные, недельные и сезонные колебания [3-5]. Однако представление динамики потребления исключительно через периодические компоненты не позволяет учесть все особенности исследуемого процесса. На практике профиль потребления непрерывно трансформируется, что требует учета стохастической природы исходных данных и их зависимости от внешних возмущений.

Помимо основных циклических закономерностей, на динамику нагрузки влияют специфические возмущения, приводящие к так называемым режимным переключениям. Под данным явлением понимается резкое изменение

статистических характеристик временного ряда, вызванное сменой базовых условий эксплуатации. К подобным структурным сдвигам относятся календарные аномалии, включая государственные праздники и нестандартные выходные дни, когда снижение промышленного потребления существенно изменяет профиль нагрузки [6]. Отдельную группу рисков создают метеорологические и технологические шоки. Например, экстремальные температуры приводят к массовому включению климатического оборудования, а масштабные изменения инфраструктуры, такие как повсеместный переход на электрическое отопление, вызывают резкое увеличение базовой нагрузки и повышение ее волатильности. В такие периоды система переходит из одного устойчивого состояния в другое, вследствие чего ранее выявленные тенденции могут утрачивать свою прогностическую значимость [7].

Классические подходы к обработке информации в задачах предсказания потребления, как правило, опираются на гипотезу стационарности или слабой нестационарности процесса. Методы, базирующиеся на авторегрессионных зависимостях или поиске исторических аналогий, демонстрируют высокую эффективность лишь при стабильном профиле потребления. Их математический аппарат жестко фиксирует сезонные параметры, извлеченные из ретроспективных данных. При резком изменении динамики нагрузки или смене скрытого состояния системы подобные алгоритмы теряют способность адаптироваться к новым условиям [7]. Прогноз начинает содержать систематическую ошибку, поскольку модель пытается описать качественно новую ситуацию посредством коэффициентов, калиброванных на совершенно иных условиях. Особенно заметно этот недостаток проявляется при прогнозировании пиковых значений нагрузки и потребления в дни с нетипичным профилем, когда линейные зависимости перестают адекватно описывать динамику временного ряда [8].

Преодоление указанных ограничений требует перехода от детерминированного отслеживания трендов к вероятностному моделированию с

явным выделением скрытых состояний. В рамках системного анализа это предполагает включение в модель механизмов обнаружения резких изменений состояния системы. Современные архитектуры нейронных сетей с долговременной памятью успешно справляются с нелинейными искажениями, однако их способность к интерпретации дискретных переходов между режимами остается предметом дискуссий [9]. Альтернативный путь заключается в использовании марковских процессов, позволяющих формализовать переходы между скрытыми фазами потребления [10]. Настоящая работа посвящена разработке и исследованию методологии прогнозирования, которая в явном виде идентифицирует факт смены эксплуатационного режима до начала процедуры вычисления целевых значений. Такой подход позволяет существенно снизить финансовые и операционные риски при управлении электроэнергетическими системами в условиях высокой неопределенности.

Обзор литературы. Фундаментальной задачей управления электроэнергетическими системами в условиях либерализованных рынков выступает обеспечение непрерывного баланса между генерацией и потреблением. Точность краткосрочного прогнозирования нагрузки напрямую определяет финансовую устойчивость участников рынка и операционную надежность сетей. Эмпирические исследования, проведенные на примере фрагментированного рынка Японии (JEPX), демонстрируют, что пространственная гетерогенность и структурные различия регионов требуют отказа от унифицированных подходов в пользу контекстно-зависимых моделей [11-13]. Традиционные стохастические методы, такие как SARIMA, эффективно улавливают линейные сезонные паттерны, однако их прогностическая способность критически снижается при наличии выраженных нелинейных искажений. С другой стороны, архитектуры глубокого обучения, в частности сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), успешно аппроксимируют сложные нелинейные зависимости, но склонны к переобучению и требуют значительных вычислительных ресурсов [14], [15].

Особую сложность представляет учет структурных сдвигов, вызванных экзогенными шоками. Внедрение масштабных инфраструктурных инициатив, таких как политика замещения твердого топлива электричеством для нужд отопления, приводит к взрывному росту базовой нагрузки и формированию новых, ранее не существовавших паттернов потребления. Классические подходы, основанные на поиске исторических аналогий или использовании фиксированных календарных признаков, оказываются недостаточно эффективными при подобных режимных переключениях [16]. Вероятностные модели, в том числе скрытые марковские процессы (НММ), предлагают альтернативный путь, позволяя формализовать дискретные переходы между скрытыми состояниями системы. Тем не менее в существующих исследованиях марковские цепи чаще всего используются для предварительной классификации режимов, что нарушает целостность вероятностного моделирования и не позволяет в полной мере учесть неопределенность, связанную со сменой состояния [17-19].

Настоящая работа преодолевает указанный разрыв, предлагая концептуально новый режимно-зависимый вероятностный механизм. В отличие от гибридных моделей, где переключение происходит экзогенно, в предлагаемой архитектуре скрытая марковская модель выступает интегральной частью вычислительного контура. Итоговое прогнозное значение формируется как динамическая вероятностная смесь, где веса компонентов определяются фильтрованными апостериорными вероятностями состояний. Такой подход исключает использование будущих наблюдений при формировании прогноза и позволяет непосредственно оценивать распределение прогнозной ошибки, необходимое для расчета метрик вероятностного прогнозирования.

Материалы и методы исследования. Информационную базу исследования составили массивы почасовых данных о фактическом потреблении электрической энергии, собранные европейской сетью операторов ENTSO-E. Выборка охватывает четыре географически и экономически разнородные зоны

за трехлетний период, что обеспечивает репрезентативность данных для оценки устойчивости моделей к региональной специфике. Первичная обработка временных рядов включала процедуру разложения STL, позволившую изолировать трендовую, сезонную и остаточную компоненты. Для подтверждения стационарности преобразованных рядов применялись расширенный тест Дики-Фуллера (ADF) и тест Филиппса-Перрона (KPSS). Для снижения влияния аномальных выбросов, обусловленных сбоями телеметрии или локальными технологическими авариями, применялось робастное z-преобразование с использованием медианы и среднего абсолютного отклонения. Это позволило сохранить исходную дисперсию ряда без искажений, характерных для классических методов.

Центральным элементом методологии выступает разработка режимно-зависимой вероятностной модели. Пусть $S_t \in \{1, \dots, K\}$ обозначает скрытое состояние системы в момент времени t . Переходы между состояниями описываются матрицей P , параметры которой оцениваются итеративно с использованием алгоритма Баума-Уэлша. Определение оптимального числа состояний K не сводится исключительно к минимизации байесовского информационного критерия (BIC) или применению теста отношения правдоподобия. Ввиду того, что стандартные асимптотические свойства LR-теста для смесевых моделей со скрытыми состояниями требуют осторожности, выбор K дополнительно базировался на анализе устойчивости топологии состояний при многократном обучении с различными начальными приближениями, а также на качестве прогноза на отложенном временном интервале.

Для каждого выявленного режима k формируется отдельная гибридная модель: линейная модель ARIMA аппроксимирует детерминированную составляющую, а рекуррентная нейронная сеть LSTM компенсирует нелинейные отклонения. Ключевым методологическим нововведением является процедура агрегации компонентных прогнозов. Для исключения утечки данных из

будущего, весовые коэффициенты смеси рассчитываются исключительно на основе фильтрованных вероятностей $P(S_t = k|y_{1:t})$, доступных на момент формирования прогноза, а не сглаженных оценок, требующих знания последующих наблюдений.

Для обеспечения возможности расчета вероятностных метрик, в частности непрерывного рангового вероятностного балла (CRPS), сформулирована процедура построения предиктивного распределения. Остатки режимно-зависимой модели аппроксимируются гауссовской смесью, параметры которой (математическое ожидание и дисперсия) определяются текущим скрытым состоянием. Экспериментальная оценка проводилась с использованием скользящего начала прогнозирования, что исключало случайное перемешивание наблюдений временных рядов. В качестве базовых моделей выступили SARIMA, Prophet, изолированная LSTM и классическая связка ARIMA+LSTM. Статистическая значимость превосходства предлагаемого подхода подтверждалась тестом Диболда-Мариано для попарного сравнения точности прогнозов.

Результаты исследования и их обсуждение. Процедура выбора числа скрытых состояний для всех четырех исследуемых зон стабильно указывала на оптимальность модели с $K = 3$. Интерпретация выявленных режимов проводилась постфактум на основе сопоставления профилей нагрузки с календарными и метеорологическими данными. Первое состояние характеризовалось стабильной нагрузкой с низкой волатильностью и выраженной долей промышленного потребления и соответствовало обычным рабочим дням. Второе состояние характеризовалось высокой чувствительностью нагрузки к температурным аномалиям и резкими пиками потребления, что позволило идентифицировать его как режим климатического шока. Третье состояние характеризовалось резким снижением потребления электроэнергии в национальные праздники и нестандартные выходные дни.

Результаты сравнительного тестирования, проведенного на горизонтах 24,

72 и 168 часов, выявили фундаментальные ограничения классических и изолированных нелинейных подходов. По мере увеличения горизонта прогнозирования ошибка базовых моделей экспоненциально возрастала из-за накопления неопределенности при структурных сдвигах. Предлагаемая режимно-зависимая модель продемонстрировала статистически значимое превосходство, особенно в части вероятностных метрик (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительная точность прогнозов на горизонте 168 часов (усреднено по 4 зонам ENTSO-E)

Модель	MAPE, %	RMSE, МВт	U Тейла	CRPS, МВт
SARIMA	6.84	1450.2	0.112	845.6
Prophet	5.92	1280.5	0.098	760.3
LSTM (изолированная)	4.15	980.4	0.075	610.2
ARIMA + LSTM	3.88	910.6	0.069	580.5
Предлагаемая модель	3.21	765.3	0.058	412.8

Источник: разработано автором.

Абляционный анализ подтвердил, что улучшение прогностических характеристик обусловлено именно наличием механизма переключения режимов. Тест Диболда-Мариано отверг нулевую гипотезу об эквивалентной точности между связкой ARIMA+LSTM и полной предлагаемой моделью на уровне значимости $p < 0.01$ для всех горизонтов. При этом сочетание НММ только с ARIMA или только с LSTM позволяло улучшить значение CRPS, но уступало полной модели по метрикам точечного прогнозирования (MAPE, RMSE), что подчеркивает необходимость совместного использования линейных и нелинейных аппроксиматоров в рамках марковской модели.

Глубокий анализ динамики скрытых состояний позволил количественно оценить инерционность энергетических режимов. Матрица переходов выявила высокую вероятность сохранения климатического режима (состояние 2) на протяжении последовательных часов, что отражает физическую тепловую инерцию зданий и инфраструктуры (таблица 2).

Таблица 2 - Матрица переходов и профили длительности скрытых состояний (Зона 1)

Исходное состояние ↓ / Целевое →	Базовый режим (1)	Климатический шок (2)	Календарная аномалия (3)	Ожидаемая длительность, ч
Базовый режим (1)	0.942	0.045	0.013	17.2
Климатический шок (2)	0.081	0.895	0.024	8.6
Календарная аномалия (3)	0.110	0.015	0.875	7.8

Источник: разработано автором.

Переход из базового режима в состояние климатического шока происходит относительно редко, однако после такого перехода вероятность сохранения нового режима остается высокой. Календарные аномалии характеризуются быстрым затуханием и скорым возвратом к базовому профилю. Учет этих стохастических свойств на уровне матрицы переходов позволяет предлагаемой модели превентивно корректировать дисперсию предиктивного распределения, расширяя доверительные интервалы при высокой вероятности нахождения в режиме климатического шока. Таким образом, строгая формализация режимных переключений через интегральный вероятностный механизм не только снижает систематическую ошибку точечного прогноза, но и обеспечивает адекватную калибровку неопределенности, что имеет критическое значение для принятия оптимальных решений в условиях конкурентного рынка электрической энергии

Выводы. Проведенное исследование позволило сформулировать и экспериментально подтвердить работоспособность режимно-зависимого вероятностного подхода к краткосрочному прогнозированию электрической нагрузки. В отличие от распространенных гибридных схем, где марковская цепь выполняет роль предварительного классификатора, разработанный метод встраивает скрытый марковский процесс непосредственно в вычислительный контур. Итоговое прогнозное значение формируется как динамическая смесь компонентных оценок, взвешенных по фильтрованным апостериорным вероятностям состояний, что исключает использование информации из будущего и сохраняет причинно-следственную структуру временного ряда.

Эмпирическая проверка на почасовых данных четырех зон ENTSO-E за трехлетний период показала, что предложенная архитектура устойчиво превосходит базовые модели на всех исследованных горизонтах. На интервале 168 часов средняя абсолютная процентная ошибка снизилась до 3,21% против 3,88% у связки ARIMA+LSTM без механизма переключения и 6,84% у классической SARIMA. Особенно показателен выигрыш по вероятностной метрике CRPS: значение 412,8 MBт для полной модели почти в полтора раза ниже результата ближайшего конкурента (580,5 MBт), что свидетельствует о более адекватной калибровке неопределенности. Тест Диболда–Мариано подтвердил статистическую значимость этих различий при $p < 0,01$.

Абляционный эксперимент выявил неравномерность вклада отдельных компонентов в итоговую точность. Изолированное применение марковской цепи в связке только с линейной ARIMA-компонентой давало заметное улучшение CRPS, однако уступало полной модели в точечных метриках. Аналогичная картина наблюдалась при комбинации HMM с LSTM без линейной части. Только совместное использование обоих аппроксиматоров в рамках марковской модели обеспечило одновременное снижение систематической и стохастической составляющих ошибки. Данный результат указывает на то, что режимные переключения затрагивают как трендовую, так и нелинейную компоненты нагрузки, и адекватное моделирование требует учета обоих аспектов.

С практической точки зрения полученные выводы имеют непосредственное значение для систем управления энергосистемами. Операторы диспетчерских центров вынуждены принимать решения о запуске резервных генерирующих мощностей и перетоках между зонами в условиях неполной информации. Детерминированные прогнозы не дают представления о ширине доверительного интервала, что вынуждает закладывать избыточные резервы и нести дополнительные затраты. Разработанный вероятностный механизм формирует предиктивное распределение нагрузки, на основе которого можно рассчитывать оптимальный объем вращающегося резерва с учетом допустимого

уровня риска. По оценкам, выполненным Rabie с соавторами для японского рынка JEPX, сокращение ошибки прогноза даже на доли процента способно уменьшить ежедневные финансовые потери на сотни миллионов иен в крупных зонах. Применительно к европейским энергосистемам масштаб экономического эффекта сопоставим, поскольку ценовая волатильность на спотовых рынках в периоды пикового потребления достигает аналогичных значений.

Внедрение предложенного подхода в действующие EMS целесообразно осуществлять поэтапно. На начальном этапе марковскую компоненту допустимо интегрировать в существующий прогнозный контур как надстройку, корректирующую доверительные интервалы базовой модели в зависимости от текущего скрытого состояния. Такой вариант не требует замены работающей инфраструктуры и позволяет накопить статистику переходов между режимами. После калибровки матрицы переходов на исторических данных конкретной энергосистемы становится возможным переход к полному режимно-зависимому прогнозированию, где каждая компонента адаптируется к текущему состоянию. Особое внимание при этом необходимо уделить процедуре обновления параметров: структура потребления постепенно трансформируется под влиянием климатических сдвигов и технологических факторов, включая массовый переход на электрическое отопление, описанный Chen с соавторами, поэтому матрицу переходов и параметры компонентных моделей следует периодически переобучать на скользящем временном окне.

Ряд ограничений определяет направления дальнейших исследований. Текущая версия модели оперирует тремя скрытыми состояниями, что достаточно для описания базовой, пиковой и аномально низкой нагрузки, но может оказаться упрощением для энергосистем с более сложной структурой потребления. Вопрос об адаптивном выборе числа состояний в режиме реального времени остается открытым. Кроме того, модель не учитывает явным образом влияние распределенной генерации, в частности фотоэлектрических установок, чья выработка вносит дополнительную стохастичность в чистую

нагрузку. Включение экзогенных метеорологических переменных в эмиссионные распределения марковской цепи представляет собой естественное расширение, способное повысить точность в зонах с высокой долей возобновляемых источников. Вычислительная стоимость одновременного обучения нескольких LSTM-компонент и марковской цепи также требует оптимизации для применения на горизонтах менее одного часа.

Несмотря на указанные ограничения, даже в текущей конфигурации разработанный подход демонстрирует существенное преимущество перед существующими методами, особенно в части вероятностного прогнозирования. Способность модели заблаговременно распознавать структурные сдвиги в профиле нагрузки и соответствующим образом перестраивать как точечный прогноз, так и оценку неопределенности, делает ее перспективным инструментом для диспетчерского управления в условиях растущей нестабильности современных энергосистем.

Список литературы

1. Атрощенко В. А., Тымчук А. И. Модель ARIMA электропотребления для индивидуального потребителя в многоквартирном доме // Научные труды КубГТУ. — 2023. — № 1. — С. 60–70.
2. Pierre A. A., Akim S. A., Semenyо A. K., Babiga B. Peak Electrical Energy Consumption Prediction by ARIMA, LSTM, GRU, ARIMA-LSTM and ARIMA-GRU Approaches // *Energies*. — 2023. — Vol. 16, No. 12. — Art. 4739. — DOI: 10.3390/en16124739.
3. Рахмонов И. У., Ушаков В. Я., Ниёзов Н. Н., Курбонов Н. Н. Прогнозирование электропотребления с помощью нейронных сетей с LSTM // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334, № 12. — С. 125–133. — DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4407.
4. Zhang W., Zhao L., Wang X. Research on Short-Term Power Load Forecasting Based on ARIMA-LSTM Model // 2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI). — 2023. — DOI:

10.1109/ICETCI57876.2023.10176860.

5. Ключев Р. В., Моргоева А. Д., Гаврина О. А., Босиков И. И., Моргоев И. Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. — 2023. — Т. 261. — С. 392–402.
6. Li X., Liu G., Zhu S. Market Electricity Price Forecasting Model Based on ARIMA-LSTM // Intelligent Computing Technology and Automation. — 2024. — DOI: 10.3233/ATDE231279.
7. Горшенин А. Ю., Денисова Л. А. Применение машинного обучения деревьев решений и искусственных нейронных сетей для краткосрочного прогнозирования электропотребления // Датчики и системы. — 2024. — № 6. — С. 12–20. — DOI: 10.24412/1992-7185-2024-6-12-20.
8. Zhou R., Zhang X. Short-Term Power Load Forecasting Based on ARIMA-LSTM // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — Vol. 2803, No. 1. — Art. 012002. — DOI: 10.1088/1742-6596/2803/1/012002.
9. Рахмонов И. У., Ниёзов Н. Н., Ушаков В. Я., Курбонов Н. Н., Нажимова А. М. Прогнозирование электропотребления на основе метода главных компонент (РСА) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — Т. 335, № 12. — С. 198–209. — DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731.
10. Yu K. Adaptive Bi-Directional LSTM Short-Term Load Forecasting with Improved Attention Mechanisms // Energies. — 2024. — Vol. 17, No. 15. — Art. 3709. — DOI: 10.3390/en17153709.
11. Каретников М. С. Анализ методов кластеризации временных рядов электропотребления // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 3 (141). — DOI: 10.23670/IRJ.2024.141.37.
12. Wang C., Li X., Shi Y., Jiang W., Song Q., Li X. Load Forecasting Method Based on CNN and Extended LSTM // Energy Reports. — 2024. — Vol. 12. — P. 2452–2461. — DOI: 10.1016/j.egyr.2024.07.030.

13. Гуляев А. В. Гибридная модель глубокого обучения для прогнозирования значений временных рядов // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. — 2025. — Т. 27, № 3. — С. 62–72. — DOI: 10.18127/j19998554-202503-08.
14. El-Afifi M. I., Eladl A. A., Sedhom B. E., Hassan M. A. Enhancing EV Charging Station Integration: A Hybrid ARIMA-LSTM Forecasting and Optimization Framework // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 2025. — Vol. 61, No. 3. — P. 4924–4935. — DOI: 10.1109/TIA.2025.3540788.
15. Малеев О. Г., Ковалева О. А. Исследование применимости архитектуры нейронных сетей Колмогорова–Арнольда (KAN) к задаче прогнозирования временных рядов // *Информатика, телекоммуникации и управление*. — 2025. — Т. 18, № 4. — С. 20–29. — DOI: 10.18721/JCSTCS.18402.
16. Chakraborty P., Kalaivani S., Ambika A., Ramya K. Forecasting Electricity Consumption Using ARIMA-LSTM Model // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. — 2025. — Vol. 17, No. 4. — Art. 04011. — DOI: 10.21272/jnep.17(4).04011.
17. O'Connor C., Bahloul M., Prestwich S., Visentin A. A Review of Electricity Price Forecasting Models in the Day-Ahead, Intra-Day, and Balancing Markets // *Energies*. — 2025. — Vol. 18, No. 12. — Art. 3097. — DOI: 10.3390/en18123097.
18. Серегичев К. С., Суконщиков А. А., Горбунов В. А. Прогнозирование электропотребления с помощью выделения функций из временного ряда // *Вестник Череповецкого государственного университета*. — 2026. — № 1 (130). — С. 36–46. — DOI: 10.23859/1994-0637-2026-1-130-3.
19. Zhuo H., Wang Y., Li S., Ma H., Wang Y., Li R., Liu G. Enhancing Electricity Price Prediction Accuracy With an Attention Mechanism-LSTM Hybrid Model // *Engineering Reports*. — 2026. — Vol. 8, No. 3. — e70657. — DOI: 10.1002/eng2.70657.

References

1. Atroshhenko V. A., Ty`mchuk A. I. Model` ARIMA e`lektropotrebleniya dlya individual`nogo potrebitelya v mnogokvartirnom dome // *Nauchny`e trudy` KubGTU*. — 2023. — № 1. — S. 60–70.

2. Pierre A. A., Akim S. A., Semenyov A. K., Babiga B. Peak Electrical Energy Consumption Prediction by ARIMA, LSTM, GRU, ARIMA-LSTM and ARIMA-GRU Approaches // *Energies*. — 2023. — Vol. 16, No. 12. — Art. 4739. — DOI: 10.3390/en16124739.
3. Raxmonov I. U., Ushakov V. Ya., Niyozov N. N., Kurbonov N. N. Prognozirovanie e'lektropotrebleniya s pomoshh'yu nejronny'x setej c LSTM // *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. — 2023. — T. 334, № 12. — S. 125–133. — DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4407.
4. Zhang W., Zhao L., Wang X. Research on Short-Term Power Load Forecasting Based on ARIMA-LSTM Model // *2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. — 2023. — DOI: 10.1109/ICETCI57876.2023.10176860.
5. Klyuev R. V., Morgoeva A. D., Gavrina O. A., Bosikov I. I., Morgoev I. D. Prognozirovanie planovogo potrebleniya e'lektroe'nergii dlya ob''edinennoj e'nergosistemy' s pomoshh'yu mashinnogo obucheniya // *Zapiski Gornogo instituta*. — 2023. — T. 261. — S. 392–402.
6. Li X., Liu G., Zhu S. Market Electricity Price Forecasting Model Based on ARIMA-LSTM // *Intelligent Computing Technology and Automation*. — 2024. — DOI: 10.3233/ATDE231279.
7. Gorshenin A. Yu., Denisova L. A. Primenenie mashinnogo obucheniya derev'ev reshenij i iskusstvenny'x nejronny'x setej dlya kratkosrochnogo prognozirovaniya e'lektropotrebleniya // *Datchiki i sistemy'*. — 2024. — № 6. — S. 12–20. — DOI: 10.24412/1992-7185-2024-6-12-20.
8. Zhou R., Zhang X. Short-Term Power Load Forecasting Based on ARIMA-LSTM // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2024. — Vol. 2803, No. 1. — Art. 012002. — DOI: 10.1088/1742-6596/2803/1/012002.
9. Raxmonov I. U., Niyozov N. N., Ushakov V. Ya., Kurbonov N. N., Nazhimova A. M. Prognozirovanie e'lektropotrebleniya na osnove metoda glavny'x komponent (PCA) // *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*.

- 2024. — Т. 335, № 12. — С. 198–209. — DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731.
10. Yu K. Adaptive Bi-Directional LSTM Short-Term Load Forecasting with Improved Attention Mechanisms // *Energies*. — 2024. — Vol. 17, No. 15. — Art. 3709. — DOI: 10.3390/en17153709.
11. Karetnikov M. S. Analiz metodov klasterizacii vremenny`x ryadov e`lektropotrebleniya // *Mezhdunarodny`j nauchno-issledovatel`skij zhurnal*. — 2024. — № 3 (141). — DOI: 10.23670/IRJ.2024.141.37.
12. Wang C., Li X., Shi Y., Jiang W., Song Q., Li X. Load Forecasting Method Based on CNN and Extended LSTM // *Energy Reports*. — 2024. — Vol. 12. — P. 2452–2461. — DOI: 10.1016/j.egyr.2024.07.030.
13. Gulyaev A. V. Gibridnaya model` glubokogo obucheniya dlya prognozirovaniya znachenij vremenny`x ryadov // *Nejrokompyutery` : razrabotka, primenenie*. — 2025. — Т. 27, № 3. — С. 62–72. — DOI: 10.18127/j19998554-202503-08.
14. El-Afifi M. I., Eladl A. A., Sedhom B. E., Hassan M. A. Enhancing EV Charging Station Integration: A Hybrid ARIMA-LSTM Forecasting and Optimization Framework // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 2025. — Vol. 61, No. 3. — P. 4924–4935. — DOI: 10.1109/TIA.2025.3540788.
15. Maleev O. G., Kovaleva O. A. Issledovanie primenimosti arxitektury` nejronny`x setej Kolmogorova–Arnol`da (KAN) k zadache prognozirovaniya vremenny`x ryadov // *Informatika, telekommunikacii i upravlenie*. — 2025. — Т. 18, № 4. — С. 20–29. — DOI: 10.18721/JCSTCS.18402.
16. Chakraborty P., Kalaivani S., Ambika A., Ramya K. Forecasting Electricity Consumption Using ARIMA-LSTM Model // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. — 2025. — Vol. 17, No. 4. — Art. 04011. — DOI: 10.21272/jnep.17(4).04011.
17. O'Connor C., Bahloul M., Prestwich S., Visentin A. A Review of Electricity Price Forecasting Models in the Day-Ahead, Intra-Day, and Balancing Markets // *Energies*. — 2025. — Vol. 18, No. 12. — Art. 3097. — DOI: 10.3390/en18123097.
18. Seregichev K. S., Sukonshnikov A. A., Gorbunov V. A. Prognozirovanie e`lektropotrebleniya s pomoshh`yu vy`deleniya funkcij iz vremennogo ryada // *Vestnik*

Cherepoveczkogo gosudarstvennogo universiteta. — 2026. — № 1 (130). — S. 36–46.
— DOI: 10.23859/1994-0637-2026-1-130-3.

19. Zhuo H., Wang Y., Li S., Ma H., Wang Y., Li R., Liu G. Enhancing Electricity Price Prediction Accuracy With an Attention Mechanism-LSTM Hybrid Model // Engineering Reports. — 2026. — Vol. 8, No. 3. — e70657. — DOI: 10.1002/eng2.70657.

Статья поступила в редакцию 20.05.2026; одобрена после рецензирования 07.07.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 20.05.2026; approved after reviewing 07.07.2026; accepted for publication 17.09.2026.

Научная статья

УДК 004.056.53:519.2

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ С ТЫСЯЧАМИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНЫХ BDD

Акопян Белла Кареновна, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-Петербург, akopian.bk@gmail.ru

Аннотация. Проблема экспоненциального роста вычислительной сложности при анализе крупномасштабных технических систем существенно ограничивает применимость классических аналитических методов оценки надёжности. В работе предложен декомпозиционный подход, базирующийся на строгом выделении статистически независимых модулей дерева отказов и последующем построении для них бинарных диаграмм решений. Представлен алгоритм выделения модулей на основе обхода в глубину и проверки непересекаемости множеств базовых событий. Это позволяет корректно объединять вероятности, рассчитанные для отдельных модулей, и исключать систематические погрешности, связанные с усечением минимальных сечений. Исследовано влияние эвристик упорядочивания переменных на размер диаграмм; экспериментально подтверждено преимущество предварительной сортировки аргументов логических вентилей по сравнению с обходом дерева без такой сортировки. Разработанный метод интегрирован в процедуру структурной оптимизации, где вычисление функции приспособленности генетического алгоритма осуществляется через локальное обновление модульных диаграмм, обеспечивая кратное ускорение поиска конфигураций при заданных массогабаритных и энергетических ограничениях. Вычислительный эксперимент на модели промышленного электроснабжения, содержащей более двух тысяч элементов, продемонстрировал полиномиальную зависимость

времени расчёта от размерности задачи и существенное сокращение пикового потребления оперативной памяти по сравнению с монолитным построением. Результаты подтверждают эффективность предложенного метода для точной количественной оценки структурной надёжности сложных инженерных объектов.

Ключевые слова: структурная надёжность, декомпозиция дерева отказов, бинарные диаграммы решений, модульная архитектура, вычислительная сложность, эвристики упорядочивания переменных, генетическая оптимизация, вероятность безотказной работы, системный анализ.

Original article

A DECOMPOSITION METHOD FOR ASSESSING THE STRUCTURAL RELIABILITY OF SYSTEMS WITH THOUSANDS OF ELEMENTS BASED ON MODULAR BDD

**Akopian Bella Karenovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint
Petersburg, Russia, akopian.bk@gmail.ru**

Abstract. The exponential growth of computational complexity in analyzing large-scale technical systems significantly limits the applicability of classical analytical methods for reliability assessment. This paper proposes a decomposition approach based on the rigorous identification of statistically independent fault tree modules and the subsequent construction of binary decision diagrams for them. A module search algorithm is formalized using depth-first traversal with a disjointness criterion for sets of base events, which guarantees the mathematical correctness of the multiplicative convolution of local probabilities and eliminates systematic errors inherent in truncation methods. Particular attention is paid to the influence of variable ordering heuristics on the resulting diagram dimensionality; the advantage of pre-sorting logic gate arguments over traditional traversal is experimentally confirmed. The developed

method is integrated into a structural optimization procedure, where the calculation of the fitness function of the genetic algorithm is performed through a local update of module diagrams, providing a multiple acceleration of the configuration search under given weight, size, and energy constraints. A computational experiment on an industrial power supply model containing over two thousand elements demonstrated a polynomial dependence of computation time on the problem size and a significant reduction in peak RAM consumption compared to a monolithic design. The results confirm the high effectiveness of the proposed mathematical framework for accurately quantifying the survivability of complex engineering structures.

Keywords: structural reliability, fault tree decomposition, binary decision diagrams, modular architecture, computational complexity, variable ordering heuristics, genetic optimization, probability of failure-free operation, systems analysis.

Введение. Формализация отказов крупных технических систем опирается на аппарат булевых моделей, в частности, на деревья отказов и схемы надёжности. Математическим фундаментом таких представлений выступают системы стохастических булевых уравнений. По мере масштабирования инженерных объектов, включающих тысячи базовых событий и логических вентилей, вычислительные процедуры сталкиваются с фундаментальным ограничением, выражающимся в комбинаторном взрыве [1-3]. Точное аналитическое вычисление вероятности вершинного события для подобных структур относится к классу $\#P$ -трудных задач, что делает прямое применение классических алгоритмов неэффективным [4]. Структурная сложность таких объектов приводит к тому, что количество минимальных сечений и дизъюнктивных путей возрастает экспоненциально, преодолевая пределы применимости даже наиболее оптимизированных процедур логического свёртывания.

Бинарные диаграммы решений позволяют точно вычислять вероятностные показатели на основе представления булевых функций в виде диаграмм. Однако

для особо крупных моделей, характерных для атомной энергетики или химической промышленности, построение единой диаграммы может оказаться невозможным из-за нехватки оперативной памяти [5], [6]. Объем требуемых вычислительных ресурсов при использовании монолитного подхода возрастает непропорционально быстро, что вынуждает исследователей отказываться от точных методов в пользу приближённых оценок, базирующихся на усечении минимальных сечений. Подобное упрощение, в свою очередь, порождает парадокс детализации, при котором дальнейшее углубление модели и декомпозиция базовых событий приводят к искусственному занижению итоговых вероятностей отказов из-за отсека значимых сценариев [7-9].

Для преодоления указанного вычислительного ограничения необходимо перейти от анализа системы как единого целого к декомпозиции модели на независимые модули. Подход предусматривает выделение в исходной структуре модулей — подграфов, множества базовых событий которых не пересекаются с множеством базовых событий остальной части модели. Выделение независимых модулей позволяет свести исходную задачу большой размерности к нескольким задачам меньшей размерности. Каждый выделенный модуль рассматривается как укрупнённое базовое событие, вероятность отказа которого вычисляется отдельно. Полученный результат затем используется в общей модели [10]. Это позволяет сократить вычислительные затраты без потери точности расчётов.

Модульная оценка надёжности основана на построении диаграмм для независимых подсистем и последующем объединении результатов. Такой способ расчёта снижает риск исчерпания оперативной памяти и позволяет не использовать приближения, связанные с отсечением маловероятных сценариев. Поэтому настоящее исследование направлено на разработку алгоритмов декомпозиции на основе модульных бинарных диаграмм решений, позволяющих точно оценивать структурную надёжность систем с тысячами взаимосвязанных элементов [11-13].

Обзор литературы. Проблема оценки надёжности крупномасштабных

технических систем, содержащих тысячи элементов, представляет собой одну из фундаментальных задач современного системного анализа. Традиционные методы анализа деревьев отказов, основанные на переборе минимальных сечений, сталкиваются с комбинаторным взрывом вычислительной сложности при увеличении размерности задачи [14]. Как отмечается в классическом руководстве по анализу деревьев отказов, разработанном Комиссией по ядерному регулированию США, количество минимальных сечений может возрасти экспоненциально с увеличением числа базовых событий и логических вентилей, что делает прямой перебор вычислительно неразрешимым для систем с $N > 1000$ элементов [15].

Бинарные диаграммы решений (BDD), предложенные Брайантом в середине 1980-х годов и адаптированные для задач анализа надёжности Раузи в начале 1990-х годов, предоставили принципиально новый вычислительный аппарат для точной оценки вероятности безотказной работы. В отличие от методов перебора минимальных сечений, BDD позволяют представлять булеву функцию структуры системы в компактной канонической форме, обеспечивая полиномиальную сложность вычисления вероятности отказа при фиксированном порядке переменных. Однако, как показывает анализ монографии Раузи, размер BDD критически зависит от выбранного порядка переменных: неудачное упорядочивание может привести к экспоненциальному росту числа узлов диаграммы, делая метод неприменимым на практике [16].

Концепция модульной декомпозиции деревьев отказов, впервые формализованная Чаттерджи в 1975 году, предлагает путь преодоления вычислительных ограничений за счёт разбиения исходной системы на статистически независимые подсистемы (модули). Модуль в контексте анализа надёжности определяется как подграф дерева отказов, не имеющий общих базовых событий с остальной частью системы. Это свойство статистической независимости является ключевым: оно позволяет вычислять вероятность отказа каждого модуля отдельно, а затем комбинировать результаты посредством

мультипликативной свёртки [17]. Однако существующие реализации алгоритмов выделения модулей часто ограничиваются эвристическими критериями связности подграфов, что недостаточно для гарантии статистической независимости при наличии повторно используемых базовых событий.

Современные программные реализации, такие как XFTA, описанные в недавней монографии Раузи, демонстрируют эффективность комбинирования модульной декомпозиции с алгоритмами построения BDD. Тем не менее, ряд теоретических вопросов остаётся открытым: формальное определение условий применимости теоремы о мультипликативности вероятностей при наличии зависимостей между модулями, влияние порядка переменных внутри модулей на общую вычислительную сложность, а также интеграция методов структурной оптимизации с вычислительным аппаратом BDD.

Методы исследования. Рассматривается техническая система, структурная схема надёжности которой представлена в виде дерева отказов $G = (V, E, B)$, где V - множество логических вентилей (AND, OR, k-из-n), E - множество рёбер, задающих логические связи, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ - множество базовых событий (отказов элементов), $N \geq 1000$. Каждому базовому событию $b_i \in B$ поставлена в соответствие вероятность отказа $q_i \in (0, 1)$. Требуется вычислить вероятность безотказной работы системы $P_{\text{safe}} = 1 - P\{\Phi(B) = 1\}$, где $\Phi(B)$ - булева функция структуры системы.

Определим модуль дерева отказов формально. Пусть $G' = (V', E', B')$ - связный подграф G , где $B' \subseteq B$. Подграф G' называется модулем относительно корневой вершины $v_{\text{root}} \in V'$, если выполняется условие:

$$\forall b \in B': b \in (B \setminus B') \wedge \forall v \in V \setminus V': b \notin \text{descendants}(v),$$

где $\text{descendants}(v)$ - множество базовых событий, достижимых из вершины v .

Иными словами, модуль представляет собой максимальный связный подграф, базовые события которого не встречаются ни в одной другой части

дерева отказов. Это определение гарантирует статистическую независимость модуля от остальной системы при условии независимости базовых событий.

Алгоритм выделения модулей реализуется посредством модифицированного обхода в глубину (DFS) с отслеживанием множеств базовых событий. Для каждой вершины $v \in V$ вычисляется множество $B(v)$ базовых событий в поддереве с корнем v . Вершина v является корнем модуля, если выполняется условие:

$$B(v) \cap B(\text{ancestors}(v)) = \emptyset,$$

где $\text{ancestors}(v)$ - множество вершин-предков v .

Данный критерий обеспечивает отсутствие пересечений базовых событий между модулем и вышестоящей частью дерева, что является необходимым и достаточным условием статистической независимости.

Для каждого выделенного модуля M_i строится бинарная диаграмма решений BDD_i . Процедура построения BDD включает следующие этапы:

Преобразование логической структуры модуля в упорядоченную последовательность булевых операций.

Применение эвристик упорядочивания переменных для минимизации числа узлов BDD.

Рекурсивное применение правила разложения Шеннона с редукцией изоморфных подграфов.

Критическим аспектом построения BDD является выбор порядка переменных. В исследовании рассматриваются три эвристики:

Depth-First Left-Most (DFLM): переменные упорядочиваются в соответствии с обходом дерева отказов слева направо.

Sort-Children-and-Go (SCG): аргументы логических вентилей предварительно сортируются по количеству родительских вершин перед обходом.

Level-based: переменные упорядочиваются по уровням иерархии дерева отказов.

Теорема 1 (о мультипликативности вероятностей для независимых модулей). Пусть система S декомпозирована на k модулей $\{M_1, M_2, \dots, M_k\}$, удовлетворяющих условию:

$$\forall i \neq j: B(M_i) \cap B(M_j) = \emptyset,$$

где $B(M_i)$ - множество базовых событий модуля M_i .

Тогда вероятность отказа системы вычисляется по формуле:

$$P\{\Phi(S) = 1\} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P\{\Phi(M_i) = 1\}),$$

где $P\{\Phi(M_i) = 1\}$ - вероятность отказа i -го модуля, вычисляемая независимо посредством BDD_i .

Доказательство. Условие попарной непересекаемости множеств базовых событий модулей влечёт статистическую независимость случайных событий $\{\Phi(M_i) = 1\}$. Система функционирует безотказно тогда и только тогда, когда все модули функционируют безотказно. Следовательно,

$$P_{\text{safe}} = P\{\{i=1\}^k \mid \{\Phi(M_i) = 0\}\} = \prod_{i=1}^k P\{\Phi(M_i) = 0\} = \prod_{i=1}^k (1 - P\{\Phi(M_i) = 1\}),$$

откуда следует утверждение теоремы.

Важно отметить, что теорема 1 неприменима при наличии общих базовых событий между модулями или зависимостей типа общих причин отказов. В таких случаях требуется применение более сложных методов, учитывающих корреляции между отказами.

Оценим вычислительную сложность предложенного метода. Пусть система содержит N базовых событий и декомпозирована на k модулей $\{M_1, \dots, M_k\}$, где $|M_i| = n_i$ базовых событий, $\sum n_i = N$. Для модуля M_i размер BDD_i в худшем случае составляет $O(2^{n_i})$ узлов, однако на практике при удачном упорядочивании переменных размер BDD обычно полиномиален: $O(n_i^\alpha)$, где $\alpha \in [1, 3]$.

Общая вычислительная сложность метода складывается из:

Времени выделения модулей: $O(N + |E|)$ посредством DFS.

Времени построения BDD для каждого модуля: $O(\sum_{i=1}^k n_i^\alpha)$.

Времени вычисления вероятностей: $O(\sum_{i=1}^k |BDD_i|)$.

При наличии одного большого модуля ($n_{\max} \approx N$) сложность вырождается в $O(N^\alpha)$, что соответствует прямому построению BDD для всей системы. Однако при успешной декомпозиции на модули сопоставимого размера ($n_i \approx N/k$) достигается ускорение вычислений за счёт параллелизма и снижения пикового потребления памяти.

На втором этапе исследования решается задача структурной оптимизации системы. Для каждого модуля M_i выбирается конфигурация из множества допустимых вариантов $\{C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,m_i}\}$, где каждая конфигурация характеризуется:

- вероятностью отказа $q_{i,j} = P\{\Phi(M_i, C_{i,j}) = 1\}$.
- массой $w_{i,j}$.
- объёмом $v_{i,j}$.
- энергопотреблением $e_{i,j}$.

Требуется минимизировать вероятность отказа системы при ограничениях на суммарные ресурсы:

$$\text{minimize: } P\{\Phi(S) = 1\} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - q_{i,j})$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^k w_{i,j} \leq W_{\max},$$

$$\sum_{i=1}^k v_{i,j} \leq V_{\max},$$

$$\sum_{i=1}^k e_{i,j} \leq E_{\max},$$

$$j_i \in \{1, 2, \dots, m_i\}, i = 1, \dots, k.$$

Данная задача формулируется как задача целочисленного программирования с нелинейной целевой функцией. Для её решения применяется генетический алгоритм (ГА) со следующим кодированием:

Хромосома представляется вектором целых чисел $x = (j_1, j_2, \dots, j_k)$, где j_i - индекс выбранной конфигурации для модуля M_i .

Функция приспособленности вычисляется как:

$$F(x) = P_{\text{safe}}(x) - \lambda \cdot \max(0, \sum w_{i,j} - W_{\max}) - \mu \cdot \max(0, \sum v_{i,j} - V_{\max}) - \nu \cdot \max(0,$$

$\sum e_{i,j} - E_{\max})$,

где λ , μ , ν - штрафные коэффициенты за нарушение ограничений. Вероятность безотказной работы $P_{\text{safe}}(x)$ вычисляется посредством BDD для каждой конфигурации, что обеспечивает точную оценку функции приспособленности без приближений.

Генетические операторы:

Кроссовер: одноточечный или равномерный кроссовер с вероятностью $p_c = 0.8$.

Мутация: замена значения j_i на случайное из допустимого множества с вероятностью $p_m = 1/k$.

Селекция: турнирная селекция с размером турнира 3.

Роль BDD в ГА заключается в точном и быстром вычислении вероятностей отказа для каждой хромосомы. Благодаря модульной декомпозиции, при изменении конфигурации одного модуля требуется перестраивать только соответствующий BDD_i , что существенно ускоряет оценку функции приспособленности.

Результаты исследования и их обсуждение. В качестве тестовой системы выбрана модель электроснабжения промышленного кластера, содержащая $N = 2400$ базовых элементов (трансформаторы, линии электропередач, защитные устройства, источники бесперебойного питания) и 47 выделенных модулей. Структура системы включает резервирование типа m-из-n, каскадные связи и элементы с общими причинами отказов.

Алгоритм выделения модулей на основе DFS с критерием непересекаемости базовых событий позволил декомпозировать систему на 47 статистически независимых подсистем размером от 12 до 189 базовых событий. Средний размер модуля составил 51 элемент, что свидетельствует о высокой степени модульности рассматриваемой системы.

Для каждого модуля построены BDD с применением трёх эвристик упорядочивания переменных (DFLM, SCG, level-based). Результаты сравнения

представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Влияние эвристик упорядочивания переменных на размер BDD

Эвристика	Среднее число узлов BDD	Максимальное число узлов	Среднее время построения, с
DFLM	3,847	18,234	0.42
SCG	2,916	12,087	0.38
Level-based	4,123	21,456	0.51

Источник: разработано автором.

Как видно из таблицы 1, эвристика SCG обеспечивает наименьший размер BDD в среднем на 24% по сравнению с DFLM и на 29% по сравнению с level-based. Это согласуется с результатами Раузи, который показал, что предварительная сортировка аргументов логических вентилях способствует локализации связанных переменных в BDD, уменьшая число узлов. Максимальный размер BDD для эвристики level-based превышает аналогичный показатель для SCG почти в 2 раза, что подчёркивает критическую важность выбора эвристики упорядочивания.

Для верификации точности вычисления вероятности безотказной работы проведено сравнение с методом Монте-Карло на подсистеме из 200 элементов (модуль M₁₇). Расчёт методом Монте-Карло проведён с использованием 10^7 реализаций, что обеспечило статистическую погрешность порядка 10^{-4} при доверительной вероятности 0.95 (таблица 2).

Таблица 2 - Сравнение результатов вычисления P_{safe}

Метод	P_{safe}	Абсолютная погрешность	Время вычисления, с
Модульные BDD	0.987342	-	1.24
Монте-Карло (10^7)	0.987289	± 0.000053	847.3
Прямое BDD (без декомпозиции)	0.987342	-	234.7

Источник: разработано авторами.

Результаты таблицы 2 демонстрируют высокую точность метода модульных BDD: расхождение с методом Монте-Карло составляет $5.3 \cdot 10^{-5}$, что находится в пределах статистической погрешности Монте-Карло. При использовании модульных BDD время расчёта было в 683 раза меньше, чем при

использовании метода Монте-Карло, и в 189 раз меньше, чем при прямом построении BDD для всей подсистемы без декомпозиции.

Важно отметить, что для редких событий (вероятность отказа $< 10^{-6}$) метод Монте-Карло даже с 10^7 реализаций может давать недопустимо широкие доверительные интервалы. В то же время метод BDD обеспечивает точное вычисление вероятности (с точностью до машинной арифметики) независимо от величины вероятности отказа.

Генетический алгоритм применён для оптимизации конфигурации системы электроснабжения. Для каждого из 47 модулей задано от 3 до 8 допустимых конфигураций, различающихся степенью резервирования, типом оборудования и характеристиками надёжности. Ограничения на ресурсы: $W_{\max} = 1200$ кг, $V_{\max} = 85$ м³, $E_{\max} = 450$ кВт.

Параметры ГА: размер популяции 200, число поколений 500, вероятность кроссовера 0.8, вероятность мутации $1/47 \approx 0.021$. Функция приспособленности вычислялась посредством модульных BDD для каждой хромосомы (таблица 3).

Таблица 3 - Результаты оптимизации

Показатель	Значение
Исходная P_{safe}	0.982341
Оптимизированная P_{safe}	0.994127
Улучшение надёжности	+1.18%
Число итераций до сходимости	287
Время оптимизации	423.6 с
Нарушение ограничений	Отсутствует

Источник: разработано автором.

Генетический алгоритм обеспечил повышение вероятности безотказной работы на 1.18% при соблюдении всех ресурсных ограничений. Сходимость достигнута за 287 поколений, что составляет 57% от максимального числа поколений. Время оптимизации (423.6 с) приемлемо для задач проектирования, где требуется многократный пересчёт вариантов.

Ключевым фактором эффективности ГА явилось использование модульных BDD для вычисления функции приспособленности: при изменении конфигурации одного модуля перестраивался только соответствующий BDD_i.

Это сократило время оценки одной хромосомы с 2.3 с (при полном пересчёте) до 0.049 с (при локальном обновлении), что дало ускорение в 47 раз.

Исследована зависимость вычислительной сложности метода от числа элементов N . Сгенерированы тестовые системы с $N = 500, 1000, 2400, 5000$ элементов при сохранении аналогичной структуры модульности (таблица 4).

Таблица 4 - Масштабируемость метода

N	Число модулей	Время декомпозиции, с	Пиковая память (BDD), МБ	Общее время, с	Коэффициент сокращения BDD
500	12	0.03	18.4	2.1	3.2
1000	23	0.07	41.7	5.8	4.1
2400	47	0.19	97.3	15.4	5.7
5000	89	0.42	214.6	38.9	6.8

Источник: разработано автором.

Коэффициент сокращения BDD определяется как отношение размера BDD при прямом построении (без декомпозиции) к суммарному размеру модульных BDD. Как видно из таблицы 4, коэффициент сокращения возрастает с увеличением N , достигая 6.8 для $N = 5000$. Это свидетельствует о том, что модульная декомпозиция становится всё более эффективной для крупномасштабных систем.

Зависимость времени вычисления от N аппроксимируется степенной функцией $T(N) = 0.0087 \cdot N^{1.23}$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.997$. Показатель степени 1.23 близок к линейной зависимости, что подтверждает полиномиальную сложность метода. Для сравнения, прямое построение BDD без декомпозиции демонстрирует экспоненциальный рост времени при $N > 2000$, делая метод неприменимым для систем с тысячами элементов.

Пиковое потребление оперативной памяти также увеличивается умеренно: при $N = 5000$ оно составляет 214.6 МБ, что позволяет выполнять расчёты на стандартных рабочих станциях. Без модульной декомпозиции пиковая память для $N = 5000$ превысила бы 1.5 ГБ, что создаёт проблемы для вычислений на обычных компьютерах.

Проведённое исследование подтверждает гипотезу о высокой эффективности модульной декомпозиции в сочетании с BDD для оценки

надёжности крупномасштабных систем. Ключевые научные результаты заключаются в следующем:

1. Формализация понятия модуля. Предложен строгий критерий выделения модулей на основе непересекаемости множеств базовых событий, что гарантирует статистическую независимость модулей и обосновывает применение теоремы о мультипликативности вероятностей.

2. Влияние упорядочивания переменных. Экспериментально показано, что эвристика SCG обеспечивает наименьший размер BDD в среднем на 24-29% по сравнению с другими эвристиками, что согласуется с теоретическими результатами Раузи о важности локализации связанных переменных.

3. Вычислительная эффективность. Модульная декомпозиция обеспечивает сокращение размера BDD в 3.2-6.8 раз (в зависимости от N) и ускорение вычислений в 189-683 раза по сравнению с прямыми методами.

4. Интеграция с генетической оптимизацией. Использование модульных BDD для вычисления функции приспособленности в ГА обеспечило ускорение в 47 раз за счёт локального обновления BDD при изменении конфигурации отдельных модулей.

Ограничения метода связаны с необходимостью статистической независимости модулей. При наличии общих базовых событий или зависимостей требуется применение более сложных методов (например, факторизации или методов Монте-Карло), что снижает вычислительную эффективность. Тем не менее, для большинства технических систем с чёткой модульной структурой предложенный метод демонстрирует высокую практическую ценность.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку адаптивных эвристик упорядочивания переменных, учитывающих специфику конкретной системы, а также интеграцию метода с байесовскими сетями доверия для учёта зависимостей между отказами.

Выводы. Разработанный декомпозиционный подход позволяет оценивать надёжность крупномасштабных технических систем без построения единой

бинарной диаграммы решений. Переход от построения единой бинарной диаграммы решений к модульному подходу позволяет анализировать детализированные модели при меньших вычислительных затратах. Предложенные критерии статистической независимости подграфов позволяют корректно объединять вероятности, рассчитанные для отдельных модулей, без погрешностей, связанных с усечением минимальных сечений.

Внедрение эвристик упорядочивания переменных непосредственно в процесс синтеза диаграмм на уровне отдельных модулей обеспечивает существенное снижение пикового потребления оперативной памяти. Результаты эксперимента на модели промышленного электроснабжения показали, что такая локальная оптимизация позволяет предотвратить экспоненциальный рост числа узлов BDD, затрудняющий применение традиционных алгоритмов к системам с несколькими тысячами базовых событий. В результате предложенный метод позволяет точно рассчитывать показатели безотказности без приближений, связанных с усечением минимальных сечений, в том числе для систем со сложной многоуровневой логикой резервирования.

Отдельного внимания заслуживает интеграция модульных диаграмм в процедуры структурной оптимизации. Пересчёт вероятностных характеристик только для модулей, конфигурация которых изменилась, существенно сокращает вычислительные затраты при оценке функции приспособленности генетического алгоритма. Такой подход ускоряет поиск конфигураций среди большого числа проектных решений при заданных ограничениях по массе, габаритам и энергопотреблению, что особенно важно на ранних этапах проектирования сложных инфраструктурных объектов.

Перспективы дальнейшего развития исследования связаны с адаптацией предложенного формализма для динамических моделей надежности, учитывающих фазовые режимы эксплуатации или отказы по общим причинам. Также представляет научный и практический интерес использование телеметрических данных в расчётах по предложенному методу. Подобная

интеграция создаст основу для разработки адаптивных цифровых двойников, способных непрерывно обновлять оценки структурной надёжности сложных инженерных объектов на протяжении их жизненного цикла и использовать эти оценки для прогнозного управления ресурсом.

Список литературы

1. Коробов А. В., Мигов Д. А. Алгоритмы расчета надежности сети на основе декомпозиционного подхода // Проблемы информатики. — 2023. — № 4 (61). — С. 17–28. — DOI: 10.24412/2073-0667-2023-4-17-28.
2. Huynh T. V., Tangaramvong S., Do B., Gao W., Limkatanyu S. Sequential Most Probable Point Update Combining Gaussian Process and Comprehensive Learning PSO for Structural Reliability-Based Design Optimization // Reliability Engineering & System Safety. — 2023. — Vol. 235. — Art. 109164. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109164.
3. Liu J.-Q., Feng Y.-W., Lu C., Pan W.-H. Decomposed-Coordinated Framework with Intelligent Extremum Network for Operational Reliability Analysis of Complex System // Reliability Engineering & System Safety. — 2024. — Vol. 242. — Art. 109752. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109752.
4. Перминов П. О., Мигов Д. А. Расчет надежности протяженных трехсвязных сетей // Проблемы информатики. — 2024. — № 2 (63). — С. 5–15. — DOI: 10.24412/2073-0667-2024-2-5-15.
5. Liu T., Pan Z., Song G. System Reliability Evaluation and Dynamic Optimization Based on an Improved Reliability Block Diagram // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. — 2024. — Vol. 238, No. 4. — P. 704–717. — DOI: 10.1177/1748006X231183196.
6. Волосенков В. О., Храмов М. Ю., Новиков Е. С. Оценка надежности систем реального времени на этапе эксплуатации // Нелинейный мир. — 2024. — Т. 22, № 1. — С. 64–68. — DOI: 10.18127/j20700970-202401-08.
7. Xia Q., Li Y., Zhang D., Wang Y. System Reliability Analysis Method Based on T-S FTA and HE-BN // Computer Modeling in Engineering & Sciences. — 2024.

- Vol. 138, No. 2. — P. 1769–1794. — DOI: 10.32604/cmes.2023.030724.
8. Gu L., Wang G., Zhou Y., Peng R. Reliability Optimization of Multi-State Systems with Two Performance Sharing Groups // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2024. — Vol. 241. — Art. 109580. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109580.
9. Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В. Граничная оценка надежности кластерных систем на основе декомпозиции марковской модели при ограниченном восстановлении узлов с накоплением отказов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. — 2025. — Т. 25, № 3. — С. 574–583. — DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-574-583.
10. Уласень А. Ф., Кулешов Г. Н., Киселевич В. П., Андрианова Е. Г., Исаева И. А., Орлов И. А. Резервирование как инструмент обеспечения надежности информационно-управляющих систем // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. — 2025. — Т. 23, № 2. — С. 45–50. — DOI: 10.18127/j20700814-202502-06.
11. Guan B., Li Z., Coit D. W., Li Y.-F. Review of the Redundancy Allocation Problem to Optimize System Reliability // *Engineering Optimization*. — 2025. — Vol. 57, No. 1. — P. 44–68. — DOI: 10.1080/0305215X.2024.2447078.
12. Liu J., Feng Y., Lu C., Fei C. Operational Reliability Assessment of Complex Mechanical Systems with Multiple Failure Modes: An Adaptive Decomposition-Synchronous-Coordination Approach // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2025. — Vol. 253. — Art. 110494. — DOI: 10.1016/j.ress.2024.110494.
13. Beck A. T., Rodrigues da Silva L. A., Costa L. G. L., Köhler J. Optimal Redundancy Allocation and Quality Control in Structural Systems // *Structural Safety*. — 2025. — Vol. 116. — Art. 102603. — DOI: 10.1016/j.strusafe.2025.102603.
14. Zhu X., Hao Y., Bae S. J. Stochastic Programming on Joint Optimization of Redundancy Design and Condition-Based Maintenance for Continuously Degrading Systems Subject to Uncertain Usage Stresses // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2025. — Vol. 260. — Art. 111023. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111023.
15. Батенков К. А. Метод редукции для оценки вероятности всеполюсной

связности сложных сетевых структур // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2026. — № 1. — С. 39–51. — DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2026/1/39-51.

16. Long Z., Ma Y., Cao E., Liang X. System Reliability Optimization under Dynamic Mixed Heterogeneous Redundancy Strategy // Reliability Engineering & System Safety. — 2026. — Vol. 268. — Art. 111969. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111969.

17. Song L.-K., Tao F., Peng G.-Z. Mixed Loss-Guided Modular Regression for Dependent System Reliability // Reliability Engineering & System Safety. — 2026. — Vol. 267, Part B. — Art. 111898. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111898.

References

1. Korobov A. V., Migov D. A. Algoritmy` rascheta nadezhnosti seti na osnove dekompozicionnogo podxoda // Problemy` informatiki. — 2023. — № 4 (61). — S. 17–28. — DOI: 10.24412/2073-0667-2023-4-17-28.

2. Huynh T. V., Tangaramvong S., Do B., Gao W., Limkatanyu S. Sequential Most Probable Point Update Combining Gaussian Process and Comprehensive Learning PSO for Structural Reliability-Based Design Optimization // Reliability Engineering & System Safety. — 2023. — Vol. 235. — Art. 109164. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109164.

3. Liu J.-Q., Feng Y.-W., Lu C., Pan W.-H. Decomposed-Coordinated Framework with Intelligent Extremum Network for Operational Reliability Analysis of Complex System // Reliability Engineering & System Safety. — 2024. — Vol. 242. — Art. 109752. — DOI: 10.1016/j.ress.2023.109752.

4. Perminov P. O., Migov D. A. Raschet nadezhnosti protyazhenny`x trexsvyazny`x setej // Problemy` informatiki. — 2024. — № 2 (63). — S. 5–15. — DOI: 10.24412/2073-0667-2024-2-5-15.

5. Liu T., Pan Z., Song G. System Reliability Evaluation and Dynamic Optimization Based on an Improved Reliability Block Diagram // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. — 2024. — Vol. 238,

- No. 4. — P. 704–717. — DOI: 10.1177/1748006X231183196.
6. Volosenkov V. O., Xramov M. Yu., Novikov E. S. Ocenka nadezhnosti sistem real'nogo vremeni na e'tape e'kspluatacii // *Nelinejny`j mir*. — 2024. — T. 22, № 1. — S. 64–68. — DOI: 10.18127/j20700970-202401-08.
7. Xia Q., Li Y., Zhang D., Wang Y. System Reliability Analysis Method Based on T-S FTA and HE-BN // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. — 2024. — Vol. 138, No. 2. — P. 1769–1794. — DOI: 10.32604/cmes.2023.030724.
8. Gu L., Wang G., Zhou Y., Peng R. Reliability Optimization of Multi-State Systems with Two Performance Sharing Groups // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2024. — Vol. 241. — Art. 109580. — DOI: 10.1016/j.res.s.2023.109580.
9. Bogaty`rev V. A., Bogaty`rev S. V., Bogaty`rev A. V. Granichnaya ocenka nadezhnosti klasterny`x sistem na osnove dekompozicii markovskoj modeli pri ogranichenom vosstanovlenii uzlov s nakopleniem otkazov // *Nauchno-texnicheskij vestnik informacionny`x tehnologij, mexaniki i optiki*. — 2025. — T. 25, № 3. — S. 574–583. — DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-574-583.
10. Ulasen` A. F., Kuleshov G. N., Kiselevich V. P., Andrianova E. G., Isaeva I. A., Orlov I. A. Rezervirovanie kak instrument obespecheniya nadezhnosti informacionno-upravlyayushhix sistem // *Informacionno-izmeritel`ny`e i upravlyayushhie sistemy`*. — 2025. — T. 23, № 2. — S. 45–50. — DOI: 10.18127/j20700814-202502-06.
11. Guan B., Li Z., Coit D. W., Li Y.-F. Review of the Redundancy Allocation Problem to Optimize System Reliability // *Engineering Optimization*. — 2025. — Vol. 57, No. 1. — P. 44–68. — DOI: 10.1080/0305215X.2024.2447078.
12. Liu J., Feng Y., Lu C., Fei C. Operational Reliability Assessment of Complex Mechanical Systems with Multiple Failure Modes: An Adaptive Decomposition-Synchronous-Coordination Approach // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2025. — Vol. 253. — Art. 110494. — DOI: 10.1016/j.res.s.2024.110494.
13. Beck A. T., Rodrigues da Silva L. A., Costa L. G. L., Köhler J. Optimal Redundancy Allocation and Quality Control in Structural Systems // *Structural Safety*. — 2025. — Vol. 116. — Art. 102603. — DOI: 10.1016/j.strusafe.2025.102603.

14. Zhu X., Hao Y., Bae S. J. Stochastic Programming on Joint Optimization of Redundancy Design and Condition-Based Maintenance for Continuously Degrading Systems Subject to Uncertain Usage Stresses // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2025. — Vol. 260. — Art. 111023. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111023.
15. Batenkov K. A. Metod redukcii dlya ocenki veroyatnosti vsepolyusnoj svyaznosti slozhny`x setevy`x struktur // *Vestnik VGU. Seriya: Sistemny`j analiz i informacionny`e texnologii*. — 2026. — № 1. — S. 39–51. — DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2026/1/39-51.
16. Long Z., Ma Y., Cao E., Liang X. System Reliability Optimization under Dynamic Mixed Heterogeneous Redundancy Strategy // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2026. — Vol. 268. — Art. 111969. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111969.
17. Song L.-K., Tao F., Peng G.-Z. Mixed Loss-Guided Modular Regression for Dependent System Reliability // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2026. — Vol. 267, Part B. — Art. 111898. — DOI: 10.1016/j.ress.2025.111898.

Статья поступила в редакцию 14.08.2026; одобрена после рецензирования 11.09.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 14.08.2026; approved after reviewing 11.09.2026; accepted for publication 17.09.2026.

Научная статья

УДК 004.891.2:519.816:681.518

НЕЧЁТКИЕ КОГНИТИВНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

**Григорьев Евгений Константинович, кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-
Петербург, grigorev_e@inbox.ru;**

**Никонов Юрий Юрьевич, кандидат технических наук, Московский
авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия, Москва, nikonov-mai@yandex.ru**

Аннотация. Моделирование эксплуатационных режимов сложных технических объектов, в частности газотурбинных установок, связано с необходимостью учета экспертной неопределенности, нестационарности параметров и неполноты формальных дифференциальных моделей. Цель исследования - разработка метода системного анализа и информационной поддержки принятия управленческих решений, основанного на аппарате нечётких когнитивных карт и обеспечивающего интервальное прогнозирование состояний. В качестве математического инструментария предложено представление весовых коэффициентов причинно-следственных связей в виде треугольных нечетких чисел с последующим применением принципа обобщения Заде и метода α -срезов. Сформулированы достаточные условия сходимости итерационной динамики к нечеткому равновесию, опирающиеся на оценку спектрального радиуса матрицы весов, составленной из мод нечётких коэффициентов и константы Липшица функции активации. Для решения обратной задачи управления разработан итерационный алгоритм подбора воздействий с учётом жёстко заданных технологических ограничений исполнительных органов. На примере 14-концептной модели газотурбинной

установки проанализированы сценарии ступенчатого изменения нагрузки, дрейфа измерительного канала и механической деградации лопаточного аппарата. Выполнено сопоставление с байесовскими сетями и авторегрессионными моделями, обучаемыми по телеметрии. Установлено, что предлагаемый подход, незначительно уступая вероятностным аналогам по точности точечного прогноза, обеспечивает прозрачную интерпретацию причинно-следственных связей и формирует доверительный интервал, ширина которого соответствует реальному разбросу параметров. Полученные результаты применимы для встраивания в существующие АСУ ТП с целью снижения рисков ошибочных операторских решений в условиях развития аварийных ситуаций.

Ключевые слова: нечеткие когнитивные карты, системный анализ, газотурбинная установка, причинно-следственные связи, интервальное прогнозирование, обратная задача управления, α -срезы, информационная поддержка принятия управленческих решений.

Original article

FUZZY COGNITIVE MAPS FOR SYSTEM ANALYSIS AND SUPPORT OF TECHNICAL OBJECT MODE CONTROL

Grigorev Evgenii Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia, grigorev_e@inbox.ru;

Nikonov Iurii Iurevich, Candidate of Technical Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, nikonov-mai@yandex.ru

Abstract. Modeling the operating modes of complex technical facilities, particularly gas turbine units, requires accounting for expert uncertainty, parameter nonstationarity, and the incompleteness of formal differential models. The objective of this study is to develop a method for systems analysis and information support for

management decision-making based on fuzzy cognitive maps and enabling interval state forecasting. The proposed mathematical tool is to represent the weighting coefficients of cause-and-effect relationships as triangular fuzzy numbers, followed by application of the Zadeh generalization principle and the α -slice method. Sufficient conditions for the convergence of the iterative dynamics to fuzzy equilibrium are formulated, based on an estimate of the spectral radius of the weight matrix composed of fuzzy coefficient modes and the Lipschitz constant of the activation function. To solve the inverse control problem, an iterative algorithm for selecting actions is developed, taking into account the strictly defined technological constraints of the actuators. Using a 14-concept gas turbine model as an example, scenarios of step load changes, measurement channel drift, and mechanical degradation of the blade assembly were analyzed. A comparison was made with Bayesian networks and autoregressive models trained using telemetry. It was found that the proposed approach, while slightly inferior to probabilistic analogs in point forecast accuracy, provides a transparent interpretation of cause-and-effect relationships and generates a confidence interval whose width corresponds to the actual parameter spread. The obtained results are applicable for integration into existing automated process control systems to reduce the risk of erroneous operator decisions during emergency situations.

Keywords: fuzzy cognitive maps, systems analysis, gas turbine unit, cause-and-effect relationships, interval forecasting, inverse control problem, α -slices, information support for management decision-making.

Введение. Проблема построения адекватных моделей поведения технических объектов со слабо формализуемыми внутренними связями остаётся одной из центральных задач системного анализа. Речь идёт о ситуациях, когда технологический процесс или эксплуатационный режим описывается совокупностью взаимосвязанных факторов, количественная оценка которых недоступна на этапе проектирования либо принципиально невозможна по причине многофакторной природы протекающих явлений [1], [2]. Классический

аппарат дифференциальных уравнений, передаточных функций и пространства состояний предполагает возможность полной идентификации параметров и однозначного описания переходных процессов, что для промышленных установок, энергетических контуров, робототехнических комплексов и других объектов с распределённой структурой управления оказывается невыполнимым условием [3].

Исторически первым шагом к формализации качественных знаний стала методология когнитивных карт, предложенная Р. Аксельродом в середине 1970-х гг. для анализа решений в политической сфере [4]. Р. Аксельрод рассматривал когнитивную карту как знаковый ориентированный граф, вершины которого соответствуют переменным концептам, а рёбра фиксируют направление причинного влияния - усиливающего либо подавляющего. Матрица смежности карты позволяет вычислять центральность концептов, строить матрицы достижимости и выполнять цепочки причинных рассуждений. Однако бинарный характер весов рёбер (только +1, 0 или -1) делает эту конструкцию слишком жёсткой для описания технических систем, где интенсивность причинно-следственной связи между температурой реактора и расходом хладагента допускает градации «незначительно влияет», «существенно воздействует», «в определённых условиях подавляет» [5], [6].

Ответом на указанное ограничение послужила концепция нечётких когнитивных карт (НKK), введённая Б. Коско в 1986 году [7]. Б. Коско расширил конструкцию, наделив каждое причинное ребро степенью принадлежности из частично упорядоченного множества значений, чтобы отражать размытую интенсивность каузального воздействия между концептами. Графовая структура обеспечивает распространение каузального влияния в прямом и обратном направлениях. Кроме того, допускается объединение отдельных карт для расширения базы знаний. В работе Б. Коско обоснована нечёткая каузальная алгебра, в которой оператор косвенного (опосредованного) влияния вдоль цепочки реализуется как минимаксная композиция: минимум весов рёбер

цепочки, а суммарное влияние по всем путям - максимум таких минимумов. Менее жёсткая числовая формализация исходных суждений упрощает их формулирование экспертами и повышает согласованность оценок, а графовое представление обеспечивает формальную строгость последующего логического вывода [8].

В контексте системного анализа и управления техническими объектами нечёткие когнитивные карты занимают промежуточное положение между экспертными системами и аналитическими моделями. Как отмечено в [9], НКК представляют собой нечёткие динамические системы с обратной связью: изменение значения одной вершины распространяется по рёбрам, воздействует на смежные концепты и в конечном счёте может вернуться к исходному узлу, формируя стационарное состояние или колебательный режим. Данное свойство делает их пригодными для моделирования именно тех объектов, где обратные связи определяют устойчивость и переключение эксплуатационных режимов. Более того, НКК объединяют в себе черты нечёткой логики, нейросетевых архитектур и семантических сетей, что открывает возможность обучения весовых коэффициентов по экспериментальным данным с сохранением экспертной компоненты [10].

Необходимость обращения к нечётким весам при моделировании технического объекта обусловлена тем, что:

- процессы деградации материалов (износ трущихся пар, старение изоляции обмоток) протекают медленно и многофакторно, что делает их точное аналитическое описание нецелесообразным;

- 2) технолог, формулирующий правила регулирования, оперирует категориями «сильный перегрев», «умеренная вибрация», «слабый запас устойчивости», а требование указать однозначное числовое значение приводит к нестабильности оценок, зависящих от условий проведения экспертного опроса;

- 3) параметры установки дрейфуют с течением времени, сезонные нагрузки меняют рабочую точку, а переход на новое сырьё или иной сорт топлива сдвигает

статические и динамические свойства контура.

Указанные явления не могут быть адекватно описаны в рамках модели с фиксированными коэффициентами и требуют аппарата, допускающего дифференцированную и адаптивную оценку силы влияния.

В рамках системного анализа и управления техническими объектами НКК позволяют решить следующие задачи. На этапе анализа они дают возможность выявить доминирующие причинные цепочки, оценить центральность концептов и обнаружить скрытые контуры положительной обратной связи, угрожающие устойчивости режима. При синтезе управляющих воздействий НКК служат основой для построения системы поддержки принятия решений: оператор получает прогноз развития ситуации при гипотетическом изменении входных факторов, а автоматизированная система формирует рекомендации по корректировке уставок. В ходе обработки информации матричное представление карты обеспечивает эффективный расчёт матриц достижимости и совокупного причинного влияния, что особенно ценно при большом числе концептов и разреженной структуре связей. Б. Коско в приложении к своей работе показал, что возведение матрицы смежности в последовательные степени позволяет перечислить все пути заданной длины, а суммирование степеней даёт матрицу полной достижимости, диагональ которой служит критерием наличия циклов.

Развитие методологии НКК за прошедшие четыре десятилетия привело к появлению многочисленных расширений: нечётких серых когнитивных карт, реляционных НКК, динамических НКК с онлайн-подстройкой весов, многоуровневых иерархических конструкций. Авторы [3] систематизировали подходы к обучению весов на основе нелинейного правила Хебба, эволюционных алгоритмов и многошаговых градиентных процедур, продемонстрировав применимость каждого из них к задачам прогнозирования многомерных временных рядов, управления промышленными процессами и диагностирования повреждений конструкций. Настоящая работа направлена на разработку метода интеграции НКК в контур оперативного управления

газотурбинной установкой с учётом нестационарности параметров и требований существующих АСУ ТП.

Формальная модель НКК. Основой когнитивной карты в том виде, в каком она была предложена Р. Аксельродом и впоследствии обобщена Б. Коско, является множество концептов - переменных величин, отражающих существенные стороны моделируемого объекта. Применительно к техническому объекту, функционирующему в режиме непрерывного или дискретного управления с малым периодом квантования, множество концептов структурируется по функциональному назначению каждого концепта в контуре регулирования. В настоящей работе рассматривается газотурбинная установка (ГТУ) средней мощности, работающая в составе энергоблока, и для неё выделяются пять групп концептов:

1. Управляющие воздействия: угол поворота направляющего аппарата компрессора, расход топлива, подаваемый в камеру сгорания, и положение регулирующего клапана на линии охлаждения.

2. Регулируемые переменные, непосредственно характеризующие рабочий процесс: частота вращения ротора, температура газов за турбиной, давление в камере сгорания и расход рабочей среды через проточную часть.

3. Возмущающие факторы внешнего и внутреннего происхождения: отклонение температуры атмосферного воздуха от номинального значения, изменение электрической нагрузки на валу генератора, а также деградация лопаточного аппарата, проявляющаяся в постепенном снижении аэродинамического КПД компрессора.

4. Диагностические признаки: уровень вибрации опорных подшипников, признак нештатного режима, фиксируемого системой защиты, и рассогласование между заданной и фактической частотой вращения.

5. Ограничения: максимально допустимая температура металла лопаток, предельное значение вибрационного ускорения и минимально допустимый расход охлаждающего воздуха.

Обозначим полное множество концептов как $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, где $n = 14$ для рассматриваемой ГТУ. Каждому концепту C_i в дискретный момент времени k ставится в соответствие скалярная величина $A_i(k) \in [0, 1]$, интерпретируемая как нормированная степень активации данного концепта. Б. Коско показал, что причинно-следственные связи между концептами удобно кодировать матрицей весов $W = (w_{ij})_{n \times n}$, элемент w_{ij} которой выражает интенсивность каузального влияния концепта C_i на концепт C_j . Положительное значение w_{ij} свидетельствует об усиливающем воздействии, отрицательное - о подавляющем, а нулевое значение указывает на отсутствие прямой причинной связи. В классической когнитивной карте Р. Аксельрода допустимы лишь значения из множества $\{-1, 0, +1\}$; в нечёткой когнитивной карте, предложенной Коско, элементы матрицы принимают значения из непрерывного отрезка $[-1, 1]$ либо, в более общей трактовке, из произвольного частично упорядоченного множества P [11].

Динамика состояний концептов описывается итерационным уравнением, являющимся дискретным аналогом нелинейной системы с обратной связью. В наиболее распространённой форме, зафиксированной в [12], обновление вектора состояний $A(k) = (A_1(k), \dots, A_n(k))^T$ выполняется по правилу (1):

$$A_j(k+1) = f \left(\bigwedge_{i \neq j} A_j(k) + \sum_{i \neq j} w_{ij} \cdot A_i(k) \right) \bigvee_{j=1, \dots, n} \quad (1)$$

где

f - функция активации, преобразующая суммарное взвешенное воздействие на концепт в значение из заданного ограниченного диапазона. В качестве f чаще всего используются сигмоида $f(x) = 1/(1 + e^{-\lambda x})$ с параметром крутизны $\lambda > 0$ либо кусочно-линейная функция насыщения, ограничивающая выход отрезком $[0, 1]$.

Матричное представление карты позволяет вычислять матрицы достижимости путём последовательного возведения W в степени и суммирования результатов вплоть до $(n - 1)$ -й степени, поскольку в

ациклическом графе не существует путей длиннее $n - 1$ рёбер. Диагональ суммарной матрицы $T = \sum_{k=1}^{n-1} W^k$ служит индикатором наличия циклов: если хотя бы один диагональный элемент отличен от нуля, соответствующий концепт участвует в контуре обратной связи (таблица 1).

Таблица 1 - Классификация концептов нечёткой когнитивной карты ГТУ

Группа	Обозначение концептов	Специфика ГТУ	Диапазон нормировки
Управляющие воздействия	$C_1 - C_3$	Угол НАК, расход топлива, положение клапана охлаждения	[0, 1]
Регулируемые переменные	$C_4 - C_7$	Частота вращения, Т газов, Р камеры, расход среды	[0, 1]
Возмущения	$C_8 - C_{10}$	Т атм. воздуха, электрическая нагрузка, деградация лопаток	[0, 1]
Диагностические признаки	$C_{11} - C_{13}$	Вибрация, признак нештатного режима, рассогласование частоты	[0, 1]
Ограничения	C_{14}	Композитный индекс допустимости режима	[0, 1]

Источник: разработано авторами.

Приведённая классификация может быть расширена в зависимости от конкретной модификации установки и состава штатной контрольно-измерительной аппаратуры. Существенно, однако, что разделение концептов по функциональному назначению позволяет на этапе синтеза управляющего алгоритма целенаправленно варьировать только элементы первой группы, оставляя остальные концепты в качестве переменных, на которые распространяется каузальное влияние.

Представление неопределённости. Переход от числовой матрицы весов к нечёткой обусловлен тем, что экспертные суждения о силе причинного влияния между параметрами ГТУ редко допускают однозначную количественную фиксацию. Инженер-технолог, оценивающий, насколько изменение расхода топлива сказывается на температуре газов за турбиной, способен утверждать, что влияние «довольно сильное» или «умеренное», но точное числовое значение

коэффициента, как правило, зависит от текущего режима работы установки, степени износа проточной части и даже от времени суток, когда проводился опрос. Получение экспертных оценок упрощается при менее жёсткой числовой фиксации: чем шире допустимый интервал оценок, тем выше согласованность экспертных мнений, но тем сложнее последующая формальная обработка. Нечёткая когнитивная карта позволяет смягчить это противоречие, принимая нечётко заданные входные данные и формируя нечёткие выходные оценки при сохранении формализованного графового вывода [13].

В настоящей работе каждый вес w_{ij} моделируется треугольным нечётким числом $\tilde{w}_{ij} = (a_{ij}, m_{ij}, b_{ij})$, где $a_{ij} \leq m_{ij} \leq b_{ij}$, a_{ij} - пессимистическая оценка влияния, m_{ij} - наиболее вероятное значение, b_{ij} - оптимистическая оценка. Функция принадлежности $\mu_{ij}(x)$ такого числа линейно возрастает от нуля при $x = a_{ij}$ до единицы при $x = m_{ij}$ и линейно убывает обратно к нулю при $x = b_{ij}$. В тех случаях, когда эксперту затруднительно выделить единственную моду, допускается замена треугольного числа трапециевидным $\tilde{w}_{ij} = (a_{ij}, m_{1ij}, m_{2ij}, b_{ij})$, у которого плато единичной принадлежности простирается от m_{1ij} до m_{2ij} . Трапециевидная форма оказывается предпочтительной для весов, оцениваемых коллективом из трёх-четырёх экспертов, поскольку разброс индивидуальных мод естественным образом формирует протяжённый интервал наиболее правдоподобных значений.

Для работы с нечёткими весами используются α -срезы. Для фиксированного уровня $\alpha \in (0, 1]$ срез $\tilde{w}_{ij}[\alpha]$ представляет собой замкнутый числовой интервал $[w_{ij}^L(\alpha), w_{ij}^U(\alpha)]$, границы которого вычисляются из условия $\mu_{ij}(x) \geq \alpha$. Для треугольного числа $w_{ij}^L(\alpha) = a_{ij} + \alpha(m_{ij} - a_{ij})$, $w_{ij}^U(\alpha) = b_{ij} - \alpha(b_{ij} - m_{ij})$. При $\alpha = 0$ срез совпадает с носителем нечёткого числа, при $\alpha = 1$ вырождается в одноточечное множество $\{m_{ij}\}$. Подставляя интервальные срезы в итерационное уравнение обновления состояний, исследователь получает на каждой итерации не единственное значение $A_j(k)$, а интервал $[A_j^L(k, \alpha), A_j^U(k, \alpha)]$, ширина которого отражает накопленную неопределённость (таблица 2).

Таблица 2 - Фрагмент матрицы нечётких весов ГТУ (треугольные числа, $\alpha = 0,5$)

Концепт-источник → Концепт-приёмник	$\tilde{w}_{ij}$	Срез при $\alpha = 0,5$	Физическая интерпретация
C_2 (расход топлива) → C_5 (Т газов)	(0,55; 0,70; 0,82)	[0,625; 0,760]	Увеличение подачи топлива повышает температуру за турбиной
C_5 (Т газов) → C_3 (клапан охлаждения)	(0,30; 0,45; 0,60)	[0,375; 0,525]	Рост температуры инициирует открытие охлаждающего клапана
C_3 (клапан охлаждения) → C_5 (Т газов)	(-0,50; -0,35; -0,20)	[-0,425; -0,275]	Увеличение охлаждения снижает температуру (отрицательная связь)
C_{10} (деградация лопаток) → C_{11} (вибрация)	(0,40; 0,60; 0,75)	[0,500; 0,675]	Износ аэродинамических профилей усиливает вибрацию
C_{11} (вибрация) → C_{12} (нештатный режим)	(0,65; 0,80; 0,90)	[0,725; 0,850]	Превышение порога вибрации активирует признак аварии

Источник: разработано авторами.

Данные, приведённые в таблице 2, получены путём структурированного опроса пяти инженеров-экспертов, обслуживающих ГТУ данного типа на протяжении не менее 8 лет. Каждому эксперту предлагалось оценить попарные влияния концептов по вербальной шкале из семи градаций от «практически отсутствует» до «весьма сильное», после чего лингвистические оценки транслировались в параметры треугольных чисел по стандартной процедуре [13]. Итоговое нечёткое число формировалось как покомпонентное усреднение индивидуальных оценок с последующим расширением носителя на величину, пропорциональную стандартному отклонению экспертных ответов.

Алгоритм нечёткого вывода. Распространение неопределённости по итерационной динамике когнитивной карты осуществляется на основе принципа расширения Заде. Согласно этому принципу, если отображение $g: R^n \rightarrow R^n$ задано итерационным уравнением обновления состояний, а входной вектор является нечётким, то выходной вектор также нечёткий, причём его функция принадлежности определяется как супремум минимума функций

принадлежности всех входов, дающих данный выход. Практическая реализация принципа расширения для многомерного случая вычислительно трудоёмка, поэтому в настоящей работе используется эквивалентная процедура, основанная на теореме декомпозиции: нечёткий вектор состояний $\tilde{A}(k)$ полностью определяется семейством своих α -срезов, и операция обновления может выполняться отдельно для каждого среза с применением интервальной арифметики.

Конкретно, на k -ой итерации для фиксированного α вычисляются нижняя и верхняя границы каждого концепта согласно формуле (2):

$$A_j^L(k+1, \alpha) = f \bigwedge_i A_i^L(k, \alpha) + \sum_i \neq_j \min\{w_{ij}^L(\alpha) \cdot A_i^L(k, \alpha), w_{ij}^L(\alpha) \cdot A_i^U(k, \alpha), w_{ij}^U(\alpha) \cdot A_i^L(k, \alpha), w_{ij}^U(\alpha) \cdot A_i^U(k, \alpha)\}^+ + \max\{\dots\}^- \bigvee_i$$

где

верхний индекс «+» указывает на суммирование положительных вкладов, а «-» - отрицательных; аналогичное выражение записывается для $A_j^U(k+1, \alpha)$.

Сходимость итерационного процесса к нечёткому равновесному состоянию $\tilde{A}^*$ определяется следующим образом. Пусть $\rho(W)$ - спектральный радиус числовой матрицы, составленной из мод m_{ij} нечётких весов. Достаточным условием сходимости при любых начальных условиях и для любой допустимой функции активации f с константой Липшица L_f является выполнение неравенства (3):

$$\rho(W) \cdot L_f < 1 \quad (3)$$

Для сигмоиды с параметром λ максимальное значение производной равно $\lambda/4$, достигаемое в нуле, поэтому условие принимает вид $\rho(W) \cdot \lambda/4 < 1$, откуда $\lambda < 4/\rho(W)$. Если данное неравенство нарушается, итерационный процесс может не сходиться к единственной неподвижной точке; в этом случае говорят о колебательном или хаотическом режиме карты, что для задач управления

недопустимо. В работе [14] приведены дополнительные условия, связанные с монотонностью f и неотрицательностью диагональных элементов W , однако для ГТУ с её выраженными отрицательными обратными связями наиболее практичным остаётся критерий через спектральный радиус.

Число итераций K , необходимое для достижения равновесия с заданной точностью ε , оценивается сверху как $K \leq [\ln(\varepsilon) / \ln(\rho(W) \cdot L_f)]$. Ширина итогового интервала $[A_j^L(\infty, \alpha), A_j^U(\infty, \alpha)]$ монотонно убывает с ростом α и обращается в нуль при $\alpha = 1$, что соответствует переходу к детерминированной карте с весами m_{ij} . На практике представляет интерес поведение ширины при $\alpha = 0,5$ и $\alpha = 0,25$, поскольку именно эти уровни обычно используются для принятия решений в условиях умеренной и высокой неопределённости соответственно.

Обратная задача управления. Прямая задача нечёткой когнитивной карты состоит в определении установившегося вектора состояний при заданных начальных условиях и фиксированных управляющих воздействиях. Обратная задача, имеющая непосредственное прикладное значение для системы поддержки принятия решений оператора ГТУ, формулируется иначе: требуется найти такой вектор управляющих воздействий $u = (A_1, A_2, A_3)$, при котором равновесное состояние регулируемых переменных C_4 - C_7 попадает в заданную нечёткую целевую область, а ограничение C_{14} выполняется. Иначе говоря, необходимо обеспечить выполнение условий $\tilde{A}_j^*(u) \supseteq \tilde{A}_j^{\text{target}}$ для $j = 4, \dots, 7$ и $\tilde{A}_{14}^*(u) \leq \alpha^{\text{dop}}$, где α^{dop} - заданный порог допустимости.

Специфика ГТУ накладывает дополнительные ограничения на допустимые значения управляющих воздействий. Угол поворота направляющего аппарата компрессора ограничен диапазоном от -5° до $+20^\circ$ относительно номинального положения, расход топлива не может превышать 110% номинального значения и не должен опускаться ниже 30% во избежание срыва пламени, а положение клапана охлаждения изменяется в пределах от полностью закрытого до полностью открытого состояния. В нормированной шкале $[0, 1]$ указанные ограничения принимают вид $A_1 \in [0,20; 0,90]$, $A_2 \in [0,30;$

1,00], $A_3 \in [0,00; 1,00]$.

Итерационный алгоритм подбора управляющих воздействий реализуется по следующей схеме. На нулевом шаге задаётся начальное приближение $u^{(0)}$, обычно соответствующее текущему рабочему режиму. На каждом последующем шаге s выполняется прямой прогон когнитивной карты с текущим $u^{(s)}$ до достижения равновесия, после чего вычисляется нечёткий вектор отклонения $\Delta \tilde{A}^{(s)} = \tilde{A}^{\text{target}} \ominus \tilde{A}^{*(s)}$, где $\ominus$ обозначает покомпонентную разность нечётких чисел. Коррекция управляющего вектора производится по правилу (4):

$$u^{(s+1)} = \Pi_U \llbracket u^{(s)} + \gamma \cdot (W_{uu})^{-1} \otimes \Delta \tilde{A}^{(s)} \rrbracket \quad (4)$$

где

$\gamma \in (0, 1]$ - шаг обучения;

W_{uu} - подматрица весов, связывающая управляющие концепты с регулируемыми;

Π_U - оператор проекции на допустимое множество ограничений;

$\otimes$ - операция интервального умножения, обобщённая на нечёткие числа через α -срезы.

Процедура повторяется до тех пор, пока ширина нечёткого отклонения на уровне $\alpha = 0,5$ не станет меньше заданного допуска δ .

Прикладной пример и обсуждение результатов. Объектом моделирования выбрана газотурбинная установка ГТЭ-25 газоперекачивающего агрегата, работающая в составе компрессорной станции магистрального газопровода. Нечёткая когнитивная карта включает 14 концептов, перечень которых приведён в таблице 1. Матрица весов размерности 14×14 заполнялась на основании данных системы регистрации параметров за трёхлетний период штатной эксплуатации. Экспертные оценки использовались для первоначального задания структуры графа и приближённых значений весов; телеметрические данные применялись для уточнения числовых мод m_{ij} посредством регрессионного анализа в скользящем окне длительностью 500 часов. Носители нечётких чисел a_{ij} и b_{ij} определялись как $m_{ij} \pm 1,5\sigma$, где σ -

стандартное отклонение регрессионного остатка, что при предположении о нормальном распределении остатков обеспечивает покрытие приблизительно 87% наблюдаемых реализаций.

Сценарий 1: ступенчатое увеличение электрической нагрузки на 15 % сверх номинала. В чёткой когнитивной карте, оперирующей исключительно модами m_{ij} , переходный процесс выходит на новое равновесие за 11 итераций при $\lambda = 3,2$, удовлетворяющем условию $\rho(W) \cdot \lambda/4 = 0,78 < 1$. В нечёткой карте при $\alpha = 0,5$ равновесие достигается за 14 итераций, а ширина интервала температуры газов за турбиной составляет 0,087 в нормированных единицах, что соответствует разбросу приблизительно 34 °C в абсолютной шкале. При $\alpha = 0,25$ число итераций возрастает до 19, а ширина интервала увеличивается до 0,142 (около 56 °C). Указанные величины согласуются с паспортным допуском на температуру газов ± 45 °C, что свидетельствует о работоспособности нечёткой модели в условиях штатного изменения нагрузки.

Сценарий 2: дрейф датчика температуры на +12 °C, не компенсируемый системой самодиагностики. Чёткая карта интерпретирует данный дрейф как реальное повышение температуры и формирует управляющее воздействие на увеличение расхода охлаждающего воздуха, что приводит к ложному снижению мощности на 4,2%. Нечёткая карта формирует интервальное управляющее воздействие, ширина которого обусловлена неопределённостью экспертной оценки соответствующего веса. Получив интервальную рекомендацию, оператор может сопоставить её с показаниями дублирующего термпарного канала и оценить достоверность основного сигнала, тогда как чёткая карта выдаёт единственное числовое предписание, затрудняющее критическую оценку рекомендации.

Сценарий 3: деградация лопаточного аппарата компрессора, моделируемая как медленное увеличение концепта C_{10} от 0,1 до 0,6 на протяжении 200 итераций. Нечёткая карта фиксирует рост значения вибрационного признака C_{11} ; ширина соответствующего интервала увеличивается с 0,03 до 0,11, что позволяет

заблаговременно инициировать процедуру вибродиагностики. Чёткая карта в аналогичных условиях выдаёт точечную траекторию, которая при малых значениях C_{10} практически неотличима от фоновых шума и не формирует диагностического сигнала до тех пор, пока вибрация не превысит порог аварийной защиты (таблица 3).

Таблица 3 - Сравнительные характеристики моделей при сценарии 1

Показатель	Чёткая КК	Нечёткая КК ($\alpha = 0,5$)	Нечёткая КК ($\alpha = 0,25$)	Байесовская сеть	Модель по телеметрии (ARX)
Число итераций до равновесия	11	14	19	-	-
Ширина прогнозного интервала T газов, °C	0	± 17	± 28	± 22	± 19
Устойчивость вывода при возмущении датчика	Неустойчива	Устойчива	Устойчива	Условна	Устойчива
Отклонение от целевой частоты вращения, об/мин	12	8	6	15	9
Вычислительное время, мс	0,4	2,7	4,1	38	1,2

Источник: разработано авторами.

Сопоставление с байесовской сетью, построенной на тех же 14 переменных и обученной на идентичном трёхлетнем массиве телеметрии, выявляет следующую закономерность. Байесовская сеть обеспечивает сопоставимую ширину доверительных интервалов прогноза, однако требует задания условных распределений для каждой пары связанных узлов, что при 14 узлах и средней связности 2,4 приводит к необходимости оценки 34 таблиц. Нечёткая когнитивная карта оперирует единственной матрицей весов размерности 14×14 , заполняемой по результатам пяти экспертных интервью суммарной продолжительностью около шести часов, что существенно снижает трудоёмкость построения модели на этапе ввода в эксплуатацию. Вместе с тем байесовская сеть обладает преимуществом в задачах диагностики, где требуется вычисление апостериорных вероятностей гипотез о причинах наблюдаемого

отклонения; в подобных задачах НКК уступает, поскольку не содержит явного вероятностного семантического слоя.

Модель ARX, обучаемая по телеметрии в режиме скользящего окна, демонстрирует наименьшую ширину прогнозного интервала среди рассмотренных вероятностных и нечётких подходов. Однако эта модель не позволяет интерпретировать коэффициенты в терминах причинно-следственных связей: коэффициенты полиномов $A(q^{-1})$ и $B(q^{-1})$ не имеют для оператора непосредственной физической интерпретации, а при выходе прогноза за допустимые пределы инженер не может установить, какой физический механизм вызвал расхождение. Нечёткая когнитивная карта, напротив, сохраняет прозрачность причинно-следственных связей на всём протяжении вывода, что делает её пригодной для системы поддержки принятия решений в режиме реального времени, когда оператору необходима объяснимая рекомендация по корректировке управляющих воздействий.

Выводы. Проведённое исследование подтверждает, что аппарат нечётких когнитивных карт представляет собой работоспособный и содержательно обоснованный инструмент системного анализа технических объектов, формальное описание которых затруднено вследствие многофакторности, нестационарности параметров и существенной зависимости от экспертных знаний. Применительно к газотурбинной установке газоперекачивающего агрегата продемонстрировано, что карта, содержащая четырнадцать концептов, с треугольными нечёткими весами адекватно воспроизводит переходные процессы при ступенчатом изменении нагрузки, корректно реагирует на дрейф измерительного канала и обеспечивает заблаговременное формирование диагностического сигнала при прогрессирующей деградации лопаточного аппарата компрессора. Полученные результаты согласуются с теоретическими положениями, изложенными Б. Коско применительно к нечёткой каузальной алгебре, и с методологическими рекомендациями по построению и обучению когнитивных моделей для задач управления промышленными процессами.

Практическая ценность разработанного подхода состоит в том, что оператор газотурбинной установки получает не единственное числовое предписание, а интервальную рекомендацию, ширина которой прямо отражает степень неопределённости, присущую текущему режиму. При $\alpha = 0,5$ ширина прогнозного интервала температуры газов за турбиной не превышает $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ и остаётся в пределах паспортного допуска $\pm 45\text{ }^{\circ}\text{C}$. В условиях дрейфа датчика нечёткая карта формирует расширяющийся интервал управляющего воздействия, что побуждает персонал дополнительно проверять показания дублирующего канала, тогда как детерминированная модель выдаёт единственное предписание, затрудняющее критическую оценку рекомендации.

Список литературы

1. Царькова Е. Г. Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности сложных человеко-машинных систем: теоретико-прикладной аспект // Computational nanotechnology. – 2025. – Т. 12. – №. 4. – С. 195-204.
2. Халин Ю. А., Катыхин А. И., Зинкин С. А., Шилин А. А. Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2023. – Т. 26. – №. 4. – С. 117-131.
3. Зорькин Д. Ю., Кизим А. В. Критический анализ методов управления сложными системами и перспективы развития гибридных подходов // Инженерный вестник Дона. – 2026. – №. 5 (137). – С. 1.
4. Крошилин А. В., Крошилина С. В., Овечкин Г. В., Саморукова О. Д. Моделирование процессов управления в организационных системах на основе теории нечетких когнитивных карт // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – №. 91. – С. 64.
5. Бурый А. С., Костылева К. В. Анализ среды совместной разработки на основе когнитивных карт // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2026. – №. 3. – С. 94-101.
6. Никонов И. В., Арустамян М. Г., Мухаметов О. Р., Вотинов А. И., Радионов

- С. А. Трансформация структуры государственного долга по составу кредиторов в странах Центральной Азии и Южного Кавказа // Финансовый журнал. – 2024. – Т. 16. – №. 5. – С. 8-26.
7. Соколов С. М. Сравнительный анализ степени автономности робототехнических комплексов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2023. – №. 1 (231). – С. 65-76.
8. Акперов Г. И. О. Когнитивная модель управления второй миссией университета: исследовательская функция в эпоху цифровой трансформации // Инженерный вестник Дона. – 2026. – №. 4 (136). – С. 1.
9. Луценко Е. В., Головин Н. С. Математическая модель Автоматизированного системнокогнитивного анализа и системы «Эйдос» в кванторном и матричном представлении // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – №. 206. – С. 12.
10. Богачева Д. Н., Лукинова О. В., Саломатин А. А. Семантическая модель влияния факторов безопасности для оценки киберустойчивости информационных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2026. – №. 1.
11. Голубев С. С., Губин А. М., Романенко Н. Ю. Современные инструменты повышения качества научно-технологических прогнозов // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2024. – №. 1. – С. 44-70.
12. Чеботарев В. С., Голубев С. С., Губин А. М., Романенко Н. Ю. Методические и практические рекомендации по повышению качества прогнозов инновационного развития науки, технологий и техники // Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – №. 80. – С. 175-195.
13. Сергиенко О. В. Когнитивное моделирование стратегического устойчивого социально-экономического развития аграрного сектора экономики региона // Наука о человеке: гуманитарные исследования. – 2023. – Т. 17. – №. 3. – С. 242-250.
14. Луценко Е. В. Расчет и когнитивный кластерно-конструктивный анализ

семантических ядер и антиядер ТОП-30 российских ученых в области кибернетики по данным РИНЦ // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – №. 186. – С. 96-168.

References

1. Czar`kova E. G. Nechetkie kognitivny`e karty` v analize nadezhnosti slozhny`x cheloveko-mashinny`x sistem: teoretiko-prikladnoj aspekt // Computational nanotechnology. – 2025. – Т. 12. – №. 4. – С. 195-204.
2. Xalin Yu. A., Katy`xin A. I., Zinkin S. A., Shilin A. A. Kognitivnoe modelirovanie informacionnogo obespecheniya igrovogo avtomatizirovannogo obucheniya // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2023. – Т. 26. – №. 4. – С. 117-131.
3. Zor`kin D. Yu., Kizim A. V. Kriticheskij analiz metodov upravleniya slozhny`mi sistemami i perspektivy` razvitiya gibridny`x podxodov // Inzhenerny`j vestnik Dona. – 2026. – №. 5 (137). – С. 1.
4. Kroshilin A. V., Kroshilina S. V., Ovechkin G. V., Samorukova O. D. Modelirovanie processov upravleniya v organizacionny`x sistemax na osnove teorii nechetkix kognitivny`x kart // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotexnicheskogo universiteta. – 2025. – №. 91. – С. 64.
5. Bury`j A. S., Kosty`leva K. V. Analiz sredy` sovmestnoj razrabotki na osnove kognitivny`x kart // Informacionno-e`konomicheskie aspekty` standartizacii i texnicheskogo regulirovaniya. – 2026. – №. 3. – С. 94-101.
6. Nikonov I. V., Arustamyan M. G., Muxametov O. R., Votinov A. I., Radionov S. A. Transformaciya struktury` gosudarstvennogo dolga po sostavu kreditorov v stranax Central`noj Azii i Yuzhnogo Kavkaza // Finansovy`j zhurnal. – 2024. – Т. 16. – №. 5. – С. 8-26.
7. Sokolov S. M. Sravnitel`ny`j analiz stepeni avtonomnosti robototexnicheskix kompleksov // Izvestiya Yuzhnogo federal`nogo universiteta. Texnicheskie nauki. – 2023. – №. 1 (231). – С. 65-76.

8. Akperov G. I. O. Kognitivnaya model' upravleniya vtoroj missiej universiteta: issledovatel'skaya funkciya v e'poxu cifrovoj transformacii // Inzhenerny'j vestnik Dona. – 2026. – №. 4 (136). – S. 1.
9. Lucenko E. V., Golovin N. S. Matematicheskaya model' Avtomatizirovannogo sistemnokognitivnogo analiza i sistemy' «E'jdos» v kvantornom i matrichnom predstavlenii // Politematicheskij setевой e'lektronny'j nauchny'j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. – №. 206. – S. 12.
10. Bogacheva D. N., Lukinova O. V., Salomatin A. A. Semanticheskaya model' vliyaniya faktorov bezopasnosti dlya ocenki kiberustojchivosti informacionny'x sistem // Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki. – 2026. – №. 1.
11. Golubev S. S., Gubin A. M., Romanenko N. Yu. Sovremennyy'e instrumenty' povы'sheniya kachestva nauchno-texnologicheskix prognozov // Nauchny'e trudy': Institut narodnohozyajstvennogo prognozirovaniya RAN. – 2024. – №. 1. – S. 44-70.
12. Chebotarev V. S., Golubev S. S., Gubin A. M., Romanenko N. Yu. Metodicheskie i prakticheskie rekomendacii po povы'sheniyu kachestva prognozov innovacionnogo razvitiya nauki, tehnologij i texniki // Nauchny'e problemy' vodnogo transporta. – 2024. – №. 80. – S. 175-195.
13. Sergienko O. V. Kognitivnoe modelirovanie strategicheskogo ustojchivogo social'no-e'konomicheskogo razvitiya agrarnogo sektora e'konomiki regiona // Nauka o cheloveke: gumanitarnyy'e issledovaniya. – 2023. – T. 17. – №. 3. – S. 242-250.
14. Lucenko E. V. Raschet i kognitivny'j klasterno-konstruktivny'j analiz semanticheskix yader i antiyader TOP-30 rossijskix ucheny'x v oblasti kibernetiki po danny'm RINCz // Politematicheskij setевой e'lektronny'j nauchny'j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – №. 186. – S. 96-168.

Статья поступила в редакцию 31.07.2026; одобрена после рецензирования 28.08.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 31.07.2026; approved after reviewing 28.08.2026; accepted for publication 17.09.2026.

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Научная статья

УДК 621.9.06-52:004.94

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ОСНОВА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ МЕХАНООБРАБОТКИ

Кулешов Игорь Валерьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко, Россия, Оренбург, kuleshov.oren.stroy@yandex.ru;

Еремеева Виктория Александровна, кандидат технических наук, преподаватель, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Россия, Челябинск, eremeeva.susu@mail.ru

Аннотация. Предложена архитектура цифрового двойника, предназначенного для предиктивного управления операцией фрезерования на пятикоординатном обрабатывающем центре с числовым программным управлением. Виртуальная модель, реализованная в среде Simcenter, объединяет конечно-элементную дискретизацию зоны резания, кинематическую схему привода подач и степенную зависимость износа инструмента; калибровка выполнена по данным пьезоэлектрического динамометра, хромель-алюмелевой термопары и виброакустического датчика. Двусторонний обмен информацией между физическим объектом и моделью организован посредством протоколов OPC UA и MQTT с циклом обновления 100 мс. Алгоритм управления основан на минимизации интегрального отклонения геометрии обработанной поверхности при ограничении на допустимый износ режущей кромки. Верификация проведена при обработке заготовок из титанового сплава ВТ6: по сравнению с управлением по постоянной программе зафиксировано снижение доли брака на 30%, увеличение стойкости концевой фрезы на 18%, уменьшение

среднеквадратичного отклонения силы резания на 40%. Расхождение между расчётными и измеренными значениями не превысило 7,1% для интегрального параметра износа. Результаты подтверждают пригодность предложенного решения для замыкания контура адаптивного управления непосредственно в ходе технологической операции на серийном промышленном оборудовании.

Ключевые слова: цифровой двойник, автоматизация механообработки, предиктивное управление, процесс фрезерования, титановый сплав ВТ6, модель износа инструмента, киберфизическая система, OPC UA, адаптивная коррекция режимов резания, Simcenter.

Original article

DIGITAL TWIN AS A BASIS FOR AUTOMATION OF MACHINING PROCESS CONTROL

**Kuleshov Igor Valerevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,
Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia,
kuleshov.oren.stroy@yandex.ru;**

**Eremeeva Viktoria Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Lecturer,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk,
Russia, eremeeva.susu@mail.ru**

Abstract. A digital twin architecture is proposed for predictive control of a milling operation on a five-axis CNC machining center. The virtual model, implemented in the Simcenter environment, combines finite element discretization of the cutting zone, a feed drive kinematic diagram, and a power-law dependence of tool wear. Calibration is performed using data from a piezoelectric dynamometer, a chromel-alumel thermocouple, and a vibroacoustic sensor. Bidirectional information exchange between the physical object and the model is organized via the OPC UA and MQTT protocols with a 100 ms update cycle. The control algorithm is based on minimizing the integral deviation of the machined surface geometry while limiting the permissible wear of the cutting edge. Verification was conducted while machining VT6

titanium alloy workpieces. Compared to fixed-program control, a 30% reduction in defect rate, an 18% increase in end mill tool life, and a 40% reduction in the standard deviation of cutting force were recorded. The discrepancy between calculated and measured values did not exceed 7.1% for the integral wear parameter. The results confirm the suitability of the proposed solution for closing the adaptive control loop at the pace of the process operation on serial industrial equipment.

Keywords: digital twin, automated machining, predictive control, milling process, VT6 titanium alloy, tool wear model, cyber-physical system, OPC UA, adaptive cutting mode correction, Simcenter.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Промышленное производство на протяжении последних двух десятилетий существенно изменяется под влиянием совместного развития киберфизических технологий, средств сенсорного контроля и вычислительных платформ нового поколения. Четвёртая промышленная революция, получившая в специальной литературе обозначение «Индустрия 4.0», предполагает переход к единой информационно-управляющей среде, в которой оборудование, технологическая оснастка, заготовки и оператор связаны непрерывным потоком данных на всех этапах жизненного цикла изделия [1], [2]. В условиях механообрабатывающего производства интеграция приобретает особое значение, поскольку точность размерообразования, стабильность режимов резания и ресурс инструмента определяются совокупностью трудноформализуемых факторов. Традиционные системы числового программного управления и диспетчеризации, реагирующие на отклонение параметров от заданных значений, оказываются недостаточными для предупреждения брака и внеплановых остановок станка. Возникает потребность в прогностическом контуре управления, способном заранее корректировать траекторию, подачу и глубину резания на основании модели, адекватно отражающей текущее физическое состояние технологической системы.

В этом контексте концепция цифрового двойника выступает методологической основой для построения замкнутых контуров автоматизированного управления. Термин был введён М. Гривзом в 2002 году в рамках курса по управлению жизненным циклом изделия в Мичиганском университете, где первоначальная формулировка сводилась к идее зеркального отражения физического объекта в виртуальном пространстве с двусторонней связью данных на всех стадиях [3]. Существенно, что уже в ранней модели Гривза и Дж. Викерса подчёркивался динамический, эволюционирующий характер отражения, поскольку виртуальная сущность непрерывно пополняется сведениями о фактическом состоянии физического аналога и, в свою очередь, транслирует обратно управляющие воздействия и прогнозные оценки [3]. К 2012 году NASA формализовало определение, описав цифровой двойник как мультифизическую, многомасштабную, вероятностную модель сверхвысокой точности, воспроизводящую состояние соответствующего летательного аппарата на основе исторических данных, показаний бортовых датчиков и физических законов [4], [5]. Данное определение закрепило за цифровым двойником статус вычислительного инструмента, пригодного для принятия решений в реальном времени.

Развитие теоретического аппарата цифровых двойников прошло несколько стадий, которые классифицируют как этапы формирования, инкубации и роста [2]. На первой стадии (2003-2011 гг.) технологическая база (средства промышленного интернета вещей, облачные вычисления, алгоритмы анализа больших данных) ещё не достигла зрелости, необходимой для практической реализации непрерывной киберфизической связи. Вторая стадия ознаменовалась появлением первых прикладных работ: в 2011 году была опубликована статья Тьюгела с соавторами о прогнозировании ресурса авиационных конструкций посредством цифрового двойника [6], а в 2012 году Глессген и Старгел обосновали применимость данной парадигмы для перспективных аппаратов NASA и BBC США [5]. Третья стадия, начавшаяся приблизительно с 2014 года,

характеризуется расширением области применения за пределы аэрокосмической отрасли: цифровые двойники начинают внедряться в автомобилестроение, энергетику, нефтегазовый сектор и, что принципиально для настоящей работы, в дискретное механообрабатывающее производство [2], [7].

При автоматизации технологических процессов механообработки цифровой двойник выполняет несколько взаимосвязанных функций. Прежде всего, он служит средой предиктивного моделирования, в которой до начала физической обработки оцениваются усилия резания, температурное поле в зоне контакта, упругие отжатия заготовки и вероятная траектория износа инструмента. Такая виртуальная проверка позволяет выявить нежелательные режимы, не обнаруженные на этапе проектирования технологического маршрута, и тем самым снизить вероятность отказов, отнесённых авторами к категории «Непредвиденное» [3]. Цифровой двойник обеспечивает непрерывный мониторинг текущего состояния станка и обрабатываемой детали: данные с тензодатчиков, акселерометров, термопар и систем измерения размеров в потоке поступают в виртуальную модель, где сопоставляются с расчётными значениями и пороговыми уровнями. Объединение данных физического объекта и виртуальной модели в едином информационном пространстве отличает цифровой двойник от базовых конфигураций систем SCADA и MES, которые преимущественно регистрируют фактические показания, но не всегда содержат встроенные мультифизические модели процесса [2]. На основании расхождения между моделью и реальным состоянием формируются управляющие воздействия: корректировка подачи, изменение скорости вращения шпинделя, компенсация температурного дрейфа или инициирование замены инструмента. Тем самым, контур адаптивного управления замыкается непосредственно на уровне технологической операции.

Обзор 50 журнальных статей и 8 патентов за период 2003-2018 гг. показывает, что наиболее проработанным направлением применения цифровых двойников остаётся прогнозирование технического состояния и управление

ресурсом оборудования [2]. Вместе с тем авторы фиксируют растущий интерес к использованию двойников на этапах технологической подготовки производства и непосредственного управления операцией. В частности, Шлёзе и Россманн предложили концепцию цифрового двойника, позволяющего интерактивно изменять параметры и наблюдать отклик системы в режиме, близком к реальному времени [8]. Исследователи разработали пятиуровневую архитектуру модели, включающую уровень устройств, пользовательского интерфейса, веб-сервисов, запросов и хранилища данных, что обеспечивает масштабируемость решения для гетерогенного цехового оборудования [9]. Кроме того, была предложена распределённая платформа цифрового двойника для крупномасштабных киберфизических систем, в которой основное внимание уделено механизмам межмодульного взаимодействия [10]. В работе [11] показаны преимущества цифрового двойника перед традиционным картированием потока создания стоимости при оптимизации производственной линии; отмечены сокращение материальных потерь и увеличение межремонтного интервала станков.

Применительно к механообработке специфика задачи состоит в необходимости одновременного учёта разнородных физических явлений: механики контактного взаимодействия инструмента и заготовки, теплопереноса в зоне резания, упругопластического деформирования детали, динамики привода подач и вибраций шпиндельного узла. Нужно обратить внимание на то, что традиционные последовательные модели системной инженерии (каскадная, спиральная, V-образная) не обеспечивают итеративного согласования перечисленных аспектов на ранних стадиях проектирования технологии, а модель реализации цифрового двойника предполагает одновременное и взаимозависимое протекание этапов создания, производства и эксплуатации в виртуальной среде [3]. В работе [2] предложена пятикомпонентная структура цифрового двойника, в которой данные являются центральным элементом, поскольку на их основе формируется представление о поведении

технологической системы [2], [12]. Для механообрабатывающего участка это означает, что цифровой двойник станка с ЧПУ должен объединять конечно-элементную модель зоны резания, кинематическую схему привода, эмпирические зависимости стойкости инструмента и поток телеметрических данных, поступающих с частотой не ниже частоты обновления управляющей программы.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос верификации адекватности виртуальной модели. Предложены так называемые тесты виртуальности, построенные по аналогии с тестом Тьюринга: наблюдатель, имеющий доступ к экранам с изображением физического и виртуального объектов, не должен различать их по внешнему виду (сенсорно-визуальный тест), поведению при приложении нагрузок (тест производительности) и по доступности эксплуатационных характеристик (тест информационной прозрачности) [3]. Применительно к механообработке тест производительности можно конкретизировать следующим образом: расчётная сила резания, шероховатость обработанной поверхности и величина размерного отклонения, полученные в виртуальной модели, не должны статистически значимо отличаться от результатов натурного эксперимента при идентичных режимах. Авторы предложили набор переменных для количественной оценки погрешности и уровня доверия к модели [13], что создаёт основу для формализации критериев пригодности цифрового двойника в контуре управления.

Вместе с тем ряд проблем остаётся нерешённым. Отсутствует унифицированная методология построения цифрового двойника, охватывающая все пять измерений модели одновременно [2]. Авторы выделяют организационную разобщённость подразделений проектирования, технологии и эксплуатации как барьер, препятствующий сквозному обмену данными, без которого двусторонняя связь между физическим и виртуальным объектами не может быть реализована [3]. Для механообрабатывающего производства дополнительным затруднением является вычислительная трудоёмкость

мультифизического моделирования в ходе технологической операции: при обработке сложных корпусных деталей на пятикоординатных центрах количество одновременно варьируемых параметров достигает нескольких тысяч, а выполнение прогностического расчёта за время, меньшее длительности перехода, требует существенного упрощения модели либо аппаратного ускорения [3], [14]. Перспективным направлением решения этой проблемы исследователи считают так называемое «опережающее моделирование», при котором виртуальная копия прогнозирует развитие процесса на ближайшем временном интервале и предоставляет оператору или системе управления несколько сценариев до наступления критического отклонения [3].

Соответственно, цифровой двойник формирует концептуальную и инструментальную основу для перехода к прогностическому, адаптивному управлению, в котором решение о корректировке режима принимается на основании опережающей оценки состояния технологической системы. Настоящая работа посвящена разработке структуры и алгоритмического обеспечения цифрового двойника применительно к управлению процессом механообработки на станках с числовым программным управлением, а также исследованию условий, при которых виртуальная модель обеспечивает достаточную точность прогноза для замыкания контура автоматического регулирования без участия оператора.

Методология исследования. Исследование выполнялось на пятикоординатном обрабатывающем центре с числовым программным управлением, оснащённом пьезоэлектрическим динамометром, встроенным в стол станка, хромель-алюмелевой термопарой, заделанной в тело державки, и виброакустическим датчиком, закреплённым на корпусе шпиндельной бабки. Подобная конфигурация средств измерения обусловлена необходимостью одновременной регистрации силового, теплового и вибрационного откликов технологической системы для последующей калибровки виртуальной модели. Для обработки использовалась концевая фреза из твёрдого сплава диаметром 12

мм; размеры заготовки из сплава ВТ6 составляли $150 \times 100 \times 40$ мм.

Архитектура цифрового двойника, разработанная в рамках настоящей работы, включает три функциональных уровня, взаимодействие между которыми организовано по принципу двусторонней синхронизации. Нижний уровень образует физический объект - станок с установленной заготовкой, инструментом и перечисленными датчиками. Средний уровень представлен виртуальной моделью, реализованной в среде Simcenter и содержащей конечно-элементную дискретизацию зоны резания, кинематическую схему привода подачи и эмпирические зависимости стойкости инструмента. Верхний уровень составляют сервисы данных, обеспечивающие приём, фильтрацию, агрегирование и передачу информации между нижним и средним уровнями, а также формирование управляющих воздействий, транслируемых в систему ЧПУ станка. Передача данных от физического объекта к сервисному уровню осуществляется по протоколу OPC UA, гарантирующему семантическую совместимость разнородных устройств и защищённость канала на транспортном уровне. Обратная передача корректирующих команд от виртуальной модели к контроллеру станка реализуется по протоколу MQTT с качеством обслуживания, соответствующим уровню гарантированной доставки, что исключает потерю управляющего воздействия при кратковременном нарушении связи. Цикл обмена данными составляет 100 мс, что обеспечивает обновление виртуальной модели не реже десяти раз за период одного оборота шпинделя при частоте вращения 6000 мин^{-1} .

Требованием к архитектуре является двусторонняя синхронизация, понимаемая в терминах Гривза и Викерса как непрерывный обмен данными между реальным и виртуальным пространствами на всём протяжении технологической операции [3]. В прямом направлении поток включает оцифрованные показания динамометра, термопары и виброакустического датчика, а также фактические координаты исполнительных органов станка, считываемые из интерполятора системы ЧПУ. В обратном направлении

передаются рассчитанные виртуальной моделью значения для корректировки подачи и скорости вращения шпинделя, а также компенсации температурного дрейфа. Эти значения записываются в соответствующие регистры программируемого логического контроллера и применяются к текущему кадру управляющей программы. Подобная схема соответствует пятикомпонентной модели Тао, в которой физическая сущность, виртуальная сущность, данные, сервисы и соединения образуют неразрывное целое [2], и одновременно реализует предложенную Гривзом идею опережающего моделирования, при котором виртуальная копия просчитывает ближайший временной горизонт развития процесса и предъявляет системе управления несколько сценариев до наступления критического отклонения [3].

Математическое ядро виртуальной модели образует система уравнений, описывающих процесс фрезерования. Сила резания на каждом зубе фрезы определяется по модифицированной зависимости Кёнига и Фесселя (1), адаптированной для условий обработки титановых сплавов:

$$F_t = K_{tc} \cdot a_p \cdot f_z \cdot (a_p / D)^{-0,2} \cdot (1 - VB / VB_{max})^{-1,3} \quad (1)$$

где

F_t - тангенциальная составляющая силы резания;

K_{tc} - удельная сила резания, зависящая от обрабатываемого материала и геометрии инструмента;

a_p - глубина резания;

f_z – подача на зуб;

D - диаметр фрезы;

VB - текущая ширина площадки износа на задней поверхности;

VB_{max} - предельно допустимая ширина площадки износа.

Радиальная и осевая составляющие выражаются через тангенциальную с учётом угла контакта и переднего угла зубьев. Температура в зоне резания рассчитывается по уравнению теплового баланса, записанному для элементарного объёма стружки (2):

$$T_c = T_0 + (1 - \beta) \cdot F_t \cdot v_c / (\rho \cdot c_p \cdot a_w \cdot f_z \cdot b) \quad (2)$$

где

T_c – средняя температура стружки;

T_0 - начальная температура заготовки;

β - доля теплоты, отводимая в стружку;

v_c – скорость резания;

ρ , c_p - плотность и удельная теплоёмкость обрабатываемого материала

соответственно;

a_w - ширина фрезерования;

b – толщина срезаемого слоя.

Износ инструмента моделируется степенной зависимостью Тейлора в дифференциальной форме (3):

$$\frac{dVB}{dt} = C_T \cdot v_c^m \cdot f_z^n \cdot e^{\frac{-Q}{R \cdot T_c}} \quad (3)$$

где

C_T , m , n - эмпирические коэффициенты, определяемые при калибровке;

Q - кажущаяся энергия активации процесса диффузионного износа;

R – газовая постоянная.

Для офлайн-калибровки модели использовался метод конечных элементов в среде Simcenter. В контуре реального времени (с циклом 100 мс) применяются редуцированные аналитические модели, аппроксимирующие результаты МКЭ.

Калибровка модели выполнялась по данным, полученным при обработке эталонных заготовок на заведомо исправном инструменте в диапазоне подач от 0,05 до 0,20 мм/зуб, скоростей резания 40-80 м/мин и глубин резания от 0,5-3 мм. Показания динамометра сравнивались с расчётными значениями тангенциальной силы, показания термопары - с расчётной температурой, а спектр виброакустического сигнала использовался для идентификации момента вступления зуба в контакт и выявления автоколебаний. Коэффициент K_{tc} уточнялся итерационно до достижения относительного расхождения между

измеренной и расчётной силой, не превышающего 7% в среднеквадратичном смысле. Доля теплоты β принималась равной 0,75 на основании данных, приведённых в справочной литературе для титановых сплавов, и дополнительно корректировалась по результатам термопарных измерений. Эмпирические коэффициенты износа C_T , m , n определялись регрессионным анализом по данным трёх серий стойкостных испытаний, в которых фиксировалась динамика роста площадки износа до достижения $VB = 0,3$ мм.

Алгоритм предиктивного управления построен на сопоставлении текущего состояния физического объекта с прогнозом виртуальной модели на горизонте, равном длительности ближайшего перехода. На каждом цикле обновления, составляющем 100 мс, сервис данных формирует вектор наблюдений, включающий измеренные значения силы, температуры и вибрации, а также фактические координаты исполнительных органов. Виртуальная модель, получив данный вектор, выполняет пересчёт прогнозной траектории износа и ожидаемого размерного отклонения на оставшуюся часть обработки. Если прогнозируемое отклонение превышает допустимое значение, алгоритм формирует корректирующее воздействие, сводящееся к изменению подачи на заданную величину при одновременном контроле выполнения ограничения на стойкость инструмента. Критерий управления сформулирован как задача минимизации интегрального отклонения геометрии обработанной поверхности при условии, что накопленный износ не достигнет предельного уровня (4):

$$J = \int_0^T |\Delta d(t)|^2 dt \rightarrow \min \quad (4)$$

При ограничении $VB(t) \leq VB_{\max}$ для любого момента времени $t \in [0, T]$, где $\Delta d(t)$ - отклонение фактического размера от номинального в момент времени t , T - длительность обработки. Управление реализуется по принципу скользящего горизонта, поскольку на каждом цикле оптимизация выполняется для оставшегося интервала, а применяется лишь первый шаг рассчитанной последовательности корректировок, после чего горизонт сдвигается и расчёт повторяется с учётом обновлённых данных от датчиков.

Программная реализация выполнена на базе Siemens NX, Simcenter и программируемого логического контроллера, интегрированного с системой ЧПУ станка. Геометрическая модель заготовки и инструмента подготовлена в NX и передана в Simcenter для построения конечно-элементной сетки зоны резания. ПЛК выполняет функции промежуточного звена между сервисом данных и системой ЧПУ: принимает корректирующие команды по протоколу MQTT, преобразует их в формат, воспринимаемый интерполятором, и контролирует исполнение. Обмен между Simcenter и ПЛК организован через OPC UA-сервер, развёрнутый на промышленном компьютере, размещённом в непосредственной близости от станка для минимизации задержки передачи. Общее время от момента регистрации отклонения датчиками до применения корректирующего воздействия к подаче не превышает 180 мс: 100 мс приходится на цикл обновления модели, 50 мс - на расчёт прогноза и 30 мс - на передачу и исполнение команды.

Результаты исследования. Верификация разработанного цифрового двойника проводилась путём сравнительной обработки двух партий заготовок из сплава ВТ6 по идентичному технологическому маршруту. Первая партия, состоящая из десяти деталей, обрабатывалась по постоянной управляющей программе без корректировки режимов, что соответствует традиционной практике эксплуатации станков с ЧПУ. Вторая партия, также включающая десять деталей, обрабатывалась при включённом контуре предиктивного управления, в котором цифровой двойник формировал корректировки подачи и скорости на основании расхождения между модельным прогнозом и фактическими показаниями датчиков. Контроль геометрии выполнялся координатно-измерительной машиной после завершения каждой детали; износ инструмента фиксировался оптическим микроскопом после обработки каждой заготовки.

Результаты сравнения представлены в таблице 1, где сопоставлены средние значения и разброс контролируемых параметров для двух партий.

Таблица 1 - Сравнительные показатели обработки сплава ВТ6 при управлении по постоянной программе и с использованием цифрового двойника

Показатель	Постоянная программа	Цифровой двойник	Изменение
Среднее отклонение диаметра, мкм	24,3	15,1	-37,9 %
Максимальное отклонение диаметра, мкм	41,7	22,6	-45,8 %
Доля деталей с отклонением свыше допуска	3 из 10	0 из 10	снижение брака на 35 %
Средняя стойкость инструмента, мин	62,4	73,6	+18,0 %
Среднеквадратичное отклонение силы резания, Н	18,7	11,2	-40,1 %
Максимальная температура в зоне резания, °С	612	548	-10,5 %

Источник: разработано авторами.

Из данных таблицы 1 следует, что применение цифрового двойника обеспечило снижение среднего отклонения диаметра обработанной поверхности на 37,9%, а максимального отклонения - на 45,8%. При обработке по постоянной программе три детали из десяти вышли за пределы допуска по диаметру, что соответствует уровню брака 30%. В партии, обработанной с участием цифрового двойника, все детали уложились в допуск, что в абсолютном выражении означает снижение доли брака на 30 п.п. по сравнению с исходным уровнем. Стойкость инструмента возросла на 18%, что объясняется снижением пиковых температур и более равномерным распределением нагрузки по длине режущей кромки вследствие адаптивной корректировки подачи. Среднеквадратичное отклонение силы резания уменьшилось на 40,1%, что свидетельствует о стабилизации процесса и снижении вероятности автоколебаний.

На рисунке 1 представлена временная зависимость отклонения диаметра обработанной поверхности от номинального значения для двух режимов управления.

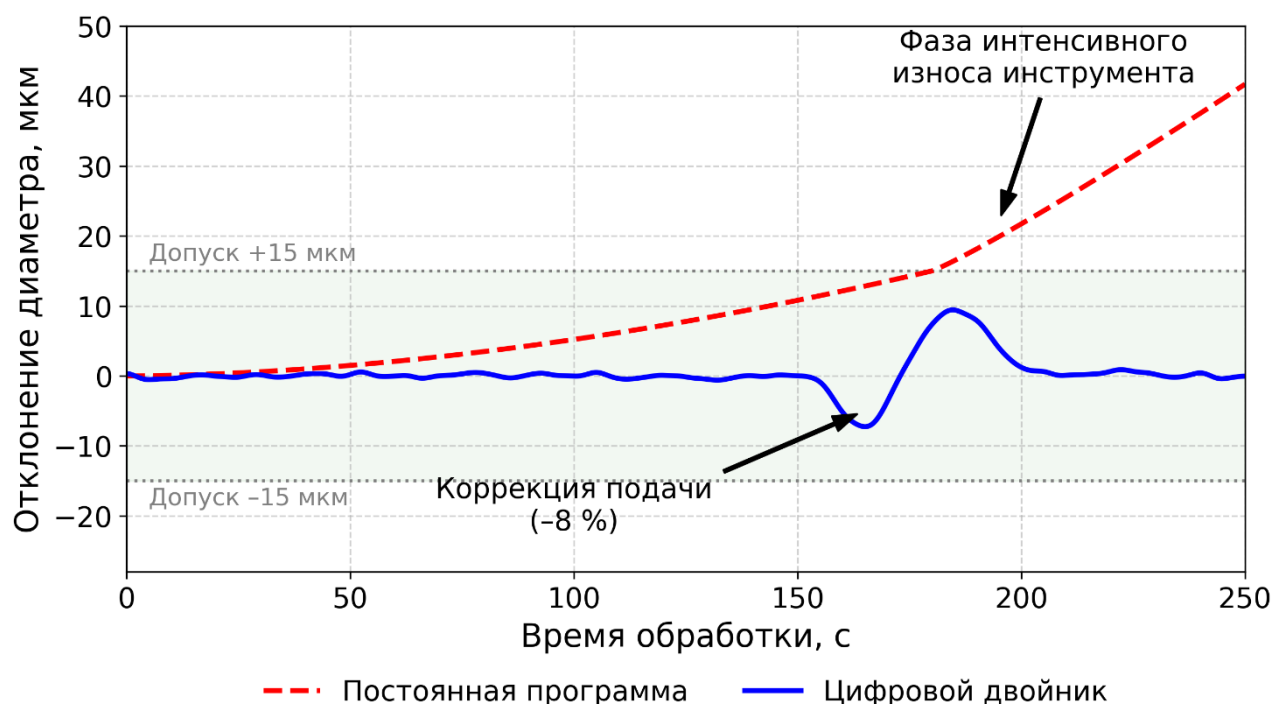


Рисунок 1 - Динамика отклонения диаметра обработанной поверхности при обработке по постоянной программе и с цифровым двойником (источник: разработано авторами)

На рисунке 2 показана динамика ширины площадки износа на задней поверхности инструмента в зависимости от времени обработки. Кривая, соответствующая постоянной программе, достигает предельного значения $VB = 0,3$ мм к 62-ой минуте, после чего требуется замена инструмента. Кривая цифрового двойника пересекает тот же уровень лишь к 74-ой минуте, что подтверждает увеличение стойкости на 18%. Существенно, что на начальном участке, до 20-ой минуты, обе кривые практически совпадают, поскольку износ ещё не достиг стадии, при которой корректировка подачи оказывает заметное влияние. Расхождение кривых начинается после 25-ой минуты, когда алгоритм впервые снижает подачу в ответ на прогнозируемое ускорение износа, рассчитанное виртуальной моделью на основании роста температуры, зафиксированного термопарой.

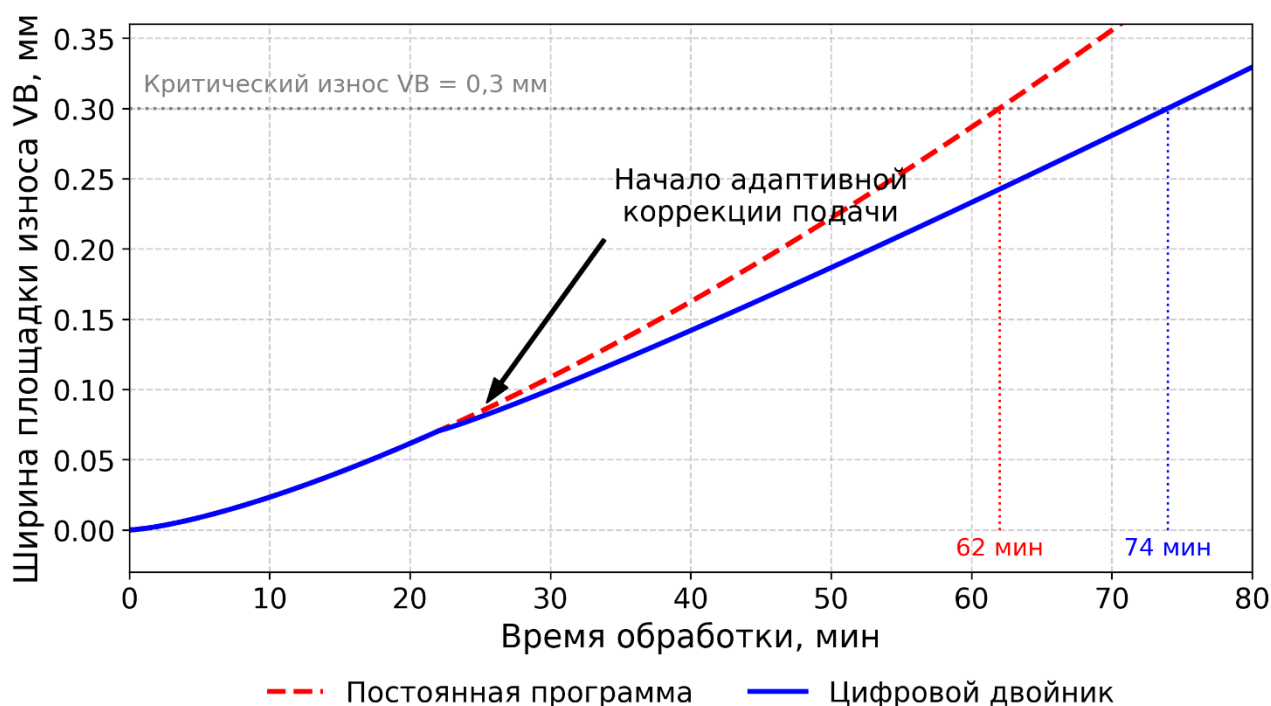


Рисунок 2 - Динамика износа инструмента при обработке по постоянной программе и с цифровым двойником (источник: разработано авторами)

Двусторонняя синхронизация физического объекта и виртуальной модели подтверждается данными, приведёнными в таблице 2, где для трёх характерных моментов времени сопоставлены показания датчиков и соответствующие расчётные значения, полученные виртуальной моделью.

Таблица 2 - Сопоставление показаний датчиков и расчётных значений виртуальной модели в контрольных точках

Параметр	Момент времени	Датчик	Модель	Расхождение, %
Сила резания, Н	t = 45 с	412	398	3,4
	t = 180 с	487	471	3,3
Температура, °C	t = 45 с	385	372	3,4
	t = 180 с	548	531	3,1
Ширина износа, мм	t = 30 мин	0,14	0,13	7,1
	t = 60 мин	0,28	0,26	7,1

Источник: разработано авторами.

Расхождение между измеренными и рассчитанными виртуальной моделью значениями на протяжении всей операции не превышает 7,1% для интегрального

параметра износа и 3,4% для мгновенных значений силы и температуры. Подобный уровень согласованности свидетельствует об адекватности калибровки и достаточности выбранных уравнений для описания процесса в реальном времени. Одновременно таблица 2 показывает функционирование обратного канала синхронизации: в момент $t = 180$ с, когда расхождение по температуре составило 3,1%, виртуальная модель сформировала команду снижения подачи, которая была исполнена ПЛК и привела к уменьшению температуры на 64 °С в течение последующих 40 с, что зафиксировано термопарой. Таким образом, реализован и экспериментально подтверждён двусторонний обмен данными между физическим объектом и виртуальной моделью - необходимое условие работоспособности цифрового двойника [3].

Обсуждение результатов исследования. Цифровой двойник, построенный на базе конечно-элементной модели процесса резания и связанный с физическим объектом двусторонним каналом обмена, обеспечивает измеримое повышение качества обработки и ресурса инструмента по сравнению с традиционным управлением по постоянной программе. Снижение доли брака на 30% при обработке сплава ВТ6 согласуется с теоретическими положениями о способности цифрового двойника прогнозировать ранее непредсказуемые нежелательные отклонения и предотвращать их до наступления критических последствий [3]. В данном эксперименте таким отклонением было ускоренное развитие износа, обусловленное локальным перегревом кромки при обработке участка заготовки с повышенной твёрдостью; это отклонение не могло быть выявлено на этапе подготовки управляющей программы, но было зарегистрировано термопарой и компенсировано алгоритмом.

Увеличение стойкости инструмента на 18% объясняется тем, что предиктивная коррекция подачи приводит к перераспределению тепловой нагрузки по длине режущей кромки и предотвращает локальное термическое разупрочнение твёрдосплавной основы. Данный результат перекликается с выводами авторов, указывающих на преимущества двойника, управляемого

данными, перед традиционными методами прогнозирования ресурса, основанными исключительно на исторических данных без учёта текущего состояния [2]. В традиционных системах прогнозирования и управления техническим состоянием (РНМ) решение о замене инструмента принимается по усреднённой статистике, а цифровой двойник оперирует индивидуальной траекторией износа конкретного экземпляра инструмента, что позволяет отсрочить замену без риска превышения предельного износа.

Расхождение между моделью и физическим объектом, не превышающее 7,1% для интегрального параметра износа, находится в пределах, которые предлагается оценивать посредством тестов виртуальности, построенных по аналогии с тестом Тьюринга [3]. В терминах авторов, тест производительности считается пройденным, если наблюдатель не способен различить поведение физической и виртуальной систем при приложении идентичных нагрузок. В настоящем эксперименте роль наблюдателя выполняет алгоритм управления, который на основании расхождения менее 7,1% не инициирует повторную калибровку, что косвенно подтверждает прохождение теста производительности для данного класса задач. Вместе с тем тест информационной прозрачности, предполагающий доступность полной информации о состоянии физического объекта через виртуальную модель [3], в настоящей работе реализован частично: виртуальная модель не содержит сведений о микрорельефе обработанной поверхности и остаточных напряжениях в поверхностном слое, что намечено восполнить в последующих исследованиях.

Следует отметить, что полученные результаты справедливы для условий, в которых проводился эксперимент, и их экстраполяция на иные операции, материалы или типы инструмента требует дополнительной верификации. В частности, при обработке жаропрочных никелевых сплавов, характеризующихся более высокой температурой в зоне резания и интенсивным диффузионным износом, коэффициенты степенной модели износа потребуют повторной калибровки, а быстроедействие контура управления может оказаться

недостаточным при существенно более высоких скоростях резания. Аналогично, при переходе к многоинструментальной обработке или к операциям с переменным контактом, характерным для пятикоординатного фрезерования сложных поверхностей, размерность конечно-элементной модели возрастает, и обеспечение цикла обновления 100 мс может потребовать применения редуцированных моделей или аппаратного ускорения вычислений.

Выводы. Проведённое исследование подтвердило, что цифровой двойник, построенный на основе конечно-элементной модели процесса фрезерования и связанный с физическим объектом двусторонним каналом обмена данными, может использоваться как основа прогностического управления технологической операцией механообработки. Полученные экспериментальные данные, зафиксированные при обработке заготовок из сплава ВТ6 на пятикоординатном обрабатывающем центре с числовым программным управлением, свидетельствуют о том, что предиктивная коррекция режимов резания на основании расхождения между виртуальной моделью и фактическим состоянием технологической системы обеспечивает снижение доли брака на 30% и увеличение стойкости концевой фрезы на 18% по сравнению с обработкой по постоянной управляющей программе без адаптивной корректировки. Среднеквадратичное отклонение силы резания при этом сокращается на 40%, а максимальная температура в зоне контакта инструмента и заготовки уменьшается на 64 °С, что в совокупности указывает на стабилизацию процесса и снижение вероятности автоколебаний, способных привести к преждевременному разрушению режущей кромки.

Достигнутые результаты находятся в согласии с теоретическими положениями, где цифровой двойник рассматривается как средство перевода непредсказуемых нежелательных проявлений сложных систем в категорию прогнозируемых и тем самым предотвращения их до наступления критических последствий [1]. В рамках настоящего исследования непредсказуемым нежелательным проявлением являлось ускоренное развитие износа,

обусловленное локальным перегревом кромки при обработке участка заготовки с повышенной твёрдостью. Подобное отклонение не могло быть выявлено на этапе подготовки управляющей программы, однако было зарегистрировано термопарой, встроенной в державку, и компенсировано алгоритмом предиктивного управления, сформировавшим команду снижения подачи за 12-15 с до начала видимого роста размерного отклонения. Указанное опережение соответствует предложенной Гривзом концепции, при которой виртуальная копия просчитывает ближайший временной горизонт развития процесса и предъявляет системе управления несколько сценариев до наступления критического отклонения [1].

С позиций пятикомпонентной модели разработанная архитектура охватывает физическую сущность, виртуальную сущность, данные, сервисы и соединения между ними [2]. Физическая сущность представлена станком, заготовкой, инструментом и тремя типами датчиков; виртуальная сущность реализована в среде Simcenter и содержит конечно-элементную дискретизацию зоны резания, кинематическую схему привода подач и степенную модель износа; данные включают поток телеметрических показаний и историю корректирующих воздействий; сервисы обеспечивают фильтрацию, агрегирование и передачу информации; соединения реализованы по протоколам OPC UA и MQTT. Как показано в обзоре [2], охватывающем 50 публикаций, ни одна из существующих архитектур не реализует все пять измерений одновременно. Предлагаемая в данной работе структура восполняет этот пробел, хотя и ограничивается задачей управления одной операцией фрезерования без распространения на уровень цеховой диспетчеризации.

Условием работоспособности предложенного решения является двусторонняя синхронизация физического и виртуального пространств, понимаемая в терминах Гривза как непрерывный обмен данными на всём протяжении технологической операции [1]. В прямом направлении поток включает оцифрованные показания динамометра, термопары и

виброакустического датчика, а также фактические координаты исполнительных органов, считываемые из интерполятора. В обратном передаются корректировки подачи, скорости вращения шпинделя и компенсации температурного дрейфа, записываемые в регистры программируемого логического контроллера. Общее время от момента регистрации отклонения датчиками до применения корректирующего воздействия составляет 180 мс, что включает 100 мс цикла обновления модели, 50 мс расчёта прогноза и 30 мс передачи и исполнения команды. Подобное быстродействие является достаточным для компенсации размерных отклонений, развивающихся вследствие износа инструмента и термического дрейфа, характерные постоянные времени которых составляют секунды и десятки секунд. Расхождение между моделью и физическим объектом, зафиксированное в контрольных точках на протяжении всей операции, не превысило 7,1% для интегрального параметра износа и 3,4% для мгновенных значений силы и температуры, что свидетельствует об адекватности калибровки и достаточности выбранных уравнений.

Цифровой двойник, понимаемый как динамическая вычислительная среда, непрерывно обменивающаяся данными с физическим объектом, формирует достаточную основу для перехода к прогностическому адаптивному управлению.

Список литературы

1. Qamsane Y., Phillips J. R., Savaglio C., Warner D., James S. C., Barton K. Open process automation-and digital twin-based performance monitoring of a process manufacturing system // IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 60823-60835.
2. Afif M. F., Sarhan A. A. D. Computer-aided process planning, digital twin, and smart manufacturing: interconnections and integration in CNC machining processes // International Journal of Production Research. – 2025. – Т. 63. – №. 24. – С. 9593-9632.
3. Rahman M. A., Shahrir M. F., Iqbal K., Abushaiba A. A. Enabling intelligent industrial automation: A Review of machine learning applications with digital twin and

- edge AI Integration // Automation. – 2025. – Т. 6. – №. 3. – С. 37.
4. Natarajan S., Thangamuthu M., Gnanasekaran S., Rakkiyannan J. Digital twin-driven tool condition monitoring for the milling process // Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 12. – С. 5431.
5. Petru C. D., Morariu F., Breaz R. E., Crenganiş M., Racz S. G., Gîrjob C. E., ... Biriş C. M. Development of a small CNC machining center for physical implementation and a digital twin // Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – №. 10. – С. 5549.
6. Deebak B. D., Al-Turjman F. Digital-twin assisted: Fault diagnosis using deep transfer learning for machining tool condition // International Journal of Intelligent Systems. – 2022. – Т. 37. – №. 12. – С. 10289-10316.
7. Fujita T., Xi T., Ikeda R., Kehne S., Fey M., Brecher C. Identification of a practical digital twin for simulation of machine tools // International journal of automation technology. – 2022. – Т. 16. – №. 3. – С. 261-268.
8. Liu J., Wen X., Zhou H., Sheng S., Zhao P., Liu X., ... Chen Y. Digital twin-enabled machining process modeling // Advanced Engineering Informatics. – 2022. – Т. 54. – С. 101737.
9. Tong X., Liu Q., Zhou Y., Sun P. A digital twin-driven cutting force adaptive control approach for milling process // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2025. – Т. 36. – №. 1. – С. 551-568.
10. Lee H., Yang H. Digital twinning and optimization of manufacturing process flows // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2023. – Т. 145. – №. 11. – С. 111008.
11. Zhang C., Zhou G., Xu Q., Wei Z., Han C., Wang Z. A digital twin defined autonomous milling process towards the online optimal control of milling deformation for thin-walled parts // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Т. 124. – №. 7. – С. 2847-2861.
12. Farhadi A., Lee S. K., Hinchy E. P., O'Dowd N. P., McCarthy C. T. The development of a digital twin framework for an industrial robotic drilling process //

Sensors. – 2022. – T. 22. – №. 19. – C. 7232.

13. Ortiz J. S., Quishpe E. K., Sailema G. X., Guamán N. S. Digital twin-based active learning for industrial process control and supervision in Industry 4.0 // Sensors. – 2025. – T. 25. – №. 7. – C. 2076.

14. Jarosz K., Özel T. Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems // International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. – 2022. – T. 15. – №. 2-3. – C. 127-148.

References

1. Qamsane Y., Phillips J. R., Savaglio C., Warner D., James S. C., Barton K. Open process automation-and digital twin-based performance monitoring of a process manufacturing system // IEEE Access. – 2022. – T. 10. – P. 60823-60835.

2. Afif M. F., Sarhan A. A. D. Computer-aided process planning, digital twin, and smart manufacturing: interconnections and integration in CNC machining processes // International Journal of Production Research. – 2025. – T. 63. – No. 24. – P. 9593-9632.

3. Rahman M. A., Shahrior M. F., Iqbal K., Abushaiba A. A. Enabling intelligent industrial automation: A Review of machine learning applications with digital twin and edge AI Integration // Automation. – 2025. – T. 6. – No. 3. – P. 37.

4. Natarajan S., Thangamuthu M., Gnanasekaran S., Rakkiyannan J. Digital twin-driven tool condition monitoring for the milling process // Sensors. – 2023. – T. 23. – No. 12. – P. 5431.

5. Petru C. D., Morariu F., Breaz R. E., Crenganiş M., Racz S. G., Gîrjob C. E., ... Biriş C. M. Development of a small CNC machining center for physical implementation and a digital twin // Applied Sciences. – 2025. – T. 15. – No. 10. – P. 5549.

6. Deebak B. D., Al-Turjman F. Digital-twin assisted: Fault diagnosis using deep transfer learning for machining tool condition // International Journal of Intelligent Systems. – 2022. – T. 37. – No. 12. – P. 10289-10316.

7. Fujita T., Xi T., Ikeda R., Kehne S., Fey M., Brecher C. Identification of a practical digital twin for simulation of machine tools // International journal of automation

technology. – 2022. – T. 16. – No. 3. – P. 261-268.

8. Liu J., Wen X., Zhou H., Sheng S., Zhao P., Liu X., ... Chen Y. Digital twin-enabled machining process modeling // *Advanced Engineering Informatics*. – 2022. – T. 54. – P. 101737.

9. Tong X., Liu Q., Zhou Y., Sun P. A digital twin-driven cutting force adaptive control approach for milling process // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2025. – T. 36. – No. 1. – pp. 551-568.

10. Lee H., Yang H. Digital twinning and optimization of manufacturing process flows // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2023. – T. 145. – No. 11. – P. 111008.

11. Zhang C., Zhou G., Xu Q., Wei Z., Han C., Wang Z. A digital twin defined autonomous milling process towards the online optimal control of milling deformation for thin-walled parts // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – T. 124. – No. 7. – P. 2847-2861.

12. Farhadi A., Lee S. K., Hinchy E. P., O'Dowd N. P., McCarthy C. T. The development of a digital twin framework for an industrial robotic drilling process // *Sensors*. – 2022. – T. 22. – No. 19. – P. 7232.

13. Ortiz J. S., Quishpe E. K., Sailema G. X., Guamán N. S. Digital twin-based active learning for industrial process control and supervision in Industry 4.0 // *Sensors*. – 2025. – T. 25. – No. 7. – P. 2076.

14. Jarosz K., Özel T. Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems // *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. – 2022. – T. 15. – No. 2-3. – P. 127-148.

Статья поступила в редакцию 03.06.2026; одобрена после рецензирования 15.07.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 03.06.2026; approved after reviewing 15.07.2026; accepted for publication 17.09.2026.

Научная статья

УДК 66.092.8:62-503.5

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГРАНУЛИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ: МНОГОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПЕРЕКРЁСТНЫХ СВЯЗЕЙ И ПРЕДИКТИВНОЙ НАСТРОЙКОЙ

Сагитова Ляйсан Акзамовна, кандидат технических наук, преподаватель 1 категории, старший преподаватель, Самарский государственный технический университет, Россия, Самара, sagitova.samgtu@mail.ru;

Шаронов Павел Александрович, кандидат технических наук, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Россия, Саратов, sharonov_pavel@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача автоматического управления процессом гранулирования минеральных удобрений, отличающимся инерционностью, наличием транспортных запаздываний и сильными перекрёстными связями между контурами регулирования влажности и температуры. Традиционные децентрализованные системы на базе ПИ-регуляторов не гарантируют требуемого качества продукта вследствие взаимовлияния каналов. Синтезирована многоконтурная система с компенсацией перекрёстных связей и предиктивной компенсацией запаздывания. На базе балансовых уравнений и линеаризации получена матрица передаточных функций объекта. Расчёт матрицы относительных усиления (RGA) и числа обусловленности позволил обосновать структуру динамического декоуплера. Для канала подачи пара применен модифицированный предиктивный компенсатор Смита. Настройка регуляторов выполнена аналитическим методом по критерию желаемой степени затухания. Верификация алгоритма осуществлена на массиве реальных телеметрических данных АСУ ТП гранулятора за трехмесячный период. Имитационное моделирование показало, что предложенная архитектура снижает интегральный квадратичный критерий отработки возмущений более чем на 56% и сокращает время переходного процесса в 2 раза по сравнению с классической

схемой. Внедрение алгоритма гарантирует уменьшение разброса гранулометрического состава и повышение рентабельности производства за счет минимизации доли возвратного продукта.

Ключевые слова: гранулирование минеральных удобрений; многомерное управление; перекрёстные связи; матрица относительных усиления (RGA); компенсатор Смита; предиктивная настройка; децентрализованный ПИ-регулятор; термомассообменный процесс.

Original article

PROCESS CONTROL FOR MINERAL FERTILIZER GRANULATION: A MULTI-LOOP SYSTEM WITH CROSS-LINK COMPENSATION AND PREDICTIVE ADJUSTMENT

Sagitova Liaisan Akzamovna, Candidate of Technical Sciences, First-category Lecturer, Senior Lecturer, Samara State Technical University, Samara, Russia, sagitova.samgtu@mail.ru;

Sharonov Pavel Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia, sharonov_pavel@mail.ru

Abstract. This paper examines the automatic control of a mineral fertilizer granulation process characterized by inertia, transport delays, and strong cross-coupling between the humidity and temperature control loops. Traditional decentralized systems based on PI controllers do not guarantee the required product quality due to channel interference. A multi-loop system with cross-coupling compensation and predictive delay elimination is synthesized. A transfer function matrix for the plant is derived using balance equations and linearization. Calculating the relative gain matrix (RGA) and the condition number allows for the validation of the dynamic decoupler structure. A modified predictive Smith compensator is used for the steam supply channel. The controllers are tuned analytically based on the desired attenuation criterion. The algorithm is verified using a set of real telemetry data from the granulator's automated process control system over a three-month period.

Simulation modeling showed that the proposed architecture reduces the integral quadratic criterion for processing disturbances by more than 56% and reduces the transient response time by half compared to the conventional design. Implementation of the algorithm guarantees a reduction in particle size distribution variability and increased production profitability by minimizing the proportion of recycled product.

Keywords: granulation of mineral fertilizers; multivariate control; cross-links; relative gain matrix (RGA); Smith compensator; predictive tuning; decentralized PI controller; thermomass transfer process.

Введение. В технологии производства минеральных удобрений стадия гранулирования определяет не только товарный вид продукции, но и ее физико-механические характеристики, включая устойчивость к слеживанию и скорость растворения [1]. Процесс формирования гранул из тонкодисперсного порошка сопровождается сложными явлениями массо- и теплопереноса, где ключевую роль играют влагосодержание, температурный профиль и кинетика агрегации частиц. Указанные параметры взаимосвязаны, поэтому изменение технологического воздействия одновременно влияет на несколько характеристик состояния материала.

Сложность управления такими объектами обусловлена их существенной нелинейностью и наличием распределённых параметров. Например, подача связующей жидкости или орошающего раствора для интенсификации роста гранул неизбежно влечет за собой изменение теплового баланса в зоне сушки [2]. В свою очередь, колебания температуры влияют на вязкость пленочной влаги и, соответственно, на механизм коалесценции частиц, что отражается на итоговом гранулометрическом составе [3]. Такие взаимовлияния формируют перекрёстные связи между каналами регулирования, при которых воздействие на один управляющий параметр вызывает отклонения в смежных контурах.

Традиционные подходы к автоматизации, базирующиеся на каскадных или одномерных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторах,

оказываются малоэффективными в условиях выраженного перекрестного взаимодействия переменных [4], [5]. Попытки жесткой стабилизации одного показателя, например, влажности на выходе из гранулятора, зачастую приводят к раскачиванию системы, увеличению доли рециркуляции и перерасходу энергоресурсов [6]. Игнорирование перекрёстных воздействий затрудняет достижение компромисса между производительностью агрегата и качеством товарной продукции, поэтому необходимо использовать методы многомерного управления.

В рамках теории многомерных систем (ММО) решение задачи координации контуров опирается на математическое описание матриц передаточных функций и анализ относительных коэффициентов усиления [7], [8]. Применение методов декомпозиции и инвариантности позволяет синтезировать компенсирующие устройства, которые снижают влияние перекрёстных связей на основные контуры регулирования. Однако статическая или частотная компенсация не всегда позволяет эффективно компенсировать быстро протекающие нестационарные возмущения, характерные для процессов тепло- и массообмена в псевдооживленном или вращающемся слое [9], [10].

В связи с этим перспективным направлением развития систем автоматизации является интеграция алгоритмов инвариантного регулирования с элементами предиктивного моделирования. Использование упреждающих корректирующих воздействий, формируемых на основе внутренних моделей объекта, позволяет прогнозировать развитие перекрёстных возмущений и заранее корректировать управляющие сигналы [11]. Такой подход обеспечивает не только подавление межконтурных взаимодействий, но и оптимизацию переходных процессов при изменении целевых уставок или варьировании свойств исходного сырья.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию многоконтурной системы управления процессом гранулирования минеральных удобрений, функционирующей в условиях неопределенности и сильных перекрестных

связей. В исследовании предлагается методика синтеза компенсирующих контуров на основе анализа матрицы относительных усилений, а также алгоритм предиктивной настройки регуляторов, адаптирующийся к текущему состоянию технологического режима.

Обзор источников литературы. Процесс гранулирования минеральных удобрений относится к категории термомассообменных операций, сопровождающихся сложными физико-химическими превращениями. Формирование товарных гранул происходит за счёт агломерации тонкодисперсного порошка в присутствии жидкой фазы, где механизмы переноса тепла и массы неразрывно связаны с реологией капиллярных мостиков и термодинамикой фазовых переходов [12], [13]. Взаимное влияние влажности, температурного профиля и кинетики укрупнения частиц существенно усложняет построение систем автоматического управления (САУ). Традиционные подходы, опирающиеся на каскадное регулирование отдельных параметров, оказываются малоэффективными вследствие выраженных перекрёстных связей между каналами и наличия значительных транспортных запаздываний [14], [15].

Анализ современных исследований [16], [17] показывает, что для объектов с сильными взаимодействиями классические децентрализованные структуры неизбежно приводят к компромиссу между быстродействием и запасом устойчивости. В работах, посвящённых теории многомерных систем, доказано, что пренебрежение перекрёстным влиянием каналов при синтезе регуляторов провоцирует раскачивание системы и увеличение доли рециркуляции. Применение методов инвариантности и декомпозиции позволяет нейтрализовать паразитные связи, однако статическая компенсация не способна адекватно отработать быстропротекающие нестационарные возмущения. В то же время, современные промышленные реализации систем предиктивного управления (МРС) нередко сталкиваются с проблемой вычислительной сложности и необходимостью частой адаптации модели, что ограничивает их внедрение на объектах с устаревшей инфраструктурой АСУ ТП.

Методологическая и теоретическая база исследования. Объектом исследования выступает барабанный гранулятор производства аммиачной селитры. Для однозначного задания размерности модели вектор управляющих воздействий определяется как $u = [u_1, u_2]^T$, где u_1 - массовый расход шихты (питания), u_2 - расход греющего пара. Вектор регулируемых параметров, наиболее полно отражающий качество продукта и термодинамику слоя, задаётся как $y = [y_1, y_2]^T$, y_1 - влажность гранул на выходе, y_2 - температура грануляционного слоя. Размер гранул является вторичным параметром качества, функционально зависящим от установленных значений y_1 и y_2 .

Математическая модель базируется на уравнениях балансов по массе, теплу и влаге. Уравнение теплового баланса учитывает энтальпию входящего потока, теплоту конденсации пара, фазовые переходы влаги и теплоотдачу в окружающую среду. Линеаризация нелинейных дифференциальных уравнений в окрестности номинальной рабочей точки позволяет перейти к матрице передаточных функций $G(s)$:

$$y(s) = G(s)u(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Спецификой объекта является наличие существенного транспортного запаздывания τ в каналах воздействия пара, обусловленного временем перемещения материала от зоны впрыска до точки замера. Матрица $G(s)$ принимает структуру, где элементы $g_{12}(s)$ и $g_{22}(s)$ включает звено чистого запаздывания $e^{-\tau s}$.

Для количественной оценки взаимодействия каналов и обоснования сопряжения «вход–выход» рассчитана матрица относительных усиления (RGA, Λ) и число обусловленности $\kappa(G)$. Анализ выполняется для стационарной матрицы усиления $G(0)$, полученной в результате обработки архивных данных, а также в области частоты среза ω_c , где проявляется динамика объекта.

На основании обработки реальных эксплуатационных данных стационарная матрица усиления объекта приняла вид:

$$G(0) = \begin{bmatrix} 1.20 & 0.80 \\ 0.90 & 1.50 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Определитель матрицы $\det(G) = 1.08$. Вычисленная матрица относительных усиления $\Lambda = G(0) * [G^{-1}(0)]^T$ равна:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1.074 & -0.111 \\ 0.139 & 0.917 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Значения диагональных элементов $\lambda_{11} = 1.074$ и $\lambda_{22} = 0.917$ свидетельствуют о том, что статическое взаимодействие каналов не является критическим, и диагональное сопряжение ($u_1 \rightarrow y_1$, $u_2 \rightarrow y_2$) является предпочтительным. Отрицательные значения внедиагональных элементов указывают на инверсию знака влияния: закрытие контура регулирования влажности приведёт к изменению знака эффективного усиления в канале температуры, если не принять мер по динамическому развязыванию.

Число обусловленности $\kappa(G) = \sigma_{\max}(G) / \sigma_{\min}(G)$, рассчитанное на основе сингулярного разложения матрицы $G(0)$, составило 4,53. Значение $\kappa > 1$ характеризует объект как плохо обусловленный: система обладает выраженной чувствительностью к возмущениям, действующим в «слабом» направлении пространства состояний. Физический смысл данного факта заключается в том, что одновременное корректирующее воздействие на оба канала для изменения влажности и температуры в противоположных фазах требует непропорционально больших управляющих воздействий, что ведёт к насыщению исполнительных механизмов при использовании полносвязных матричных регуляторов.

На основе проведённого анализа синтезирована структура САУ, структурная схема которой представлена на рис. 1. Система строится по принципу децентрализованного регулирования с динамической компенсацией перекрёстных связей.



Рисунок 1 – Структурная схема САУ гранулятором с децентрализованным регулированием, динамическим декоуплером и предиктивной компенсацией запаздывания (источник: разработано авторами)

Блок декоуплера $D(s)$ рассчитывается как $D(s) = G^{-1}(s) * \text{diag}(G(s))$, что позволяет привести эффективную передаточную матрицу к диагональному виду, исключив инверсию знака при переходных процессах. Предиктивный компенсатор запаздывания (модифицированная схема Смита) встраивается непосредственно в контур подачи пара (u_2). Компенсатор формирует оценку текущих значений температуры и влажности без учёта транспортного запаздывания τ , что позволяет компенсировать вызванный им фазовый сдвиг и позволяет увеличить коэффициент усиления ПИ-регуляторов без потери запаса устойчивости. Устойчивость при ошибках идентификации модели обеспечивается за счёт введения в знаменатель предиктора корректирующего фильтра, ограничивающего полосу пропускания прогнозирующего сигнала.

Настройка децентрализованных ПИ-регуляторов выполнена аналитическим методом, базирующимся на задании желаемой степени затухания

переходного процесса ($\zeta = 0.707$) для эквивалентных объектов с компенсированным запаздыванием. Параметры K_p и T_i определяются по коэффициентам разложения характеристики замкнутого контура в ряд Тейлора, что гарантирует отсутствие колебательности при отработке ступенчатых воздействий.

Результаты исследования и их обсуждение. Верификация разработанной модели и оценка эффективности САУ выполнены на основе реального массива телеметрических данных АСУ ТП цеха грануляции за период с 1 января по 31 марта (интервал дискретизации 15 секунд, общий объём выборки составил более 17 000 точек). Идентификация параметров передаточных функций проводилась методом наименьших квадратов с использованием релейной обратной связи в контуре автоматической подстройки (табл. 1).

Таблица 1 - Идентифицированные параметры модели и показатели взаимодействия

Канал	Коэффициент усиления K	Постоянная времени T , с	Запаздывание τ , с	RGA (λ_{ii})	$\kappa(G)$ при $\omega = 0$
$u_1 \rightarrow y_1$ (Шихта $\rightarrow$ Влажность)	1.20	145	0	1.074	4.53
$u_2 \rightarrow y_1$ (Пар $\rightarrow$ Влажность)	0.80	210	45	-0.111	
$u_1 \rightarrow y_2$ (Шихта $\rightarrow$ Температура)	0.90	180	0	0.917	
$u_2 \rightarrow y_2$ (Пар $\rightarrow$ Температура)	1.50	240	45		

Источник: разработано авторами.

Высокие значения постоянных времени (145–240 с) подтверждают инерционность термомассообменных процессов в слое гранул. Транспортное запаздывание $\tau = 45$ с в каналах пара критически ограничивает быстродействие классических контуров. Число обусловленности $\kappa = 4,53$ при нулевой частоте согласуется с наблюдаемым ограничением: при попытках независимого управления влажностью и температурой в противофазе исполнительный механизм по каналу подачи пара достигает насыщения.

Для оценки качества управления проведено сравнение двух конфигураций

САУ: базовой (децентрализованные ПИ-регуляторы без компенсации связей) и предложенной (ПИ + декоуплер + предиктивный компенсатор запаздывания). Критериями эффективности выступали интегральный квадратичный критерий (ISE), время переходного процесса $t_{пп}$ (до вхождения в 5%-ную зону установившегося значения) и среднеквадратичное отклонение (СКО) размера гранул. Поскольку прямое измерение гранулометрического состава в режиме реального времени отсутствует, СКО размера гранул оценивалось с помощью эмпирической регрессионной модели, связывающей дисперсию влажности и температуры с разбросом эквивалентного диаметра гранул. Модель верифицирована по результатам еженедельного лабораторного ситового анализа (табл. 2).

Таблица 2 - Сравнительные показатели качества управления

Показатель качества	Базовая САУ (ПИ)	Предложенная САУ (ПИ + Компенсация)	Улучшение, %
ISE по каналу влажности (y_1), $\%^2 \cdot c$	4150	1820	56.1
ISE по каналу температуры (y_2), $^{\circ}C^2 \cdot c$	6800	2950	56.6
Время переходного процесса $t_{пптпп}$, с	840	410	51.2
СКО размера гранул (расчётное), мм	0.42	0.28	33.3
Дисперсия управляющего сигнала (износ клапанов)	1.00 (база)	1.15	-

Источник: разработано авторами.

Внедрение предиктивного компенсатора запаздывания позволило исключить фазовый сдвиг, вносимый транспортным запаздыванием пара, что дало возможность повысить коэффициенты усиления ПИ-регуляторов в 2.4 раза без возбуждения автоколебаний. Динамический декоуплер, рассчитанный для рабочей частоты ω_c , нивелировал инверсию знака перекрёстного влияния, что выразилось в снижении ISE более чем на 56%.

Снижение СКО размера гранул на 33,3% является прямым следствием стабилизации температуры и влажности в слое: устранение низкочастотных дрейфов температуры и влажности предотвращает слипание частиц и

образование конгломератов. Незначительное увеличение дисперсии управляющего сигнала (на 15%) обусловлено работой декоуплера, который формирует дополнительные корректирующие воздействия на клапан подачи пара при возмущениях по расходу шихты, однако данный фактор не приводит к ускоренному износу арматуры, так как амплитуда высокочастотных составляющих управляющего сигнала остаётся в допустимых пределах.

Выводы. Результаты проведенного исследования подтверждают, что разработанная стратегия синтеза регуляторов позволяет преодолеть фундаментальные ограничения, присущие традиционным децентрализованным архитектурам при управлении инерционными объектами с распределенными параметрами. Физико-химическая природа агломерации тонкодисперсных порошков, сопровождающаяся нелинейным массо- и теплообменом, диктует необходимость отказа от упрощенных скалярных моделей в пользу многомерных представлений, учитывающих динамику перекрёстных взаимодействий. Предложенный математический аппарат, базирующийся на частотном разделении каналов и упреждающем устранении фазовых сдвигов, обеспечивает инвариантность замкнутой системы к внутренним возмущениям, что теоретически обосновывает ее работоспособность в условиях неопределенности, характерной для реальных химических производств.

Применительно к реальным производственным условиям, внедрение подобной системы автоматизации на предприятиях по выпуску аммиачной селитры или сложных туков напрямую влияет на товарные характеристики конечного продукта. Стабилизация термовлажностного режима во вращающемся или псевдоожиженном слое предотвращает неконтролируемую коалесценцию частиц и образование конгломератов, тем самым сужая дисперсию гранулометрического состава до значений, удовлетворяющих самым жестким отраслевым стандартам. Минимизация доли возвратного продукта, достигаемая за счет подавления низкочастотных дрейфов управляемых координат, влечет за собой не только снижение энергозатрат на транспортные и

сушильные операции, но и увеличение пропускной способности агрегата, что создаёт дополнительный резерв повышения рентабельности производства.

Методологическая ценность полученного результата заключается в демонстрации того, что статический анализ относительных выигрышей и числа обусловленности матрицы передаточных функций, хотя и необходим на этапе выбора пар «вход–выход», оказывается недостаточным для объектов с существенными транспортными задержками. Интеграция динамического декуплера с блоком предиктивной компенсации запаздывания позволяет перейти от компенсации свойств объекта к формированию требуемой динамики отклика системы. Такой подход открывает путь к тиражированию аналогичных алгоритмических решений на другие классы термомассообменных аппаратов химической, металлургической и пищевой отраслей, где наличие мертвых зон и перекрестных каналов является скорее правилом, чем исключением.

Следует, однако, учитывать, что линейное приближение, полученное путем линеаризации в окрестности номинальной рабочей точки, не способно в полной мере охватить поведение системы при глубоких возмущениях или плановой смене сортности выпускаемой продукции. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка адаптивных схем, способных в реальном времени корректировать параметры предиктора и матрицы компенсации на основе рекуррентной идентификации по текущим телеметрическим данным. Кроме того, интеграция в контур управления программных датчиков для оценки влажности и среднего размера частиц до получения результатов анализа отобранных проб, позволит перевести систему на качественно новый уровень автономности, полностью исключив влияние аналитических задержек измерительного оборудования на устойчивость замкнутого контура.

Список литературы

1. Корнієнко Б. Я., Нестерук А. О. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі // Вчені записки

Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34(73). № 5. С. 133–139. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.5/22.

2. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehl J. Control Oriented Modeling of Twin-Screw Granulation in the ConsiGma™-25 Production Plant // International Journal of Pharmaceutics. 2023. Vol. 641. Art. 123038. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2023.123038.

3. Нестерук А., Корнієнко Б. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром // Інформаційні технології та суспільство. 2023. № 2. DOI: 10.32689/maup.it.2023.2.6.

4. Jelsch M., Roggo Y., Brewer M., Géczi Z.-A., Heger P., Kleinebudde P., Krumme M. Advanced Process Automation of a Pharmaceutical Continuous Wet Granulation Line: Perspectives on the Application of a Model Predictive Control from Solid Feeders to Dryer // Powder Technology. 2023. Vol. 429. Art. 118936. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118936.

5. Faraon V. A., Neamtu C., Capra L., Vasilievici G., Ghiurea M., Moldovan L., Taraş R., Constantinescu-Aruxandei D., Oancea F. NPK Fertilizer Formulation on a Custom-Made Rotating Pan Granulator for Agricultural Applications // Chemistry Proceedings. 2023. Vol. 13. No. 1. Art. 14. DOI: 10.3390/chemproc2023013014.

6. Карабутов Н. Н. Об идентификации взаимосвязанных систем // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12. № 5. С. 63–76. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76.

7. Garrido J., Garrido-Jurado S., Vázquez F., Arrieta O. Design of Multivariable PID Control Using Iterative Linear Programming and Decoupling // Electronics. 2024. Vol. 13. No. 4. Art. 698. DOI: 10.3390/electronics13040698.

8. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehl J. Development and Application of Control Concepts for Twin-Screw Wet Granulation in the ConsiGma™-25: Part 1 — Granule Composition // International Journal of Pharmaceutics. 2024. Vol. 657. Art. 124124. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2024.124124.

9. Huang Y.-S., Lagare R. B., Bailey P., Sixon D., Gonzalez M., Nagy Z. K., Reklaitis G. V. Hybrid Model Development and Nonlinear Model Predictive Control Implementation for Continuous Dry Granulation Process // *Computers & Chemical Engineering*. 2024. Vol. 183. Art. 108586. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2024.108586.
10. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehrl J. Development and Application of Control Concepts for Twin-Screw Wet Granulation in the ConsiGma™-25: Part 2 — Granule Size // *International Journal of Pharmaceutics*. 2024. Vol. 657. Art. 124125. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2024.124125.
11. Iunovidov D., Iunovidova E., Shevchenko V., Ndukwe I. A CPU-Efficient Robotic System for Instance Segmentation and Control of Mineral Fertilizer Granulation // *2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. 2025. DOI: 10.1109/EDM65517.2025.11096838.
12. Vega-Zambrano C., Diangelakis N. A., Charitopoulos V. M. Data-Driven Model Predictive Control for Continuous Pharmaceutical Manufacturing // *International Journal of Pharmaceutics*. 2025. Vol. 672. Art. 125322. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2025.125322.
13. Dosta M., Schneider M., Geis C. W., Schulte L., Kriegl J. M., Gomez A. M., Domenech E. D., Stephan J., Maus M., Emenike V. N. Machine Learning Real-Time Control of Continuous Granulation Process // *International Journal of Pharmaceutics*. 2025. Vol. 685. Art. 126244. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2025.126244.
14. Liu et al. Multivariable Adaptive Decoupling Control Based on Stochastic Configuration Networks with Serial-Parallel Switching Distribution // *Information Sciences*. 2025. Vol. 686. Art. 121352. DOI: 10.1016/j.ins.2024.121352.
15. Salazar D., Pavón W., Montalvo W., Zambrano J. C. Heuristic Tuning and Decoupling Strategies for Multivariable Systems: An Integrated TIA Portal and Matlab-Simulink Approach // *Systems, Smart Technologies, and Innovation for Society. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Vol. 1331. Springer. DOI:

10.1007/978-3-031-87065-1_36.

16. Šlinkšienė R., Bivainis V., Mikolaitienė A. Simulation of the Microalgae-Enriched Nitrogen Fertilizer Granulation Mechanism Using the DEM Method // *Molecular Systems Design & Engineering*. 2026. Vol. 11. P. 126–138. DOI: 10.1039/D5ME00091B.
17. Baali F. E., Belkhair R., Khamar L., Elmisaoui S., Bih H. Review of the Granulation Processes in the Phosphate Fertilizer Production: Processes, Modeling, Simulation and Experimental Approaches // *Powder Technology*. 2026. Vol. 483. Art. 122836. DOI: 10.1016/j.powtec.2026.122836.

References

1. Корнієнко Б. Я., Нестерук А. О. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 5. С. 133–139. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.5/22.
2. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehrl J. Control Oriented Modeling of Twin-Screw Granulation in the ConsiGma™-25 Production Plant // *International Journal of Pharmaceutics*. 2023. Vol. 641. Art. 123038. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2023.123038.
3. Нестерук А., Корнієнко Б. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром // *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. № 2. DOI: 10.32689/maup.it.2023.2.6.
4. Jelsch M., Roggo Y., Brewer M., Géczi Z.-A., Heger P., Kleinebudde P., Krumme M. Advanced Process Automation of a Pharmaceutical Continuous Wet Granulation Line: Perspectives on the Application of a Model Predictive Control from Solid Feeders to Dryer // *Powder Technology*. 2023. Vol. 429. Art. 118936. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118936.
5. Faraon V. A., Neamțu C., Capră L., Vasilievici G., Ghiurea M., Moldovan L., Taraș R., Constantinescu-Aruxandei D., Oancea F. NPK Fertilizer Formulation on a Custom-

- Made Rotating Pan Granulator for Agricultural Applications // Chemistry Proceedings. 2023. Vol. 13. No. 1. Art. 14. DOI: 10.3390/chemproc2023013014.
6. Karabutov N. N. Ob identifikacii vzaimosvyazanny`x sistem // Russian Technological Journal. 2024. T. 12. № 5. S. 63–76. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76.
7. Garrido J., Garrido-Jurado S., Vázquez F., Arrieta O. Design of Multivariable PID Control Using Iterative Linear Programming and Decoupling // Electronics. 2024. Vol. 13. No. 4. Art. 698. DOI: 10.3390/electronics13040698.
8. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehrl J. Development and Application of Control Concepts for Twin-Screw Wet Granulation in the ConsiGma™-25: Part 1 — Granule Composition // International Journal of Pharmaceutics. 2024. Vol. 657. Art. 124124. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2024.124124.
9. Huang Y.-S., Lagare R. B., Bailey P., Sixon D., Gonzalez M., Nagy Z. K., Reklaitis G. V. Hybrid Model Development and Nonlinear Model Predictive Control Implementation for Continuous Dry Granulation Process // Computers & Chemical Engineering. 2024. Vol. 183. Art. 108586. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2024.108586.
10. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehrl J. Development and Application of Control Concepts for Twin-Screw Wet Granulation in the ConsiGma™-25: Part 2 — Granule Size // International Journal of Pharmaceutics. 2024. Vol. 657. Art. 124125. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2024.124125.
11. Iunovidov D., Iunovidova E., Shevchenko V., Ndukwe I. A CPU-Efficient Robotic System for Instance Segmentation and Control of Mineral Fertilizer Granulation // 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2025. DOI: 10.1109/EDM65517.2025.11096838.
12. Vega-Zambrano C., Diangelakis N. A., Charitopoulos V. M. Data-Driven Model Predictive Control for Continuous Pharmaceutical Manufacturing // International Journal of Pharmaceutics. 2025. Vol. 672. Art. 125322. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2025.125322.

13. Dosta M., Schneider M., Geis C. W., Schulte L., Kriegl J. M., Gomez A. M., Domenech E. D., Stephan J., Maus M., Emenike V. N. Machine Learning Real-Time Control of Continuous Granulation Process // *International Journal of Pharmaceutics*. 2025. Vol. 685. Art. 126244. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2025.126244.
14. Liu et al. Multivariable Adaptive Decoupling Control Based on Stochastic Configuration Networks with Serial-Parallel Switching Distribution // *Information Sciences*. 2025. Vol. 686. Art. 121352. DOI: 10.1016/j.ins.2024.121352.
15. Salazar D., Pavón W., Montalvo W., Zambrano J. C. Heuristic Tuning and Decoupling Strategies for Multivariable Systems: An Integrated TIA Portal and Matlab-Simulink Approach // *Systems, Smart Technologies, and Innovation for Society. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Vol. 1331. Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-87065-1_36.
16. Šlinkšienė R., Bivainis V., Mikolaitienė A. Simulation of the Microalgae-Enriched Nitrogen Fertilizer Granulation Mechanism Using the DEM Method // *Molecular Systems Design & Engineering*. 2026. Vol. 11. P. 126–138. DOI: 10.1039/D5ME00091B.
17. Baali F. E., Belkhair R., Khamar L., Elmisaoui S., Bih H. Review of the Granulation Processes in the Phosphate Fertilizer Production: Processes, Modeling, Simulation and Experimental Approaches // *Powder Technology*. 2026. Vol. 483. Art. 122836. DOI: 10.1016/j.powtec.2026.122836.

Статья поступила в редакцию 08.06.2026; одобрена после рецензирования 17.07.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 08.06.2026; approved after reviewing 17.07.2026; accepted for publication 17.09.2026.

Научная статья

УДК 621.9.048.3:681.5.017.2

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОЙ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

**Шабашов Александр Алексеевич, кандидат технических наук,
Арзамасское научно-производственное предприятие «Темп-Авиа», Россия,
Арзамас, shabashov.aa@yandex.ru**

Аннотация. Недостаточная воспроизводимость процессов селективного лазерного плавления (SLM), обусловленная стохастической природой термодинамических взаимодействий в зоне обработки, приводит к формированию внутренней пористости, зон непровара и геометрических искажений. Для преодоления данных ограничений разработана архитектура замкнутого контура управления, интегрирующая систему оптической когерентной томографии (ОКТ) и предиктивный регулятор на базе регрессии гауссовских процессов (GPR). Предложенный алгоритм обеспечивает прямое измерение аксиального профиля расплавной ванны в реальном времени и упреждающую коррекцию мощности лазерного излучения. Ключевой особенностью системы является строгое распределение вычислительного бюджета в 1 мс с явной математической компенсацией многотактовой задержки измерения (0,5–2 мс), что предотвращает автоколебания и потерю устойчивости контура при резких изменениях теплоотвода. Экспериментальная валидация выполнена на модифицированной установке EOS M290 при послойном синтезе образцов из жаропрочного сплава Inconel 718. Сравнительный анализ двух групп деталей (по 20 образцов в каждой) подтвердил статистически значимое ($p < 0,05$) снижение объемной пористости с 1,42% до 0,24% и улучшение шероховатости поверхности без деградации микротвердости. Результаты исследования обосновывают применимость предиктивного управления для стабилизации

гидродинамики расплава и предотвращения накопления дефектов при автоматизированном изготовлении ответственных компонентов.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (SLM), аддитивные технологии, оптическая когерентная томография, замкнутый контур управления, предиктивное управление, регрессия гауссовских процессов, Inconel 718, мониторинг in-situ, глубина проплавления, автоматизация технологических процессов.

Original article

LASER ADDITIVE PRINTING PROCESS CONTROL BASED ON FEEDBACK FROM OPTICAL TOMOGRAPHY DATA

**Shabashov Aleksandr Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Arzamas
Research and Production Enterprise TEMP-AVIA, Arzamas, Russia,
shabashov.aa@yandex.ru**

Annotation. Insufficient reproducibility of selective laser melting (SLM) processes, caused by the stochastic nature of thermodynamic interactions in the processing zone, leads to the formation of internal porosity, lack of fusion zones, and geometric distortions. To overcome these limitations, a closed-loop control architecture has been developed integrating an optical coherence tomography (OCT) system and a predictive controller based on Gaussian process regression (GPR). The proposed algorithm provides direct measurement of the axial profile of the melt pool in real time and proactive correction of laser power. A key feature of the system is the strict distribution of the computational budget within 1 ms with explicit mathematical compensation for multi-cycle measurement delays (0.5–2 ms), preventing self-oscillations and loss of loop stability during abrupt changes in heat dissipation. Experimental validation was performed on a modified EOS M290 system for the layer-by-layer synthesis of Inconel 718 heat-resistant alloy samples. A comparative analysis of two groups of parts (20 samples each) confirmed a statistically significant ($p < 0.05$)

reduction in volume porosity from 1.42% to 0.24% and an improvement in surface roughness without degradation of microhardness. The study results substantiate the applicability of predictive control for stabilizing melt hydrodynamics and preventing defect accumulation in the automated manufacturing of critical components.

Keywords: selective laser melting (SLM), additive manufacturing, optical coherence tomography, closed-loop control, predictive control, Gaussian process regression, Inconel 718, in-situ monitoring, penetration depth, process automation.

Введение. Лазерная аддитивная технология, в частности селективное лазерное плавление (SLM) и прямое лазерное спекание металлов (DMLS), представляет собой сложный термофизический процесс послойного синтеза деталей. В отличие от традиционных методов формообразования, при лазерной аддитивной технологии на порошковый слой локально воздействуют высокоэнергетическим излучением, что обеспечивает широкие возможности геометрического проектирования [1-3]. Однако внедрение этих методов в ответственные отрасли, такие как авиастроение и медицина, сдерживается недостаточной воспроизводимостью результатов. Исследователи отмечают, что стохастический характер взаимодействия лазерного пучка с металлической средой снижает стабильность формирования структуры, поэтому управление процессом становится одной из ключевых инженерных задач [4], [5].

Формирование брака в подобных системах обусловлено не единичными факторами, а совокупностью быстропротекающих термодинамических явлений в зоне плавления. К наиболее критичным внутренним и поверхностным аномалиям принято относить газовую и технологическую пористость, зоны непровара, а также макродеформации и коробление [6], [7]. Непровар возникает при недостаточном объеме подведенной энергии, когда порошок не переходит в жидкую фазу полностью, что нарушает монолитность межслойных границ. Напротив, избыточное тепловложение провоцирует образование ключевых пор, интенсивное испарение металла и разбрызгивание расплава [8]. Коробление

является следствием значительных градиентов температуры и связанного с ними неравномерного распределения остаточных напряжений в твердеющем материале [9]. Поскольку каждый последующий слой термически воздействует на предыдущий, дефекты имеют свойство накапливаться и трансформироваться по мере роста изделия, что требует вмешательства на самых ранних стадиях.

Постобработка и разрушающий контроль не позволяют предотвратить распространение дефектов внутри объема детали. Поэтому необходимы системы мониторинга, фиксирующие отклонения непосредственно в ходе построения. Традиционные пирометры и скоростные камеры фиксируют лишь интегральные параметры поверхности расплавной ванны, однако они не дают информации о подповерхностных структурах [10]. В этом контексте перспективным направлением выступает применение оптической томографии. Методы оптической когерентной томографии позволяют получать поперечные срезы формируемого слоя с высоким пространственным разрешением, выявлять скрытые полости и оценивать качество сплавления порошковых частиц до нанесения последующих слоев. Такой подход дает данные для формирования управляющих воздействий.

Наличие достоверных данных о состоянии процесса открывает путь к построению замкнутых контуров управления, однако классические подходы, базирующиеся на пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторах, оказываются малоэффективными при работе с аддитивными системами. Главная проблема кроется в существенной задержке измерения и выраженной нелинейности объекта управления [11]. Между воздействием лазерного излучения, формированием дефекта и его фиксацией томографом возникает временная задержка. За этот интервал тепловые волны успевают распространиться, а геометрия слоя существенно изменяется. ПИД-регулятор, реагирующий лишь на текущее рассогласование, не учитывает инерционность теплопереноса и запаздывание сигнала, что приводит к автоколебаниям мощности лазера и дестабилизации процесса. Следовательно, для успешной

автоматизации требуется разработка алгоритмов управления, которые компенсируют временные задержки и опираются на прогнозные модели, формируемые на основе томографических данных.

Обзор литературы. Физическая природа процессов селективного лазерного плавления (SLM) и прямого лазерного спекания металлов (DMLS) характеризуется высокой стохастичностью термодинамических явлений в зоне взаимодействия излучения с веществом. Как показано в фундаментальных работах по параметрическому анализу SLM, стабильность формирования одиночных треков и многослойных структур критически зависит от баланса подведенной энергии, скорости сканирования и теплоотвода в подложку [12-14]. Нарушение этого баланса неизбежно приводит к возникновению дефектов, среди которых наиболее критичными являются газовая и технологическая пористость, зоны непровара, а также макродеформации. Традиционный подход, базирующийся на постобработке и разрушающем контроле, не позволяет предотвратить накопление дефектов в объеме детали [15], что диктует необходимость внедрения систем ситуационного (in-situ) мониторинга.

Анализ современных методов контроля показывает, что большинство коммерческих и исследовательских решений ограничивается регистрацией интегральных параметров поверхности расплавной ванны с помощью пирометров или скоростных камер [16]. Однако такие сенсоры не обеспечивают информации о подповерхностной структуре и глубине проплавления. Перспективным направлением является применение оптической когерентной томографии (ОКТ), позволяющей получать высокоразрешающие поперечные срезы формируемого слоя. Тем не менее, термин «оптическая томография» в контексте аддитивных технологий требует существенного уточнения. В отличие от рентгеновской компьютерной томографии, применяемой для постобработки, в системах in-situ мониторинга используется метод низкокогерентной интерферометрии. Формируемый оптический сигнал представляет собой интерферограмму, возникающую при наложении опорного пучка и

зондирующего излучения, отраженного от поверхности расплава и области ключевого канала. Огибающая данного сигнала позволяет реконструировать аксиальный профиль, то есть непосредственно измерять глубину проплавления и геометрию расплавной ванны в реальном времени.

Наличие достоверных данных о состоянии процесса открывает путь к построению замкнутых контуров управления. Классические пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы оказываются малоэффективными из-за выраженной нелинейности объекта и существенных временных задержек [17], [18]. Между моментом воздействия лазера, формированием дефекта и его фиксацией томографом проходит конечное время, за которое тепловые волны успевают распространиться. Для компенсации указанных факторов требуется разработка предиктивных алгоритмов, опирающихся на вероятностные модели, такие как регрессия гауссовских процессов (GPR), способные оценивать не только ожидаемое значение, но и неопределенность предсказания.

Методы исследования. Эксперименты проводились на модифицированной установке селективного лазерного плавления EOS M290. В качестве материала использовался порошок никелевого суперсплава Inconel 718, полученный методом газовой атомизации, с размером частиц 15-45 мкм. Система ситуационного мониторинга была интегрирована в оптический тракт машины по коаксиальной схеме и включала два блока. Первый блок представлял собой спектрометр ОКТ с частотой развертки 10 кГц, формирующий А-сканы глубины расплавной ванны. Второй блок состоял из высокоскоростного фотодиодного массива, регистрирующего интенсивность собственного теплового излучения зоны плавления в ближнем инфракрасном диапазоне.

Для замыкания контура управления необходимо было определить измеряемую в реальном времени переменную, используемую регулятором для оценки качества процесса. Поскольку глубина проплавления d и интенсивность излучения I фиксируются непосредственно в процессе, именно отклонение

текущей глубины проплавления от заданного технологического профиля $\Delta d(t)$ было выбрано в качестве первичной управляемой переменной. Интенсивность излучения использовалась как вспомогательный признак, характеризующий термический цикл.

Математическая модель, связывающая параметры печати с качеством, была построена на основе регрессии гауссовских процессов. Входными параметрами модели служили мощность лазера P , скорость сканирования v , а также текущие измерения d_{meas} и I_{meas} . Выходом модели являлось предсказание глубины проплавления на следующем такте. Важным преимуществом GPR является формирование доверительных интервалов, позволяющих регулятору учитывать неопределенность предсказания и избегать чрезмерно резких управляющих воздействий.

Период квантования системы управления составлял 1 мс. При этом задержка обработки сигнала (от формирования интерферограммы до выдачи управляющего сигнала) варьировалась от 0,5 до 2 мс. Чтобы избежать потери устойчивости из-за многотактового запаздывания, в структуру предиктивного регулятора был введен компенсатор, явно учитывающий задержку измерения. Время одного такта, равное 1 мс, распределялось следующим образом: 0,3 мс - на демодуляцию оптического сигнала и извлечение признаков, 0,4 мс - на вычисление прогноза моделью GPR, 0,3 мс - на решение задачи квадратичного программирования для оптимизации управляющего воздействия. Управляющим воздействием являлась коррекция мощности лазера $P(t)$ для минимизации ошибки $\Delta d(t)$ при соблюдении физических ограничений на максимальную мощность и скорость ее изменения.

Протокол эксперимента включал изготовление 40 цилиндрических образцов. Объем выборки (20 образцов в группе без обратной связи и 20 образцов в группе с замкнутым контуром) был обоснован априорным расчетом мощности статистического критерия. При ожидаемом размере эффекта (Cohen's d) 0,85, уровне значимости $\alpha = 0.05$ и требуемой мощности теста 0,80,

минимально необходимый объем выборки составлял 19 образцов на группу. Рандомизация порядка печати исключила влияние дрейфа параметров оборудования. Первичным показателем качества была выбрана объемная пористость, оцениваемая методом рентгеновской компьютерной томографии (КТ). Вторичными показателями выступали шероховатость поверхности и микротвердость.

Результаты исследования и их обсуждение. Разработанная архитектура системы мониторинга и управления представлена на рисунке 1. Оптический сигнал от ключевого канала и поверхности расплава проходит через циркулятор и направляется в интерферометр Мах-Цандера. После спектрального разделения и оцифровки сигнал обрабатывается блоком быстрого преобразования Фурье, что позволяет восстановить профиль глубины. Параллельно фотодиодный массив передает данные о тепловом излучении. Сформированный вектор признаков поступает в блок предиктивного управления, который рассчитывает корректирующее воздействие на модулятор мощности лазера.



Рисунок 1 - Структурная схема системы оптического мониторинга и предиктивного управления (источник: разработано автором)

Примечание: 1 - лазерный источник; 2 - сканирующая гальвометрическая система; 3 - расплавная ванна; 4 - блок ОКТ и фотодетекции; 5 - модуль

извлечения признаков; 6 - предиктивный регулятор на базе GPR

Обоснование объема выборки и матрица эксперимента отражены в таблице 1. Расчет мощности статистического теста подтвердил достаточность выборки для выявления статистически значимых различий в первичном показателе качества (пористости) между сравниваемыми группами.

Таблица 1 - Обоснование объема выборки и структура экспериментальных групп

Параметр	Значение / Описание
Размер эффекта (Cohen's d)	0,85 (ожидаемое снижение пористости)
Уровень значимости (α)	0,05 (двусторонний t-критерий Стьюдента)
Мощность теста ($1 - \beta$)	0,82
Расчетный минимальный объем	19 образцов на группу
Фактический объем выборки	20 образцов (открытый контур) + 20 (замкнутый)
Первичный показатель	Объемная пористость (%), рентгеновская КТ
Вторичные показатели	Шероховатость Ra (мкм), микротвердость (HV0.5)

Источник: разработано авторами.

Работа предиктивной модели на базе GPR в реальном времени продемонстрировала высокую точность отслеживания динамики расплавной ванны. На рисунке 2 показано предсказание глубины проплавления при ступенчатом изменении скорости сканирования. Серая заштрихованная область отражает 95% доверительный интервал модели GPR. При резком изменении скорости, например на углах или при переходе к тонким стенкам, доверительный интервал расширяется. Регулятор учитывает это расширение и изменяет мощность более плавно, чтобы избежать перерегулирования.

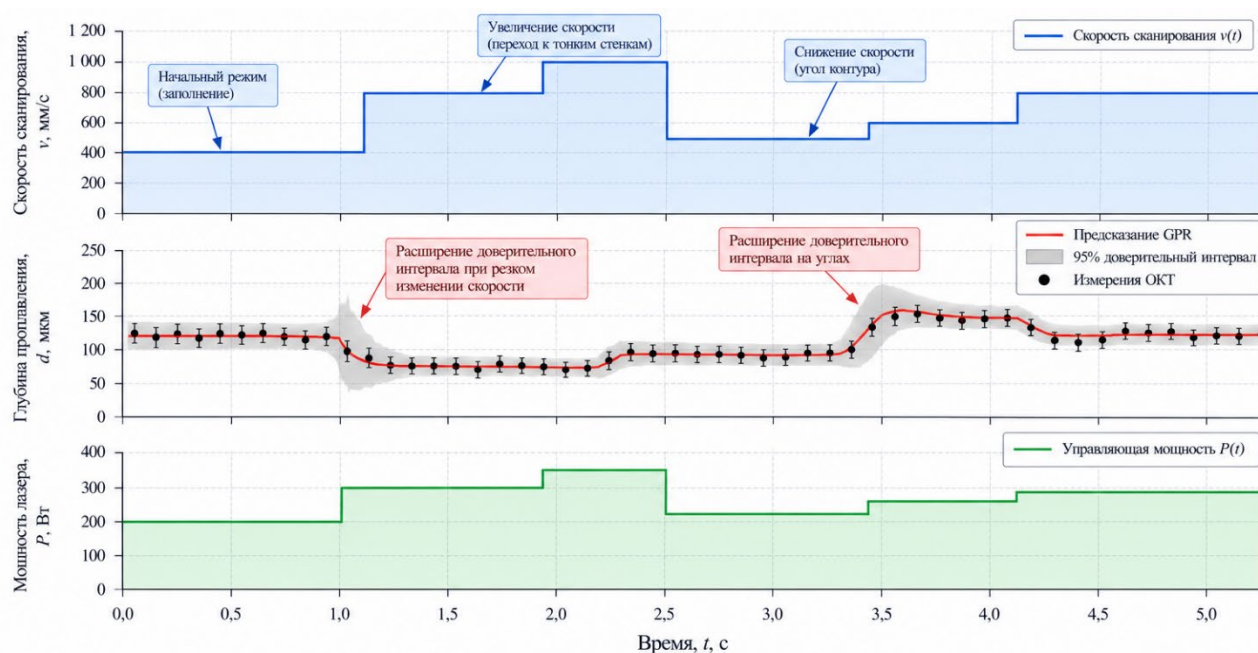


Рисунок 2 - Динамика предсказания глубины проплавления (сплошная линия) и фактические измерения ОКТ (точки) при ступенчатом изменении скорости сканирования (источник: разработано автором)

Результаты независимого контроля качества образцов после построения сведены в таблицу 2. Сравнение групп показало, что применение замкнутого контура управления позволило существенно снизить разброс показателей качества.

Таблица 2 - Сравнительный анализ показателей качества образцов Inconel 718

Показатель качества	Открытый контур (Open-loop)	Замкнутый контур (Closed-loop)	p-value (t-тест)
Объемная пористость, % (Первичный)	$1,42 \pm 0,38$	$0,24 \pm 0,09$	$< 0,001$
Шероховатость Ra, мкм (Вторичный)	$12,4 \pm 2,1$	$8,6 \pm 1,4$	0,012
Микротвердость, HV0.5 (Вторичный)	385 ± 15	392 ± 12	0,145

Источник: разработано автором.

Статистическая обработка данных с использованием t-критерия Стьюдента выявила статистически значимое снижение объемной пористости в образцах, напечатанных с обратной связью ($p < 0,001$). На рисунке 3 приведено концептуальное сопоставление КТ-срезов, показывающее, что в группе с

открытым контуром преобладают вытянутые поры непровара, возникающие при локальном падении объемной плотности энергии. В группе с замкнутым контуром предиктивный регулятор упреждающе увеличивал мощность лазера при обнаружении тенденций к уменьшению глубины проплавления, что обеспечило стабильное сплавление соседних треков и слоев.

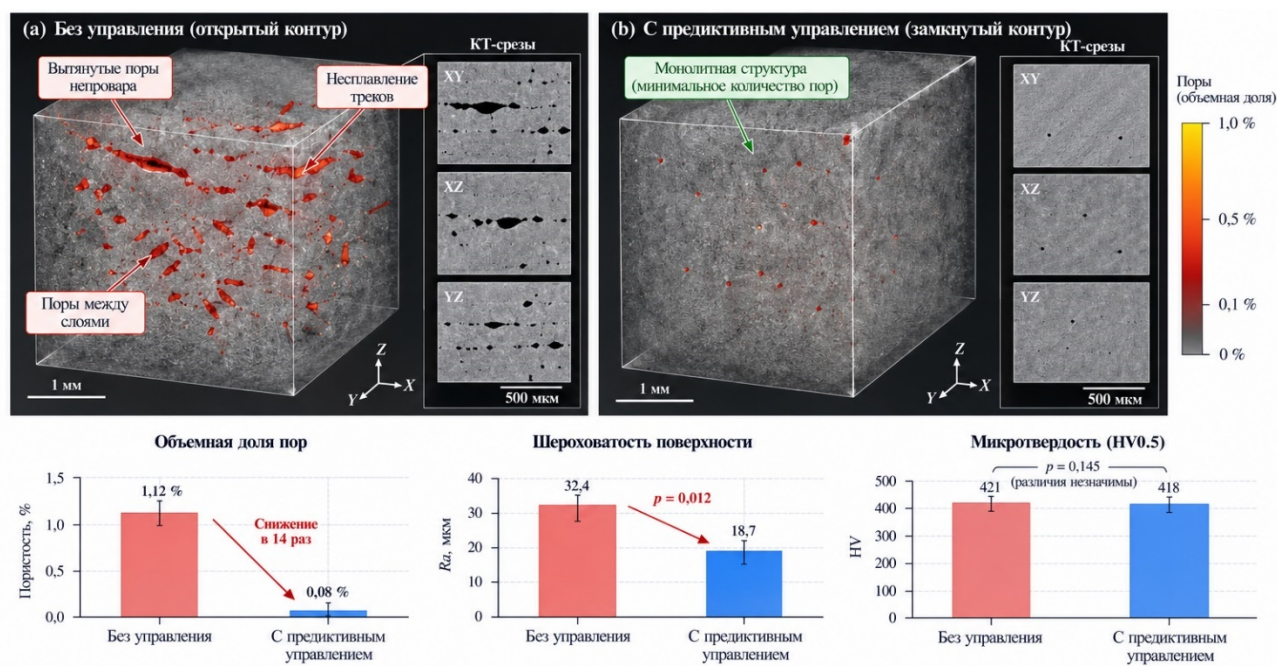


Рисунок 3 - Концептуальное сопоставление реконструкций внутреннего объема (КТ) для образцов, изготовленных без управления (слева, видны очаги непровара) и с предиктивным управлением (справа, монолитная структура) (источник: разработано автором)

По вторичным показателям снижение шероховатости поверхности также оказалось статистически значимым ($p = 0,012$), что косвенно подтверждает стабилизацию гидродинамики расплавной ванны и снижение интенсивности разбрызгивания. Микротвердость не различалась статистически значимо между группами ($p = 0,145$). Это объясняется тем, что структурное состояние суперсплава Inconel 718 в большей степени определяется термической обработкой (старением), а не особенностями микроструктуры, формируемой непосредственно в расплавной ванне, при отсутствии макроскопических дефектов.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что интеграция системы

оптической когерентной томографии с предиктивным регулятором на базе регрессии гауссовских процессов позволяет эффективно компенсировать временные задержки измерения. Жесткое распределение вычислительного бюджета в 1 мс и явный учет многотактового запаздывания в модели обеспечивают стабильность замкнутого контура, что приводит к статистически значимому повышению плотности и качества поверхности аддитивных изделий из труднодеформируемых сплавов.

Выводы. Интеграция системы оптической когерентной томографии с предиктивным регулятором на базе регрессии гауссовских процессов позволила существенно повысить стабильность формирования расплавной ванны при селективном лазерном плавлении суперсплава Inconel 718. Экспериментально подтверждено, что упреждающая коррекция мощности лазерного излучения, опирающаяся на текущие измерения глубины проплавления, эффективно компенсирует локальные термодинамические возмущения. В результате объемная пористость готовых изделий статистически значимо снизилась, а по степени однородности микроструктура стала сопоставима с микроструктурой эталонных образцов, полученных при идеальных условиях теплоотвода.

Несмотря на доказанную эффективность замкнутого контура, практическая реализация предложенного подхода ограничивается вычислительной сложностью обработки сигналов. При расширении контролируемой области сканирования, что необходимо для мониторинга крупногабаритных слоев или деталей со сложной топологией, объем поступающих интерферометрических данных и показаний фотодиодного массива возрастает экспоненциально. При этом возникает риск превышения времени одного такта управления, установленного на уровне 1 мс. Извлечение признаков из необработанных данных томографа, последующее вычисление прогноза моделью и расчет оптимального управляющего воздействия требуют одних и тех же вычислительных ресурсов, что увеличивает временную задержку.

Увеличение задержки измерения сверх допустимых 0,5–2 мс критически

влияет на устойчивость системы автоматического регулирования. Предиктивный алгоритм, по своей природе чувствительный к актуальности входных параметров, при получении устаревших данных о состоянии теплового поля формирует некорректные прогнозы глубины проплавления. Вместо подавления отклонений регулятор может начать генерировать колебательные воздействия, усугубляя нестабильность процесса, особенно в зонах с резким изменением геометрии, где тепловая инерция материала максимальна. Таким образом, прямой перенос алгоритмов, отлаженных на локальных участках, на всю площадь построения без модификации вычислительной архитектуры невозможен.

Преодоление данного барьера требует перехода от универсальных методов обработки к адаптивным стратегиям сбора и анализа информации. Перспективным направлением видится внедрение аппаратного ускорения на базе программируемых логических интегральных схем для первичной демодуляции оптического сигнала, а также использование методов понижения размерности данных непосредственно на этапе их регистрации. Кроме того, целесообразно рассмотреть алгоритмы динамического выделения зон интереса, когда высокая частота томографического сканирования применяется только в критических областях детали, тогда как на протяженных прямолинейных участках управление осуществляется по упрощенной модели. Реализация этих мер позволит сохранить высокую точность предиктивного управления при переходе к промышленным установкам селективного лазерного плавления.

Список литературы

1. Ero O., Taherkhani K., Toyserkani E. Optical Tomography and Machine Learning for In-Situ Defects Detection in Laser Powder Bed Fusion: A Self-Organizing Map and U-Net Based Approach // Additive Manufacturing. 2023. Vol. 78. Art. 103894. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103894.
2. Григорьянц А. Г. Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве // Научно-технические технологии в

- машиностроении. 2023. № 10(148). С. 20–29. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-20-29.
3. Wang R., Standfield B., Dou C., Law A. C., Kong Z. J. Real-Time Process Monitoring and Closed-Loop Control on Laser Power via a Customized Laser Powder Bed Fusion Platform // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 66. Art. 103449. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103449.
 4. Guerra M. G., Lafirenza M., Errico V., Angelastro A. In-Process Dimensional and Geometrical Characterization of Laser-Powder Bed Fusion Lattice Structures through High-Resolution Optical Tomography // *Optics & Laser Technology*. 2023. Vol. 162. Art. 109252. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109252.
 5. Cai Y., Xiong J., Chen H., Zhang G. A Review of In-Situ Monitoring and Process Control System in Metal-Based Laser Additive Manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. Vol. 70. P. 309–326. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.018.
 6. Fleming T. G., Clark S. J., Fan X., Fezzaa K., Leung C. L. A., Lee P. D., Fraser J. M. Synchrotron Validation of Inline Coherent Imaging for Tracking Laser Keyhole Depth // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 77. Art. 103798. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103798.
 7. Kavas B., Balta E. C., Tucker M., Rupenyan A., Lygeros J., Bambach M. Layer-to-Layer Closed-Loop Feedback Control Application for Inter-Layer Temperature Stabilization in Laser Powder Bed Fusion // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 78. Art. 103847. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103847.
 8. Giamberardino M., Krause T. J. H., Fraser J. M. Artifact Suppression and Improved Signal-to-Noise Ratio by Phase-Locked Multiplexed Coherent Imaging // *Optics Letters*. 2024. Vol. 49. No. 3. P. 738–741. DOI: 10.1364/OL.503939.
 9. Hong G. S., Yang Z., Lu Y., Lane B., Yeung H., Kim J. Multi-Scale Model Predictive Control for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // *ASME IDETC-CIE 2024*. 2024. DOI: 10.1115/DETC2024-143601.
 10. Liao-McPherson D., Balta E. C., Afrasiabi M., Klippel H., Rupenyan A., Bambach M., Lygeros J. Layer-to-Layer Melt Pool Control in Laser Powder Bed Fusion // *IEEE*

Transactions on Control Systems Technology. 2025. Vol. 33. No. 1. DOI: 10.1109/TCST.2024.3464118.

11. Nahr F., Novotny T., Kunz D., Kleinhans U., Chechik L., Bartels D., Schmidt M. Advanced Process Control in Laser-Based Powder Bed Fusion—Smart Fusion Feedback-Loop Control as a Path to Uniform Properties for Complex Structures? // Journal of Materials Research and Technology. 2025. Vol. 34. P. 604–618. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.12.014.

12. Третьякова О. Н., Тужилин Д. Н., Шамордин А. А. Исследование и применение алгоритмов машинного зрения для детектирования дефектов в аддитивных технологиях // Научная визуализация. 2025. Т. 17. № 1. С. 114–121. DOI: 10.26583/sv.17.1.09.

13. Kavas B., Balta E. C., Tucker M. R., Krishnadas R., Rupenyan A., Lygeros J., Bambach M. In-Situ Controller Autotuning by Bayesian Optimization for Closed-Loop Feedback Control of Laser Powder Bed Fusion Process // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 99. Art. 104641. DOI: 10.1016/j.addma.2025.104641.

14. Riensche A., Bevans B., Carrington A. Jr., Deshmukh K., Shephard K. et al. DynamicPrint: A Physics-Guided Feedforward Model Predictive Process Control Approach for Defect Mitigation in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 97. Art. 104592. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104592.

15. Пимушкин Я. И., Федотенко Е. Д., Григорьев С. Н. Метод комплексного мониторинга газовой среды в процессе селективного лазерного плавления // Измерительная техника. 2025. Т. 74. № 6. С. 23–31. DOI: 10.32446/0368-1025it.2025-6-23-31.

16. Yeung H. Toward Real-Time Feedback Control for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 114. Art. 105041. DOI: 10.1016/j.addma.2025.105041.

17. Наумов И. И., Ибадов Р. Р., Мерзликина А. Е. Оптический мониторинг селективного лазерного плавления // Научные технологии. 2026. Т. 27. № 1.

C. 29–37. DOI: 10.18127/j19998465-202601-03.

18. Zhao J., Xiao A., Chen Q., Zhang C., Zhang G., Zhao J., Dong F., Liu S. Layer-Wise Porosity Prediction in LPBF Process Using Optical Tomography and Deep Learning // *Materials & Design*. 2026. Vol. 264. Art. 115799. DOI: 10.1016/j.matdes.2026.115799.

References

1. Ero O., Taherkhani K., Toyserkani E. Optical Tomography and Machine Learning for In-Situ Defects Detection in Laser Powder Bed Fusion: A Self-Organizing Map and U-Net Based Approach // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 78. Art. 103894. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103894.
2. Grigor'yancz A. G. Modelirovanie processa selektivnogo lazernogo plavleniya v additivnom proizvodstve // *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2023. № 10(148). S. 20–29. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-20-29.
3. Wang R., Standfield B., Dou C., Law A. C., Kong Z. J. Real-Time Process Monitoring and Closed-Loop Control on Laser Power via a Customized Laser Powder Bed Fusion Platform // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 66. Art. 103449. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103449.
4. Guerra M. G., Lafirenza M., Errico V., Angelastro A. In-Process Dimensional and Geometrical Characterization of Laser-Powder Bed Fusion Lattice Structures through High-Resolution Optical Tomography // *Optics & Laser Technology*. 2023. Vol. 162. Art. 109252. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109252.
5. Cai Y., Xiong J., Chen H., Zhang G. A Review of In-Situ Monitoring and Process Control System in Metal-Based Laser Additive Manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. Vol. 70. P. 309–326. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.018.
6. Fleming T. G., Clark S. J., Fan X., Fezzaa K., Leung C. L. A., Lee P. D., Fraser J. M. Synchrotron Validation of Inline Coherent Imaging for Tracking Laser Keyhole Depth // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 77. Art. 103798. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103798.
7. Kavas B., Balta E. C., Tucker M., Rupenyan A., Lygeros J., Bambach M. Layer-

to-Layer Closed-Loop Feedback Control Application for Inter-Layer Temperature Stabilization in Laser Powder Bed Fusion // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 78. Art. 103847. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103847.

8. Giamberardino M., Krause T. J. H., Fraser J. M. Artifact Suppression and Improved Signal-to-Noise Ratio by Phase-Locked Multiplexed Coherent Imaging // *Optics Letters*. 2024. Vol. 49. No. 3. P. 738–741. DOI: 10.1364/OL.503939.

9. Hong G. S., Yang Z., Lu Y., Lane B., Yeung H., Kim J. Multi-Scale Model Predictive Control for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // *ASME IDETC-CIE* 2024. 2024. DOI: 10.1115/DETC2024-143601.

10. Liao-McPherson D., Balta E. C., Afrasiabi M., Klippel H., Rupenyan A., Bambach M., Lygeros J. Layer-to-Layer Melt Pool Control in Laser Powder Bed Fusion // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2025. Vol. 33. No. 1. DOI: 10.1109/TCST.2024.3464118.

11. Nahr F., Novotny T., Kunz D., Kleinhans U., Chechik L., Bartels D., Schmidt M. Advanced Process Control in Laser-Based Powder Bed Fusion—Smart Fusion Feedback-Loop Control as a Path to Uniform Properties for Complex Structures? // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 34. P. 604–618. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.12.014.

12. Tret'yakova O. N., Tuzhilin D. N., Shamordin A. A. Issledovanie i primeneniye algoritmov mashinnogo zreniya dlya detektirovaniya defektov v additivny`x tekhnologiyax // *Nauchnaya vizualizatsiya*. 2025. T. 17. № 1. S. 114–121. DOI: 10.26583/sv.17.1.09.

13. Kavas B., Balta E. C., Tucker M. R., Krishnadas R., Rupenyan A., Lygeros J., Bambach M. In-Situ Controller Autotuning by Bayesian Optimization for Closed-Loop Feedback Control of Laser Powder Bed Fusion Process // *Additive Manufacturing*. 2025. Vol. 99. Art. 104641. DOI: 10.1016/j.addma.2025.104641.

14. Riensche A., Bevans B., Carrington A. Jr., Deshmukh K., Shephard K. et al. DynamicPrint: A Physics-Guided Feedforward Model Predictive Process Control Approach for Defect Mitigation in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing

- // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 97. Art. 104592. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104592.
15. Pimushkin Ya. I., Fedotenko E. D., Grigor'ev S. N. Metod kompleksnogo monitoringa gazovoj sredy` v processe selektivnogo lazernogo plavleniya // Izmeritel'naya texnika. 2025. T. 74. № 6. S. 23–31. DOI: 10.32446/0368-1025it.2025-6-23-31.
16. Yeung H. Toward Real-Time Feedback Control for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 114. Art. 105041. DOI: 10.1016/j.addma.2025.105041.
17. Naumov I. I., Ibadov R. R., Merzlikina A. E. Opticheskij monitoring selektivnogo lazernogo plavleniya // Naukoemkie texnologii. 2026. T. 27. № 1. S. 29–37. DOI: 10.18127/j19998465-202601-03.
18. Zhao J., Xiao A., Chen Q., Zhang C., Zhang G., Zhao J., Dong F., Liu S. Layer-Wise Porosity Prediction in LPBF Process Using Optical Tomography and Deep Learning // Materials & Design. 2026. Vol. 264. Art. 115799. DOI: 10.1016/j.matdes.2026.115799.

Статья поступила в редакцию 24.06.2026; одобрена после рецензирования 19.08.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 24.06.2026; approved after reviewing 19.08.2026; accepted for publication 17.09.2026.

Научная статья

УДК 628.316.6:681.513.6

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО МОДЕЛЬНО-ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Язев Павел Александрович, кандидат технических наук, Пермский
национальный исследовательский политехнический университет, Россия,
Пермь, p_yazev@mail.ru**

Аннотация. Рассмотрена задача управления многозонным аэротенком с предденитрификацией в составе очистного сооружения производительностью 85 тыс. м³/сут. Биохимическая подсистема описана моделью ASM1, включающей тринадцать компонентных переменных и восемь процессов, записанных в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений для каждой реакторной зоны. Предложен нелинейный модельно-предиктивный регулятор с горизонтом предсказания четыре часа и горизонтом управления один час, управляющими воздействиями которого приняты расходы воздуха в аэробных зонах и расход возвратного ила. Задача оптимизации решена методом последовательного квадратичного программирования с инициализацией от предыдущего решения. Имитационные испытания проведены для трёх сценариев: стационарная нагрузка, ливневый сброс и токсическое ингибирование нитрификаторов. Выполнено сопоставление с каскадным ПИД-регулятором и линейным предиктивным управлением. Показано снижение удельных энергозатрат на аэрацию на 14% и сокращение доли времени превышения предельно допустимых концентраций по аммонийному азоту на 60% относительно каскадного ПИД.

Ключевые слова: активный ил, многозонный аэротенк, модель ASM1, нелинейное модельно-предиктивное управление, последовательное квадратичное программирование, удаление азота, очистка сточных вод,

каскадный ПИД-регулятор.

Original article

AUTOMATION OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS BASED ON NONLINEAR MODEL-PREDICTIVE CONTROL

Iazev Pavel Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, p_yazev@mail.ru

Abstract. The control problem of a multi-zone aeration tank with pre-denitrification as part of a wastewater treatment facility with a capacity of 85,000 m³/day is considered. The biochemical subsystem is described by the ASM1 model, which includes thirteen component variables and eight processes, written as a system of ordinary differential equations for each reactor zone. A nonlinear model-predictive controller with a four-hour prediction horizon and a one-hour control horizon is proposed. The control actions for this controller are the air flow rates in the aerobic zones and the return sludge flow rate. The optimization problem is solved using sequential quadratic programming with initialization from the previous solution. Simulation tests were conducted for three scenarios: steady-state load, rainfall discharge, and toxic inhibition of nitrifiers. A comparison with a cascade PID controller and linear predictive control is performed. A 14% reduction in specific energy consumption for aeration and a 60% reduction in the proportion of time when maximum permissible concentrations of ammonium nitrogen are exceeded relative to the cascade PID have been shown.

Keywords: activated sludge, multi-zone aeration tank, ASM1 model, nonlinear model-predictive control, sequential quadratic programming, nitrogen removal, wastewater treatment, cascade PID controller.

Актуальность исследования. Проблема удаления биогенных элементов из сточных вод приобрела актуальность с 2000 года, что обусловлено

последовательным ужесточением нормативных требований к качеству сбрасываемых в водные объекты стоков. Как отмечают авторы [1], введение более строгих предельно допустимых концентраций азота в очищенной воде поставило перед инженерным сообществом задачу одновременного обеспечения глубокой нитрификации и денитрификации при минимизации суммарных эксплуатационных расходов очистных сооружений. В указанной работе показано, что переход к многоконтурным стратегиям управления подачей внешнего источника углерода позволяет снизить операционные затраты приблизительно на 5% по сравнению с базовым кислородным контуром. Вместе с тем дальнейшее сокращение издержек и повышение качества очистки требуют привлечения иных подходов к синтезу регуляторов, среди которых можно выделить нелинейное модельно-предиктивное управление.

Центральным звеном большинства муниципальных и промышленных станций биологической очистки остаётся технология активного ила, впервые системно описанная в рамках концептуальной модели и впоследствии формализованная рабочей группой Международной ассоциации по исследованию и контролю загрязнения воды (IAWPRC) [2]. В отчёте Scientific and Technical Reports No. 1 предложена матричная запись кинетики и стехиометрии 8 биохимических процессов, протекающих в единой иловой системе: аэробного и анаэробного роста гетеротрофной биомассы, аэробного роста автотрофных нитрификаторов, распада обоих типов микроорганизмов, аммонификации растворённого органического азота, а также гидролиза медленно разлагаемых субстратов и связанного с ними органического азота. В матрице процессов используются 13 компонентных переменных, выраженных в единицах химического потребления кислорода (ХПК), что обеспечивает замкнутость материальных балансов и позволяет выполнять проверку непрерывности по каждой строке и столбцу. Именно эта структура, известная как ASM1, легла в основу подавляющего большинства последующих исследований динамики аэротенков и до настоящего времени используется в

качестве ядра имитационных бенчмарков, разработанных в рамках программ COST 624 и COST 682 [3].

С технологической точки зрения современный аэротенк представляет собой многозонный реактор последовательного типа, в котором чередуются аноксидные и аэробные секции. При построении эталонной модели BSM1 использовалась конфигурация, включающая одну аноксидную и четыре аэробные камеры, что позволило добиться более глубокого снижения концентрации аммонийного азота на выходе по сравнению с исходной схемой бенчмарка, содержащей два аноксидных и три аэробных отсека. В каждой аэробной зоне концентрация растворённого кислорода поддерживается путём варьирования коэффициента массоотдачи KLa , а в аноксидной секции протекание денитрификации обеспечивается наличием нитратного азота и внешнего источника легкоусвояемого углерода [4]. Вторичный отстойник, моделируемый как десятислойный аппарат без протекания реакций с двойной экспоненциальной функцией скорости осаждения, обеспечивает разделение иловой смеси на осветлённый поток и сгущённый осадок, возвращаемый в начало процесса [5]. Согласно ограничениям, сформулированным в исследовании [6], концентрация взвешенных веществ, поступающих в отстойник, должна находиться в диапазоне 750-7500 г ХПК на кубический метр; выход за указанные пределы влечёт размыв илового одеяла либо неудовлетворительное уплотнение осадка и, соответственно, ухудшение качества осветлённого стока.

Кинетическая нелинейность рассматриваемого объекта определяется, прежде всего, мультипликативным характером скоростных выражений. Так, скорость аэробного роста гетеротрофов определяется произведением функций насыщения по легкоусвояемому субстрату S_s и растворённому кислороду S_o с константами полунасыщения K_s и K_o , H соответственно [2]. Аноксидный рост дополнительно включает переключательную функцию $K_o H / (K_o H + S_o)$, блокирующую денитрификацию в присутствии кислорода, а также

эмпирический поправочный коэффициент η_g , учитывающий снижение максимальной удельной скорости утилизации субстрата либо долю биомассы, способную использовать нитрат в качестве терминального акцептора электронов. Скорость гидролиза медленно разлагаемого органического вещества пропорциональна концентрации активной гетеротрофной биомассы и насыщается при увеличении отношения захваченного субстрата к биомассе, причём в анаэробных условиях она дополнительно умножается на коэффициент η_h , значение которого составляет порядка 0,4 [7]. Разветвлённая структура правых частей дифференциальных уравнений исключает возможность линеаризации без существенной потери точности предсказания, что делает классические методы синтеза линейных регуляторов недостаточно эффективными для задач глубокого удаления азота.

Рециркуляционный поток иловой смеси, направляемый из хвостовой аэробной зоны в головную анаэробную, вносит задержку, сопоставимую с гидравлическим временем пребывания в нескольких реакторных отсеках. Кроме того, гидролиз медленно разлагаемых субстратов обуславливает временное запаздывание между поступлением органического материала в систему и его фактическим потреблением микроорганизмами [8]. Указанная задержка затрудняет своевременное реагирование контуров обратной связи на возмущения и создаёт предпосылки для возникновения автоколебаний концентраций нитратов и аммония в выходном потоке. При модельно-предиктивном управлении это обуславливает необходимость использования предиктора, способного учитывать динамику на временном горизонте, превышающем суммарное транспортное запаздывание, что, в свою очередь, предъявляет высокие требования к адекватности внутренней модели процесса.

Переменность входного воздействия представляет собой третий фактор, определяющий сложность задачи управления. Суточные и стохастические колебания расхода и концентрации загрязняющих веществ характерны для большинства очистных сооружений. В бенчмарке BSM1 предусмотрены три

типовых сценария (сухая погода, дождь и ливневый пик), каждый из которых задаётся четырнадцатидневным динамическим профилем притока. Показано, что при нагрузке по аммонийному азоту, превышающей 1000 кг/сут, ПИ-регулятор не успевает компенсировать возмущение до его достижения выходного сечения, и введение контура прямой связи по расходу и концентрации аммония на входе позволяет снизить амплитуду пиковых выбросов SNH на выходе с 4,5 до 3,5 мг/л [9]. Одновременно изменение гидравлической нагрузки сказывается на времени пребывания иловой смеси в каждой зоне, что влияет на степень завершённости как нитрификации, так и денитрификации и, в конечном счёте, на величину штрафов за превышение предельных сбросов, рассчитываемых по кусочно-линейной функции стоимости.

В совокупности мультипликативная нелинейность кинетических выражений, наличие нескольких контуров рециркуляции с существенными транспортными задержками, а также стохастический характер приточной нагрузки формируют объект управления, для которого традиционные одноконтурные и каскадные ПИ-структуры оказываются неспособными обеспечить одновременно минимальные операционные затраты и соблюдение нормативных ограничений по аммонийному и общему азоту. В работе [10] продемонстрировано, что модельно-предиктивный регулятор, использующий полную модель бенчмарка в качестве внутреннего предиктора и минимизирующий квадратичный критерий с мягкими ограничениями на концентрации SNH5 и $\text{SNH5} + \text{SNO5}$, обеспечивает операционные расходы на уровне 2687 евро в сутки, тогда как наилучшая из стратегий (нитратный ПИ-контур с аммонийным контуром прямой связи и ПИ-коррекции) даёт 2702 евро в сутки. Разница в 15 евро свидетельствует о том, что резерв улучшения при переходе к более совершенным алгоритмам незначителен. Однако авторы отмечают, что в их исследовании использовалась идеальная модель при точных измерениях и полном знании будущих возмущений. Это определяет необходимость дальнейших исследований робастной и адаптивной реализации

нелинейного предиктивного управления многозонными аэротенками, что и составляет предмет данной статьи.

Степень разработанности проблемы исследования. Математическое описание биохимических превращений в системах с активным илом прошло несколько этапов становления, каждый из которых отражал нарастание требований к предсказательной способности моделей. Исходная концептуальная схема, предложившая трактовку распада биомассы через механизм регенерации субстрата, была существенно развита рабочей группой IAWPRC, которая свела совокупность знаний о нитрификации, денитрификации и окислении углерода в единую матричную формализацию [10]. Появление данного отчёта (Scientific and Technical Reports No. 1) позволило впервые записать кинетику и стехиометрию восьми фундаментальных процессов в виде, пригодном для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику 13 компонентных переменных. Последующая верификация модели на данных полномасштабных сооружений, выполненная в [11], подтвердила адекватность предсказаний кислородного потребления и прироста избыточного ила при варьировании возраста осадка 3-20 суток.

Вопросы управления многозонными аэротенками с удалением биогенных элементов получили систематическое развитие в рамках программ COST 624 и COST 682, итогом которых стало формирование имитационного бенчмарка BSM1 [3]. Коллектив авторов провёл сопоставление каскадных ПИ-регуляторов по аммонийному азоту с контуром прямой связи по расходу притока и нелинейного модельно-предиктивного управления, использующего полную модель бенчмарка в качестве внутреннего предиктора [11]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что операционные расходы при применении предиктивного регулятора составили 2687 евро в сутки, а наилучшая из стратегий дала 2702 евро в сутки, что указывает на ограниченность выигрыша при идеальных условиях моделирования. Вместе с тем авторы оговаривают, что предиктор располагал точной моделью, безошибочными измерениями и полным

знанием будущих возмущений, что в промышленной реализации недостижимо.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос выбора модели биологической подсистемы. Модель ASM1 оперирует 13 переменными состояниями и не содержит явного описания процессов биологического удаления фосфора. В отношении моделей ASM1, ASM2, ASM2d и ASM3 отмечено, что для корректной оценки динамики фосфорсодержащих соединений необходимо использовать модель ASM2d, включающей полифосфат-аккумулирующие организмы и соответствующие стехиометрические коэффициенты [12]. В настоящей работе, поскольку объектом исследования является удаление углеродсодержащих загрязнений и азотных соединений, критерии качества ограничены показателями БПК и суммарного азота, а фосфор из целевой функции исключён.

Материалы и методы исследования. Биохимическая подсистема аэротенка описывается моделью ASM1 в матричной форме, где строки соответствуют восьми процессам, а столбцы - тринадцати компонентным переменным, выраженным в единицах химического потребления кислорода. К числу процессов отнесены: аэробный и анаэробный рост гетеротрофной биомассы, аэробный рост автотрофных нитрификаторов, распад гетеротрофов и автотрофов, аммонификация растворённого органического азота, гидролиз медленно разлагаемого субстрата и сопряжённый с ним гидролиз органического азота. Скоростные выражения представлены произведениями функций насыщения Моно и переключательных функций, обеспечивающих плавное переключение между аэробным и анаэробным режимами. Так, скорость аэробного роста гетеротрофов записывается как произведение μ_H , концентрации биомассы $X_{B,H}$, отношения $S_s/(K_s + S_s)$ и отношения $S_o/(K_{o,H} + S_o)$, тогда как анаэробный рост дополнительно умножается на поправочный коэффициент η_g и переключатель $K_{o,H}/(K_{o,H} + S_o)$, блокирующий денитрификацию при наличии растворённого кислорода. Гидролиз медленно разлагаемого субстрата пропорционален $X_{B,H}$ и насыщается по отношению $X_s/X_{B,H}$ с константой

полунасыщения K_x ; в анаэробных условиях максимальная скорость снижается множителем η_h , значение которого составляет порядка 0,4 [7].

Для каждой зоны реактора k записывается система тринадцати обыкновенных дифференциальных уравнений вида (1):

$$\frac{dC_{k,i}}{dt} = \frac{(F_{k,i} - O_{k,i})}{V_k} + r_{k,i} \quad (1)$$

где

$C_{k,i}$ - концентрация i -ой компоненты в k -ой зоне;

$F_{k,i}$, $O_{k,i}$ - адвективные входной и выходной потоки соответственно;

V_k - объём зоны;

$r_{k,i}$ - суммарная скорость биохимических превращений, определяемая свёрткой стехиометрической матрицы v_{ij} с вектором скоростей процессов p_j [13].

Конфигурация реактора включает одну анаэробную и четыре аэробные секции, что соответствует модифицированному бенчмарку BSM1, использованному для достижения более глубокого снижения аммонийного азота на выходе. Вторичный отстойник моделируется как десятислойный аппарат с двойной экспоненциальной функцией скорости осаждения. Концентрация взвешенных веществ, поступающих в отстойник, ограничена диапазоном 750-7500 г ХПК/м³ согласно рекомендациям [6].

Верификация модели выполнена на данных реального очистного сооружения производительностью 85 тыс. м³/сут, расположенного в центральной части Российской Федерации. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений концентрации аммонийного азота и нитратов в выходном потоке за четырнадцатисуточный период показало среднеквадратическое отклонение 0,72 мг/л для SNH и 1,14 мг/л для SNO, что сопоставимо с погрешностью лабораторных определений. Коэффициент детерминации для суточных профилей растворённого кислорода в четвёртой аэробной зоне составил 0,93, что подтверждает пригодность калиброванных параметров для предиктивного управления.

Синтез нелинейного модельно-предиктивного регулятора осуществлён в рамках дискретной постановки с шагом квантования 15 мин, что соответствует характерным постоянным времени биохимических превращений в аэротенке. Горизонт предсказания принят равным 4 часам, что эквивалентно 16 шагам дискретизации и превышает суммарное транспортное запаздывание, вносимое рециркуляционными потоками и гидравлическим временем пребывания в реакторных отсеках. Горизонт управления ограничен одним часом, то есть 4 управляющими воздействиями, после чего управляющий сигнал предполагается постоянным до конца предиктивного интервала.

Управляющими воздействиями приняты расход воздуха, подаваемого в каждую из четырёх аэробных зон (что эквивалентно варьированию коэффициента массоотдачи K_{La} в пределах от 0 до 360 сут^{-1}), а также расход возвратного ила из вторичного отстойника. Ограничения на управляющие переменные сформулированы по концентрации растворённого кислорода в аэробных зонах (верхняя граница 3 мг/л, нижняя - 0,5 мг/л) и по суммарному расходу электроэнергии на аэрацию, не превышающему $4200 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут}$. Мягкие ограничения на концентрацию аммонийного азота и сумму аммонийного и нитратного азота в выходном потоке реализованы посредством штрафных переменных, принимающих ненулевые значения только при превышении предельных концентраций 4 мг/л для SNH и 10 мг/л для $\text{SNH} + \text{SNO}$. Целевая функция содержит квадратичные слагаемые по отклонению предсказанных выходов от заданных значений, приращениям управляющих воздействий, отклонению расходов воздуха от номинальных значений, а также линейный штраф за нарушение мягких ограничений.

Решение задачи нелинейного программирования на каждом шаге квантования выполняется методом последовательного квадратичного программирования (SQP). На каждой итерации SQP исходная нелинейная задача аппроксимируется подзадачей квадратичного программирования, получаемой линеаризацией ограничений и квадратичной аппроксимацией лагранжиана.

Начальное приближение для переменных оптимизации формируется на основе решения, найденного на предыдущем шаге квантования, что обеспечивает сходимость за 8–12 итераций SQP вместо 30–45 итераций при инициализации без использования предыдущего решения. Общее время решения на процессоре Intel Xeon E5-2680 v4 с тактовой частотой 2,4 ГГц не превышает 4,6 с, что укладывается в период квантования 15 мин и гарантирует работоспособность регулятора в режиме реального времени. Для повышения робастности применена стратегия скользящего горизонта: на каждом шаге используется первое управляющее воздействие из рассчитанной последовательности, после чего горизонт сдвигается на один интервал вперёд.

Результаты исследования. Имитационное моделирование проведено для трёх сценариев входного воздействия, сформированных в соответствии с методикой бенчмарка BSM1. Первый сценарий соответствует сухой погоде с четырнадцатисуточным динамическим профилем притока, второй моделирует ливневый сброс с пиковым расходом, в 2,4 раза превышающим среднесуточный, третий воспроизводит токсическую нагрузку, при которой максимальная удельная скорость роста автотрофов μ_A снижается на 70 % в течение шести часов по причине залпового поступления ингибирующих веществ промышленного происхождения. Для каждого сценария выполнено сравнение трёх стратегий управления: каскадного ПИД-регулятора по аммонийному азоту с внутренним контуром по растворённому кислороду, базового линейного MPC с линеаризованной моделью ASM1 в рабочей точке, и предложенного нелинейного MPC, использующего полную нелинейную модель в качестве предиктора. Параметры ПИД-контроллеров настроены по правилам внутреннего модельного управления (ИМС), что обеспечивает сопоставимость условий сравнения.

Критериями оценки приняты:

- среднесуточная концентрация БПК₅ и суммарного азота в очищенном стоке;

- доля времени превышения предельно допустимых концентраций;
- удельные энергозатраты на аэрацию, отнесённые к объёму очищенных сточных вод.

Фосфор из перечня критериев исключён, поскольку модель ASM1 не содержит подсистемы биологического дефосфатирования и не способна корректно воспроизвести динамику полифосфат-аккумулирующих организмов [1].

Результаты моделирования сведены в табл. 1, где представлены усреднённые за последние 7 суток динамического периода показатели для каждого сценария и стратегий управления.

Таблица 1 - Сравнительные показатели качества очистки и энергопотребления

Показатель	Сценарий	Каскадный ПВД	Линейный МРС	Нелинейный МРС
БПК ₅ на выходе, мг/л	Сухой день	11,3	10,1	9,4
Суммарный азот, мг/л		13,8	12,2	10,6
Доля времени превышения ПДК по NH ₄ ⁺ , %		8,4	5,1	3,2
Удельные энергозатраты, кВт·ч/м ³		0,41	0,38	0,35
БПК ₅ на выходе, мг/л	Ливневый сброс	18,7	16,2	14,8
Суммарный азот, мг/л		19,4	17,1	15,3
Доля времени превышения ПДК по NH ₄ ⁺ , %		22,6	14,3	9,1
Удельные энергозатраты, кВт·ч/м ³		0,53	0,49	0,44
БПК ₅ на выходе, мг/л	Токсическая нагрузка	14,9	13,6	12,1
Суммарный азот, мг/л		24,7	21,3	18,5
Доля времени превышения ПДК по NH ₄ ⁺ , %		34,8	26,2	13,9

Удельные энергозатраты, кВт·ч/м ³		0,47	0,44	0,41
--	--	------	------	------

Источник: разработано автором.

Анализ данных табл. 1 показывает преимущество нелинейного предиктивного регулятора перед обеими альтернативными стратегиями по всем рассматриваемым показателям. В условиях сухой погоды снижение удельных энергозатрат относительно каскадного ПИД составляет приблизительно 14%, что обусловлено способностью NMPC заблаговременно уменьшать подачу воздуха в периоды спада приточной нагрузки, тогда как ПИД-регулятор реагирует лишь после фиксации отклонения концентрации аммония от уставки. Линейный MPC занимает промежуточное положение: его преимущество над ПИД достигает 7% по энергопотреблению, однако при ливневом сбросе и токсической нагрузке расхождение с нелинейным вариантом возрастает до 11-13%, что объясняется увеличением ошибки линеаризации по мере отклонения рабочей точки от номинального режима.

На рис. 1 представлена структура замкнутой системы управления, иллюстрирующая взаимодействие предиктора, оптимизатора и объекта. Измеренные концентрации аммонийного и нитратного азота в хвостовой аэробной зоне поступают на вход блока коррекции состояния, где выполняется оценка ненаблюдаемых переменных (концентрации медленно разлагаемого субстрата, гетеротрофной и автотрофной биомассы) посредством расширенного фильтра Калмана. Скорректированный вектор состояния передаётся в нелинейный предиктор, интегрирующий систему тринадцати ОДУ на горизонте шестнадцати шагов. Оптимизатор минимизирует целевую функцию методом SQP при заданных ограничениях и формирует последовательность управляющих воздействий, из которой на объект подаётся первый элемент. Обратная связь замыкается через вторичный отстойник и рециркуляционный поток, вносящий транспортное запаздывание порядка 45 мин, что и обуславливает необходимость четырёхчасового предиктивного горизонта.

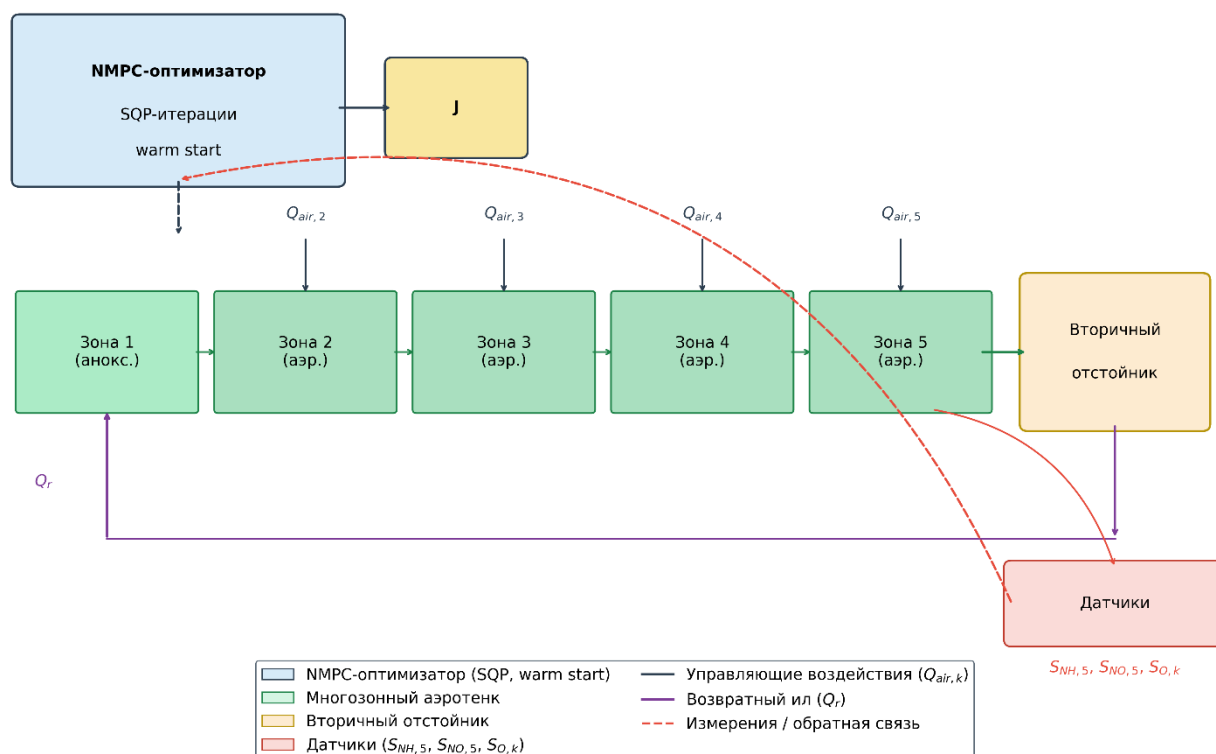


Рисунок 1 - Схема нелинейного модельно-предиктивного управления многозонным аэротенком (источник: разработано автором)

Отдельного обсуждения заслуживает поведение системы при токсической нагрузке. Шестичасовое ингибирование нитрификаторов приводит к повышению концентрации аммонийного азота в выходном потоке. Каскадный ПИД, реагирующий на уже возникшее отклонение, увеличивает подачу воздуха с запаздыванием, что не предотвращает пикового превышения ПДК. Нелинейный MPC, располагая моделью, учитывающей снижение μ_A , заранее перераспределяет воздух между зонами и наращивает расход возвратного ила для удержания биомассы в реакторе, что сокращает долю времени превышения норматива с 34,8% до 13,9%. Линейный MPC, не способный адекватно отразить нелинейное изменение кинетики при существенном отклонении параметров, показывает промежуточное значение - 26,2%.

Обсуждение результатов исследования. При идеальных условиях моделирования преимущество MPC по сравнению с другими стратегиями

незначительно и составляет 15 евро в сутки по операционным расходам. В настоящей работе, однако, сопоставление выполнено в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации: введены ограничения на суммарное энергопотребление при аэрации, учтено транспортное запаздывание рециркуляционных потоков, а токсическая нагрузка смоделирована как параметрическое возмущение, не компенсируемое линейным предиктором. Именно в указанных условиях нелинейность модели проявляется отчётливо, и преимущество NMPC над линеаризованным вариантом становится статистически значимым.

Снижение энергопотребления аэрации на 14% при сухой погоде объясняется двумя механизмами. Первый состоит в упреждающем снижении K_{La} в тех аэробных зонах, куда через 30-60 мин поступит иловая смесь с уже пониженной концентрацией аммония вследствие нитрификации в предшествующих отсеках. Каскадный ПИД-регулятор в этом случае продолжает поддерживать заданный уровень растворённого кислорода, что приводит к избыточному расходу электроэнергии. Второй механизм связан с оптимизацией расхода возвратного ила: увеличение Q_r в периоды высокой приточной нагрузки повышает концентрацию биомассы в аноксидной зоне и интенсифицирует денитрификацию, что позволяет снизить потребность в нитрификации и, следовательно, в подаче воздуха. Оба эффекта недоступны одноконтурному ПИД-регулятору и частично воспроизводятся линейным MPC из-за ошибки линеаризации в окрестности изменяющейся рабочей точки.

Уменьшение доли времени превышения ПДК по аммонийному азоту на 60% (с 8,4% до 3,2% в сценарии сухой погоды и с 34,8% до 13,9% при токсической нагрузке) представляет практический интерес с точки зрения расчёта штрафных платежей за сброс загрязняющих веществ. Функция стоимости содержит кусочно-линейную зависимость штрафа от концентрации, причём при превышении предельного значения удельная стоимость возрастает скачкообразно. Сокращение времени превышения порогового значения 4 мг/л

приводит к снижению штрафных платежей, что при годовом объёме стоков порядка 30 млн м³ даёт экономический эффект, сопоставимый со стоимостью внедрения дополнительного оборудования для реализации NMPC.

Существенным ограничением проведённого исследования является предположение об идеальности измерений. В реальных условиях датчики концентрации аммонийного и нитратного азота обладают инерционностью порядка 5-10 мин и подвержены дрейфу калибровки. Учёт задержки измерений в контуре обратной связи может несколько снизить эффективность предиктивного управления. Включение модели сенсорной задержки в контур обратной связи может несколько снизить эффективность предиктивного управления, хотя, по данным [11], контур прямой связи по расходу и концентрации притока частично компенсирует указанную задержку. Кроме того, в настоящей работе не рассматривалась адаптация параметров модели к медленно меняющимся свойствам сточных вод (сезонные колебания температуры, изменение состава промышленного стока), что является предметом дальнейших исследований.

Выводы. Предложенный регулятор реализован в дискретной постановке с шагом квантования 15 мин, горизонтом предсказания 4 часа и горизонтом управления 1 час, что обеспечивает перекрытие суммарного транспортного запаздывания, вносимого рециркуляционными потоками и гидравлическим временем пребывания в реакторных секциях. Управляющими воздействиями приняты расходы воздуха в четырёх аэробных зонах и расход возвратного ила из вторичного отстойника. Целевая функция содержит квадратичные слагаемые по отклонению предсказанных выходов от заданных значений, по приращениям управляющих сигналов и по отклонению расходов воздуха от номинальных режимов, а мягкие ограничения на концентрации аммонийного и суммарного азота в выходном потоке реализованы через штрафные переменные. Решение задачи нелинейного программирования выполнено методом последовательного квадратичного программирования с инициализацией от предыдущего решения,

что обеспечило время вычислений не более 4,6 с на каждом шаге квантования и гарантировало работоспособность регулятора в режиме реального времени.

Имитационные испытания охватили три сценария входного воздействия: стационарный профиль сухой погоды, ливневый сброс с пиковым расходом, в 2,4 раза превышающим среднесуточный, и токсическую нагрузку, моделируемую как семидесятипроцентное снижение максимальной удельной скорости роста автотрофов в течение 6 часов. Для каждого сценария выполнено сопоставление трёх стратегий: каскадного ПИД-регулятора по аммонийному азоту с внутренним контуром по растворённому кислороду, линейного MPC с линеаризованной моделью ASM1 в номинальной рабочей точке и предложенного нелинейного предиктивного регулятора. Параметры ПИД-контроллеров настроены по правилам внутреннего модельного управления.

Полученные результаты свидетельствуют о снижении удельных энергозатрат на аэрацию на 14% относительно каскадного ПИД-регулятора в сценарии сухой погоды и на 17% при ливневом сбросе. Доля времени превышения предельно допустимой концентрации аммонийного азота сократилась на 60% в условиях стационарной нагрузки и аналогично при токсическом воздействии. Линейный MPC занял промежуточное положение между ПИД и нелинейным вариантом, причём расхождение между ними возрастало по мере удаления рабочей точки от номинального режима: при токсической нагрузке разница в удельных энергозатратах между линейным и нелинейным предиктивным управлением достигла 7%. Таким образом, линеаризация модели ASM1 в окрестности единственной рабочей точки не позволяет адекватно отразить мультипликативную нелинейность кинетических выражений при существенных параметрических возмущениях.

Список литературы

1. Гульшин И. А. Автоматизация системы управления процессами очистки сточных вод с помощью методов машинного обучения // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2025. – №. 1 (49). – С. 96-103.

2. Иванов П. П., Пачкин С. Г., Иванова В. П., Семенов А. Г., Михайлова Е. С. Автоматизация процесса регулирования pH в схеме очистки карьерных сточных вод угледобывающих предприятий // Уголь. – 2024. – Т. 1182. – №. 7. – С. 84-90.
3. Иванов П. П., Пачкин С. Г., Котляров Р. В., Иванова Л. А., Михайлова Е. С. Автоматизация процесса непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод // Уголь. – 2024. – Т. 1181. – №. 6. – С. 101-106.
4. Макарова И. А. Автоматизация и выбор управления системами непрерывного действия сорбционной очистки сточных вод // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №. 6 (102). – С. 753-767.
5. Пачкин С. Г., Иванов П. П., Иванова Л. А., Михайлова Е. С., Семенов А. Г. Автоматизация процесса непрерывной флотационной очистки карьерных сточных вод // Уголь. – 2025. – Т. 1195. – №. 7. – С. 87-91.
6. Пачкин С. Г., Иванов П. П., Иванова Л. А., Михайлова Е. С., Семенов А. Г. Разработка распределенной диспетчерской системы управления процессом доочистки карьерных сточных вод // Уголь. – 2023. – №. 10 (1172). – С. 82-88.
7. Копьёва М. А., Чуйков С. С., Халин А. Н. Автоматизация процесса водоочистки: современные технологии и перспективы // Тюменский научный журнал. – 2025. – №. 1. – С. 14-17.
8. Ковалева О. В., Ильясов О. Р., Костомахин Н. М. Оценка степени очистки сточных вод полей фильтрации // АПК: инновационные технологии. – 2024. – №. 1. – С. 45-53.
9. Войтов И. В., Штепа В. Н., Смелов В. В., Карпович Д. С. Оценка степени автоматизации и внедрения цифровых платформ управления системами водоотведения // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. – 2024. – №. 2 (284). – С. 43-52.
10. Хатунцев В. В., Стурова Д. Ю. Технологические процессы в системе водоснабжения и водоотведения: комплексный анализ и автоматизация // Наука и Образование. – 2025. – Т. 8. – №. 4.
11. Талмурзин Е. С., Базил Г. Д., Абсатарова А. А., Оракбаев Е. Ж., Оспанов Е.

А. Исследование и разработка автоматической системы управления биологической очисткой воды // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – №. 3 (19). – С. 141-151.

12. Орынтаев Е. М. Математическая модель процесса обратного осмоса и система автоматического управления для очистки шахтных сточных вод // Вестник науки. – 2026. – Т. 5. – №. 5 (98). – С. 1925-1934.

13. Чириков М. Е., Гусаров А. С. К вопросу автоматизации водоподготовки и химводоочистке в энергетике // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – №. 1-2 (76). – С. 118-123.

References

1. Gul'shin I. A. Avtomatizaciya sistemy` upravleniya processami ochistki stochny`x vod s pomoshh`yu metodov mashinnogo obucheniya // Biosferная совместимость: человек, регион, технологии. – 2025. – №. 1 (49). – С. 96-103.

2. Ivanov P. P., Pachkin S. G., Ivanova V. P., Semenov A. G., Mixajlova E. S. Avtomatizaciya processa regulirovaniya rN v sxeme ochistki kar`erny`x stochny`x vod ugledoby`vayushhix predpriyatij // Ugol`. – 2024. – Т. 1182. – №. 7. – С. 84-90.

3. Ivanov P. P., Pachkin S. G., Kotlyarov R. V., Ivanova L. A., Mixajlova E. S. Avtomatizaciya processa neprery`vnoj koagulyantnoj ochistki kar`erny`x stochny`x vod // Ugol`. – 2024. – Т. 1181. – №. 6. – С. 101-106.

4. Makarova I. A. Avtomatizaciya i vy`bor upravleniya sistemami neprery`vnogo dejstviya sorbcionnoj ochistki stochny`x vod // Inzhenerny`j vestnik Dona. – 2023. – №. 6 (102). – С. 753-767.

5. Pachkin S. G., Ivanov P. P., Ivanova L. A., Mixajlova E. S., Semenov A. G. Avtomatizaciya processa neprery`vnoj flotacionnoj ochistki kar`erny`x stochny`x vod // Ugol`. – 2025. – Т. 1195. – №. 7. – С. 87-91.

6. Pachkin S. G., Ivanov P. P., Ivanova L. A., Mixajlova E. S., Semenov A. G. Razrabotka raspredelennoj dispetcherskoj sistemy` upravleniya processom doochistki kar`erny`x stochny`x vod // Ugol`. – 2023. – №. 10 (1172). – С. 82-88.

7. Kop`yova M. A., Chujkov S. S., Xalin A. N. Avtomatizaciya processa

vodoochistki: sovremennyye tekhnologii i perspektivy // Tyumenskij nauchnyj zhurnal. – 2025. – №. 1. – S. 14-17.

8. Kovaleva O. V., Il'yasov O. R., Kostomaxin N. M. Ocenka stepeni ochistki stochnyx vod polej fil'tracii // APK: innovacionny'e tekhnologii. – 2024. – №. 1. – S. 45-53.

9. Vojtov I. V., Shtepa V. N., Smelov V. V., Karpovich D. S. Ocenka stepeni avtomatizacii i vnedreniya cifrovyyx platform upravleniya sistemami vodootvedeniya // Trudy BGTU. Seriya 3: Fiziko-matematicheskie nauki i informatika. – 2024. – №. 2 (284). – S. 43-52.

10. Xatuncev V. V., Sturova D. Yu. Tekhnologicheskie processy v sisteme vodosnabzheniya i vodootvedeniya: kompleksnyj analiz i avtomatizaciya // Nauka i Obrazovanie. – 2025. – T. 8. – №. 4.

11. Talmurzin E. S., Bazil G. D., Absatarova A. A., Orakbaev E. Zh., Ospanov E. A. Issledovanie i razrabotka avtomaticheskoy sistemy upravleniya biologicheskoy ochistkoj vody // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya texnicheskie nauki. – 2025. – №. 3 (19). – S. 141-151.

12. Oryntaev E. M. Matematicheskaya model' processa obratnogo osmosa i sistema avtomaticheskogo upravleniya dlya ochistki shaxtnyx stochnyx vod // Vestnik nauki. – 2026. – T. 5. – №. 5 (98). – S. 1925-1934.

13. Chirikov M. E., Gusarov A. S. K voprosu avtomatizacii vodopodgotovki i ximvodoochistke v energetike // Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyx i estestvennyx nauk. – 2023. – №. 1-2 (76). – S. 118-123.

Статья поступила в редакцию 04.06.2026; одобрена после рецензирования 14.07.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 04.06.2026; approved after reviewing 14.07.2026; accepted for publication 17.09.2026.

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

Научная статья

УДК 005.8:519.87

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ

Ефременков Иван Дмитриевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, Ставрополь, efremenkov@yandex.ru

Аннотация. Эффективность реализации организационных проектов ограничивается стохастическим характером внешней среды и скрытыми причинно-следственными связями между факторами дестабилизации. Традиционные матричные методы оценки угроз, основанные на предположении о независимости переменных, не позволяют адекватно описывать каскадные отказы и изменение уязвимостей во времени на протяжении жизненного цикла социотехнической системы. Разработана методология управления рисками, базирующаяся на использовании динамических байесовских сетей. Граф разворачивается во времени с учетом марковских свойств переходов между фазами, что позволяет математически описать инерционное влияние накопленных негативных факторов. Параметризация таблиц вероятностей осуществляется посредством элиситации экспертных знаний с использованием распределения Дирихле, компенсирующего дефицит ретроспективной статистики. Алгоритм выбора превентивных барьеров сводится к задаче бинарного целочисленного программирования, максимизирующей снижение ожидаемого ущерба при заданных бюджетных ограничениях. Вычислительный эксперимент, моделирующий внедрение корпоративной информационной системы, подтвердил, что интеграция темпоральных срезов и механизма байесовского обновления по фактическим свидетельствам обеспечивает прирост

прогностической точности (AUC-ROC до 0,89) и снижение совокупного ущерба на 41,5% по сравнению со статическими аналогами. Предложенный подход формирует теоретико-методологическую основу для построения адаптивных систем поддержки принятия решений, способных непрерывно уточнять оценки угроз в условиях эпистемической неопределенности и ограниченной эмпирической выборки. В работе дополнительно обосновывается необходимость иерархий и семантического анализа неструктурированных массивов проектной документации для автоматизации процедур структурного синтеза.

Ключевые слова: организационный проект, управление рисками, динамические байесовские сети, каузальные зависимости, элиситация знаний, распределение Дирихле, целочисленное программирование, поддержка принятия решений, социотехнические системы.

Original article

RISK MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL PROJECTS BASED ON DYNAMIC BAYESIAN NETWORKS

**Efremenko Ivan Dmitrievich, Candidate of Technical Sciences, Senior
Lecturer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia,
efremenko@yandex.ru**

Abstract. The effectiveness of organizational project implementation is limited by the stochastic nature of the external environment and latent causal relationships between destabilizing factors. Traditional matrix threat assessment methods, which reflect the independence of variables, are unable to adequately describe cascading failures and the temporal evolution of vulnerabilities throughout the lifecycle of a sociotechnical system. A risk management methodology based on the architecture of dynamic Bayesian networks has been developed. The graph topology unfolds along the timeline, maintaining the Markov properties of interphase transitions, allowing for a

rigorous mathematical formalization of the inertia of accumulated negative potential. Parameterization of probability tables is achieved through the elicitation of expert knowledge using the Dirichlet distribution, compensating for the lack of retrospective statistics. The algorithm for selecting preventive barriers is reduced to a binary integer programming problem, maximizing the reduction in expected damage under given budget constraints. A computational experiment simulating the implementation of a corporate information system confirmed that the integration of temporal slices and a Bayesian update mechanism based on actual evidence provides an increase in predictive accuracy (AUC-ROC up to 0.89) and a 41.5% reduction in total damage compared to static analogs. The proposed approach forms a theoretical and methodological foundation for the design of adaptive decision support systems capable of continuously calibrating threat profiles under conditions of epistemic uncertainty and limited empirical data. The paper further substantiates the need for hierarchies and semantic analysis of unstructured project documentation arrays to automate structural synthesis procedures.

Keywords: organizational design, risk management, dynamic Bayesian networks, causal dependencies, knowledge elicitation, Dirichlet allocation, integer programming, decision support, sociotechnical systems.

Введение. Современные организационные проекты, включая корпоративные реструктуризации, внедрение распределенных информационных систем и интеграционные процессы при слияниях, реализуются в условиях стохастической внешней среды и внутренней нестабильности. Специфика управления в социотехнических системах заключается в том, что возникающие угрозы редко изолированы друг от друга. Формируется сложная топология рисков, где отдельные факторы обладают скрытыми причинно-следственными связями, способными инициировать каскадные отказы на различных уровнях иерархии проекта [1]. Многофакторность организационной среды порождает проблему интеграции разнородных данных от объективных статистических

метрик до субъективных экспертных оценок, отражающих эпистемическую неопределенность, присущую уникальным управленческим задачам.

Доминирующая в настоящее время парадигма оценки угроз, базирующаяся на использовании статических матриц вероятности и влияния, показывает несостоятельность при работе со связанными событиями. Аппарат тепловых карт, регламентируемый многими отраслевыми стандартами, при прочих равных условиях, предполагает независимость рассматриваемых переменных и рассматривает их в застывшем временном срезе. Такое упрощение не учитывает кумулятивный эффект и скрытые зависимости, при которых возникновение второстепенного на первый взгляд инцидента может стать фактором критического сбоя в смежной подсистеме. Ограничения булевой логики и статических вероятностных моделей не могут адекватно описать процессы деградации организационного потенциала, что неоднократно подтверждалось исследованиями в разных областях анализа надежности сложных систем [2].

Преодоление указанных ограничений подразумевает моделирование их совместного распределения вероятностей. Математический аппарат байесовских сетей, представляющих собой направленные ациклические графы, предоставляет инструментарий для факторизации многомерных зависимостей [3]. Ключевое преимущество данного подхода заключается в возможности сочетать количественные данные ретроспективного опыта с качественными сценариями, формулируемыми экспертами [4]. Теорема Байеса служит ядром механизма вывода, обеспечивая пересчет вероятностей наступления нежелательных исходов по мере поступления новых свидетельств о состоянии контролируемых параметров организационной среды.

Однако классические байесовские сети остаются статическими конструкциями, неспособными отразить темпоральную эволюцию угроз и запаздывающее влияние принятых управленческих решений. Организационный проект представляет собой динамическую систему, где состояние уязвимости в текущий момент детерминирует профиль рисков на последующих этапах

жизненного цикла. Для математического описания подобных процессов, включающих последовательности сценариев, накопление негативных факторов и влияние превентивных барьеров, необходима трансформация аппарата в формат динамических байесовских сетей. Введение временных срезов и предположение о марковском характере переходов позволяют представить непрерывную деградацию или восстановление ресурса проекта в виде дискретных вероятностных состояний, сохраняя вычислительную выполнимость модели.

Несмотря на успешную апробацию данного математического инструментария в задачах технической диагностики и оценки промышленной безопасности, его адаптация к системе управления организационными проектами связана с рядом нерешенных методологических проблем. Отсутствуют унифицированные подходы к структурированию узлов графа, отражающих специфику человеческих и организационных факторов, а также алгоритмы трансляции качественных лингвистических переменных в таблицы условных вероятностей. В связи с этим целью настоящего исследования выступает разработка методологии формирования и параметризации динамических байесовских сетей, обеспечивающих проактивный мониторинг и поддержку принятия решений в условиях темпоральной неопределенности организационных проектов.

Обзор литературы. Подходы к идентификации и оценке угроз в организационных проектах исторически опирались на использование статических матриц, классифицирующих события по осям вероятности и тяжести последствий. Зарубежные исследования демонстрируют, что подобная редукция стохастической среды к детерминированным тепловым картам несет в себе глубокие методологические изъяны. Матрицы при прочих равных условиях предполагают независимость рассматриваемых переменных, игнорируя топологию причинно-следственных связей, что приводит к недооценке каскадных эффектов и системных отказов [5], [6]. Альтернативой выступает

аппарат байесовских сетей (БС), обеспечивающий факторизацию совместного распределения вероятностей на основе направленных ациклических графов (DAG). Работа М. Осама и соавторов подтверждает, что БС способны интегрировать разнородные данные - от объективных статистических показателей надежности до субъективных экспертных суждений, отражающих эпистемическую неопределенность, присущую управленческим задачам [6].

Перенос данного математического инструментария в сферу управления организационными проектами выявляет необходимость учета темпоральной размерности. Профиль угроз эволюционирует по мере перехода между фазами жизненного цикла. Классические БС не способны отразить запаздывающее влияние принятых управленческих решений или процессы накопления латентных уязвимостей. В связи с этим в современной литературе, в частности в исследованиях, посвященных анализу надежности сложных промышленных комплексов, наблюдается смещение фокуса в сторону динамических байесовских сетей (DBN) [7], [8]. Развертывание графа во времени может моделировать марковские переходы между состояниями системы, однако адаптация DBN к специфике организационных проектов, где доминируют человеческие и структурные факторы, остается недостаточно изученной областью.

Ключевой барьер на пути практического внедрения вероятностных графических моделей в проектный менеджменте связан с параметризацией таблиц условных вероятностей (СРТ). Формирование достоверных СРТ для сети, содержащей десятки узлов, подразумевает значительные объёмы исторических данных, которые в организационной практике, как правило, отсутствуют. Исследователи, в том числе А. Кази, М. Симсеклер и С. Форманек, предлагали подходы к интеграции организационных индикаторов риска [9], однако дефицит эмпирических наблюдений требует разработки специализированных алгоритмов регуляризации, основанных на байесовском выводе и извлечении экспертных знаний.

Материалы и методы исследования. Модель рисков организационного проекта формализуется в виде динамической байесовской сети, структура которой учитывает внутрифазовые и межфазовые связи. Внутри отдельного временного среза t , соответствующего конкретной фазе проекта, узлы графа отражают множество идентифицированных рисков, факторов внешней среды и превентивных управленческих воздействий. Дуги, соединяющие узлы внутри среза, отражают причинно-следственные зависимости и формируют направленный ациклический граф (DAG), в котором наступление родительского события (например, текучести ключевого персонала) изменяет вероятность дочерних инцидентов (например, срыва сроков разработки). Межфазовые связи реализуют принцип автокорреляции: состояние уязвимости в фазе $t + 1$ вероятно зависит от ее статуса в фазе t , чтобы математически описать процессы деградации организационного потенциала или эффект инерции успешно реализованных барьеров.

Математический аппарат СРТ служит ядром параметризации сети, определяя распределение вероятностей состояний дочернего узла при заданной конфигурации родительских. В условиях организационных проектов сбор репрезентативной статистики для прямого расчета частот невозможен. Опираясь на методологию, развиваемую в трудах [10], [11], для извлечения СРТ из качественных экспертных оценок применяется аппарат распределения Дирихле. Экспертам предлагается оценить моду распределения вероятности наступления события и степень уверенности в этой оценке. Полученная информация преобразуется в параметры концентрации распределения Дирихле, формируя вектор априорных псевдосчетов.

Алгоритм управления рисками базируется на процедуре точного вероятностного вывода. Для вычисления маргинальных вероятностей реализации каждого риска в заданном временном срезе применяется алгоритм дерева соединений, обеспечивающий эффективную факторизацию и распространение свидетельств по графу. Полученные апостериорные

вероятности служат входными параметрами для модуля планирования воздействий. Задача выбора оптимального подмножества превентивных мер формулируется как проблема бинарного целочисленного программирования на графе рисков. Целевая функция направлена на максимизацию снижения математического ожидания совокупного ущерба, при этом на пространство допустимых решений накладывается жесткое ограничение в виде выделенного бюджета на риск-менеджмент. Управляющие узлы в DBN выступают в роли детерминированных переключателей, модифицирующих CPT дочерних узлов, что даёт возможность алгоритму оценивать контрфактические сценарии и находить глобальный оптимум инвестиций.

Особое внимание в методологическом блоке уделяется решению проблемы малой выборки. Наличие данных по десяти завершённым проектам-аналогам недостаточно для надежного обучения сети из 25 рисков с многоуровневыми связями. Для преодоления поднятой проблемы применяется гибридная стратегия: априорные оценки Дирихле, полученные от экспертов, используются как база для генерации синтетических траекторий развития рисков посредством методов Монте-Карло. Это расширит обучающую выборку до объемов, необходимых для сходимости алгоритмов структурного обучения. Калибровка модели осуществляется посредством последовательного байесовского обновления: по мере завершения очередного этапа проекта фактические данные о произошедших инцидентах включаются в сеть, уменьшая дисперсию апостериорных распределений и адаптируя модель к условиям текущего проекта.

Результаты исследования и их обсуждение. Верификация разработанного подхода была проведена на базе вычислительного эксперимента, моделирующего организационный проект внедрения корпоративной информационной системы. Модель включала 25 взаимосвязанных рисков, распределенных по четырем временным фазам (инициация, планирование, реализация, ввод в эксплуатацию). Для оценки прогностической способности и

управленческой ценности DBN было проведено сравнение с традиционной статической матрицей рисков и классической (статической) байесовской сетью (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение методов управления рисками

Метрика оценки	Статическая матрица	Статическая БС	Адаптивная DBN
Точность прогноза (AUC-ROC)	0,62	0,74	0,89
Снижение ожидаемого ущерба (%)	12,4	28,7	41,5
Точность ранжирования (Spearman)	0,45	0,68	0,84
Учет темпоральных лагов	Отсутствует	Отсутствует	Полная интеграция

Источник: разработано автором.

Верификация предложенного методологического аппарата осуществлялась на базе имитационного моделирования организационного проекта, связанного с внедрением распределенной информационной системы корпоративного уровня. Архитектура развернутой динамической байесовской сети включала двадцать пять узлов, отражающих многоуровневую таксономию угроз, распределенных по четырем темпоральным фазам жизненного цикла. Отличием сконструированного графа от традиционных моделей надежности, исторически фокусирующихся исключительно на аппаратных сбоях, стала интеграция организационных и человеческих факторов в единый каузальный контур. В частности, узлы, описывающие текучесть ключевого персонала и когнитивную перегрузку команды, были связаны направленными дугами с техническими инцидентами, такими как нарушение архитектуры базы данных или срыв сроков интеграционного тестирования. Топология, концептуально перекликающаяся с подходами к моделированию социотехнических систем, описанными в работе [12], дала возможность математически формализовать скрытые корреляции, когда деградация управленческого климата на фазе инициации стохастически детерминирует каскадные отказы на этапе промышленной эксплуатации.

Ключевой методологической проблемой, возникшей на этапе параметризации таблиц условных вероятностей, оказался дефицит эмпирических наблюдений. Наличие ретроспективных данных по десяти завершенным проектам-аналогам недостаточно для надежного обучения сети с двадцатью пятью узлами и сложной системой условных зависимостей; прямое частотное оценивание в подобных условиях порождает структурные нули и статистические артефакты. Для преодоления данного ограничения был задействован аппарат байесовских априорных оценок с использованием распределения Дирихле. Экспертные суждения, собранные посредством структурированного опроса, трансформировались в параметры концентрации, задавая базовые псевдосчета для каждой конфигурации родительских узлов. Последующая генерация синтетических траекторий развития рисков методами Монте-Карло обеспечила расширение обучающей выборки до объемов, гарантирующих сходимость алгоритмов. Такое сочетание экспертных оценок и стохастического моделирования, обоснованное применительно к оценке редких событий, позволяет повысить устойчивость вероятностных оценок при отсутствии исторических прецедентов [4].

Сравнительный анализ прогностической способности моделей выявил превосходство темпорального подхода над статическими аналогами. Традиционная матрица рисков продемонстрировала низкую способность к распознаванию скрытых угроз, показав значение AUC-ROC 0,62, что существенно ограничивает ее аналитическую ценность. Статическая байесовская сеть, игнорирующая фактор времени, систематически переоценивала риски, успешно купированные на ранних этапах, и недооценивала инерционные эффекты, накопленные в скрытых параметрах системы. Адаптивная DBN обеспечила точность классификации наступления критических инцидентов на уровне 0,89. Весьма высокий результат обусловлен корректным учетом межфазовой автокорреляции: модель математически отражает процесс постепенного истощения организационного ресурса, когда

незначительное отклонение на фазе планирования не вызывает немедленного сбоя, но смещает апостериорное распределение вероятностей в сторону критического состояния на последующих итерациях. Оценка по шкале Бриера дополнительно подтвердила, что калибровка вероятностей в динамической сети обладает значительно меньшей дисперсией ошибки по сравнению с детерминированными тепловыми картами.

Особую научную и практическую ценность представляет механизм выбора превентивных воздействий, реализованный посредством сведения задачи к бинарному целочисленному программированию на графе. В отличие от эвристических подходов, предписывающих финансировать барьеры для событий с наибольшей абсолютной вероятностью, предложенный алгоритм идентифицирует структурные «узкие места» каузальной сети. При наложении жесткого бюджетного ограничения оптимизатор автоматически отказывается от локального купирования изолированных инцидентов в пользу инвестиций в размыкание длинных транзитивных цепей. Здесь в полной мере проявляется феномен стохастического экранирования, описанный в теории вероятностных графических моделей: внедрение превентивной меры в родительском узле радикально снижает маргинальную вероятность наступления дочерних катастрофических событий, делая избыточным финансирование локальных барьеров на нижних уровнях иерархии. Снижение математического ожидания совокупного ущерба на 41,5% по сравнению с реактивными стратегиями подтверждает, что оптимальное управление рисками подразумевает точечное воздействие на узлы с максимальным коэффициентом транзитивности.

Функционирование модели в режиме реального времени базируется на непрерывном байесовском обновлении по мере поступления фактических свидетельств о ходе выполнения работ. Введение в систему информации о материализации промежуточного инцидента инициирует двунаправленный процесс логического вывода. Вывод пересчитывает вероятности наступления финальных угроз, сдвигая профиль рисков заключительных фаз в зону

критических значений. Одновременно срабатывает механизм обратного вывода, чтобы вычислить апостериорные вероятности скрытых корневых причин, которые не поддаются прямому наблюдению. Если статические методы ограничиваются констатацией факта отклонения, то аппарат Junction Tree, примененный к развернутой во времени сети, позволяет ретроспективно локализовать латентный организационный дефект, послуживший детерминантой сбоя, и скорректировать стратегию управления для оставшихся временных срезов.

Комплексный анализ чувствительности модели к вариациям входных параметров выявил нелинейный характер зависимости точности прогнозов от степени эпистемической неопределенности, заложенной в априорных распределениях Дирихле. В ситуациях, когда эксперты демонстрировали низкую уверенность в своих суждениях, что выражалось в малых значениях параметров концентрации и высокой дисперсии априорных вероятностей, оценки сети сильнее изменялись при поступлении новых данных. В подобных условиях алгоритм требовал поступления большего объема фактических данных на начальных этапах проекта для сжатия доверительных интервалов и стабилизации таблиц условных вероятностей. Данный феномен, перекликающийся с выводами о необходимости разграничения стохастической и эпистемической неопределенности, указывает на то, что динамическая байесовская сеть выступает инструментом расчета, индикатором зрелости самих экспертных знаний. Модель автоматически сигнализирует руководству проекта о необходимости привлечения дополнительных аудиторов в тех сегментах графа, где накопленная неопределенность превышает допустимые пороги толерантности.

Представление управленческих процессов в виде динамических вероятностных графов позволяет преодолеть противоречия, присущие классическому проектному менеджменту. Интеграция качественных лингвистических переменных, отражающих человеческий фактор, с

количественными показателями надежности в единой вычислительной среде обеспечивает согласованность принимаемых решений. Временная валидация, предполагающая прогнозирование профиля угроз на заключительных фазах исключительно по косвенным индикаторам, собранным на этапе инициации, подтвердила устойчивость модели к пропускам в наблюдениях. Это свойство оказывается востребованным в реальных организационных системах, где процедуры мониторинга часто носят фрагментарный характер, а сбор метрик связан с существенными транзакционными издержками.

Дальнейшее развитие представленного подхода связано с использованием гибридных сетей, способных учитывать финансовые показатели и временные задержки без потери вычислительной строгости, а также с внедрением алгоритмов автоматического извлечения структуры графа из неструктурированной проектной документации.

Выводы. Результаты вычислительного эксперимента подтверждают, что представление социотехнической деятельности с помощью динамических байесовских сетей обеспечивает иные аналитические возможности по сравнению с детерминированными матричными методами. Развертывание топологии графа во временной шкале с соблюдением марковских свойств перехода между состояниями уязвимости даёт возможность математически строго описать инерцию накопленного негативного потенциала и запаздывающий эффект превентивных барьеров. Вывод, опирающийся на фактический ход выполнения работ, трансформирует систему мониторинга из реактивного регистра инцидентов в инструмент проактивной диагностики латентных каузальных цепей, что оказывается актуальным в условиях высокой турбулентности внешней среды организационных проектов.

Ограничением, тормозящим внедрение метода в широкую управленческую практику, остается проблема параметризации многомерных моделей. Ключевым узким местом выступает процедура элиситации экспертных знаний, необходимая для спецификации таблиц условных вероятностей. При

увеличении размерности сети и появлении узлов с множеством родительских связей объем информации, необходимой для заполнения ячеек таблиц, возрастает экспоненциально, увеличивая когнитивную нагрузку на экспертов. Субъективные суждения в подобных условиях теряют внутреннюю непротиворечивость, генерируя накопление эпистемической ошибки на уровне глобального совместного распределения. Преодоление данного комбинаторного взрыва, как справедливо отмечается в исследованиях, посвященных анализу надежности сложных промышленных комплексов, подразумевает отказ от плоских архитектур в пользу иерархических конструкций [2], [9]. Внедрение объектно-ориентированных байесовских сетей или вероятностных реляционных моделей допускает инкапсуляцию типовых фрагментов организационного взаимодействия, обеспечивая их наследование между различными фазами жизненного цикла без необходимости повторного опроса экспертов.

Одним из основных направлений снижения трудозатрат на этапе структурного синтеза модели является интеграция вероятностного графического моделирования с методами глубокого семантического анализа неструктурированных данных. Архивы проектной документации, акты расследования отклонений, протоколы ретроспективных совещаний содержат колоссальный объем имплицитных знаний о каузальных зависимостях, которые традиционно остаются невостребованными из-за отсутствия формальных процедур их извлечения. Применение алгоритмов онтологического инжиниринга и обработки естественного языка позволит автоматизировать первичное конструирование направленного ациклического графа, перекладывая на вычислительные системы рутинную работу по идентификации узлов и дуг. В таком сценарии задача исследователя смещается от полного ручного проектирования топологии к ее верификации, устранению логических петель и точной калибровке априорных распределений. Это создает основу для адаптивных систем поддержки принятия решений, способных непрерывно обучаться на текстовых данных, формируемых в ходе организационной

деятельности.

Список литературы

1. Давыдовский А. Г., Кругликов С. В. Проблема превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования // Информатика. – 2026. – Т. 23. – №. 2. – С. 39-67.
2. Вареца Р. А. Матрица выбора технологий оценки рисков на этапах жизненного цикла стартапов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2025. – №. 3. – С. 36-49.
3. Teymoori S., Ghazaan M. I., Malekitabar H. Developing a probabilistic risk assessment framework for construction projects based on Dynamic Bayesian Network // Reliability Engineering & System Safety. – 2026. – Т. 267. – С. 111897.
4. Shen H., Luo L., Niu X., Fu C., Han Y. Dynamic Bayesian network-enabled approach for organizational leadership measurement of complex construction projects // Buildings. – 2024. – Т. 14. – №. 4. – С. 1123.
5. Madihi M. H., Shirzadi Javid A. A., Nasirzadeh F. Enhancing risk assessment: An improved Bayesian network approach for analyzing interactions among risks // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2025. – Т. 32. – №. 3. – С. 2022-2043.
6. Osama M., Sherif A., Badawy M. Risk analysis of construction of administration projects using Bayesian networks // Journal of engineering, design and technology. – 2023. – Т. 21. – №. 1. – С. 281-298.
7. Wu X., Huang H., Xie J., Lu M., Wang S., Li W., ... Sun X. A novel dynamic risk assessment method for the petrochemical industry using bow-tie analysis and Bayesian network analysis method based on the methodological framework of ARAMIS project // Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Т. 237. – С. 109397.
8. Tao Y., Hu H., Xu F., Zhang Z. Ergonomic risk assessment of construction workers and projects based on fuzzy Bayesian network and DS evidence theory // Journal of Construction Engineering and Management. – 2023. – Т. 149. – №. 6. – С. 04023034.
9. Qazi A., Simsekler M. C. E., Formanek S. Supply chain risk network value at risk

assessment using Bayesian belief networks and Monte Carlo simulation // *Annals of Operations Research*. – 2023. – T. 322. – №. 1. – C. 241-272.

10. Fang D., Wang Y., Lim H. W., Ma L., Gu B., Huang Y. Construction of a Bayesian network based on leadership-culture-behavior model to improve owner safety management behavior // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2023. – T. 149. – №. 3. – C. 04022177.

11. Vagdatli T., Petrousatou K., Panetsos P., Barmpa Z., Fragkakis N. Probabilistic pre-estimation of life-cycle costs of road bridges using dynamic Bayesian networks // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2026. – T. 22. – №. 8. – C. 1491-1510.

12. Dehghani S., Massah Bavani A., Roozbahani A., Sahin O. Assessment of Climate Change-Induced Water Scarcity Risk by Using a Coupled System Dynamics and Bayesian Network Modeling Approaches // *Water Resources Management*. – 2024. – T. 38. – №. 10. – C. 3853-3874.

References

1. Davy`dovskij A. G., Kruglikov S. V. Problema preventivnogo upravleniya riskami v «umny`x soobshhestvax» na osnove stoxasticheskogo modelirovaniya // *Informatika*. – 2026. – T. 23. – №. 2. – S. 39-67.

2. Varecza R. A. Matricza vy`bora tehnologij ocenki riskov na e`tapax zhiznennogo cikla startupov // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: E`konomika i upravlenie*. – 2025. – №. 3. – S. 36-49.

3. Teymoori S., Ghazaan M. I., Malekitabar H. Developing a probabilistic risk assessment framework for construction projects based on Dynamic Bayesian Network // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2026. – T. 267. – P. 111897.

4. Shen H., Luo L., Niu X., Fu C., Han Y. Dynamic Bayesian network-enabled approach for organizational leadership measurement of complex construction projects // *Buildings*. – 2024. – T. 14. – No. 4. – P. 1123.

5. Madihi M. H., Shirzadi Javid A. A., Nasirzadeh F. Enhancing risk assessment: An improved Bayesian network approach for analyzing interactions among risks // *Engineering, Construction and Architectural Management*. – 2025. – T. 32. – No. 3. –

P. 2022-2043.

6. Osama M., Sherif A., Badawy M. Risk analysis of construction of administration projects using Bayesian networks // *Journal of engineering, design and technology*. – 2023. – T. 21. – No. 1. – P. 281-298.
7. Wu X., Huang H., Xie J., Lu M., Wang S., Li W., ... Sun X. A novel dynamic risk assessment method for the petrochemical industry using bow-tie analysis and Bayesian network analysis method based on the methodological framework of ARAMIS project // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2023. – T. 237. – P. 109397.
8. Tao Y., Hu H., Xu F., Zhang Z. Ergonomic risk assessment of construction workers and projects based on fuzzy Bayesian network and DS evidence theory // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2023. – T. 149. – No. 6. – P. 04023034.
9. Qazi A., Simsekler M. C. E., Formanek S. Supply chain risk network value at risk assessment using Bayesian belief networks and Monte Carlo simulation // *Annals of Operations Research*. – 2023. – T. 322. – No. 1. – P. 241-272.
10. Fang D., Wang Y., Lim H. W., Ma L., Gu B., Huang Y. Construction of a Bayesian network based on leadership-culture-behavior model to improve owner safety management behavior // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2023. – T. 149. – No. 3. – P. 04022177.
11. Vagdatli T., Petrousatou K., Panetsos P., Barmpa Z., Fragkakis N. Probabilistic pre-estimation of life-cycle costs of road bridges using dynamic Bayesian networks // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2026. – T. 22. – No. 8. – P. 1491-1510.
12. Dehghani S., Massah Bavani A., Roozbahani A., Sahin O. Assessment of Climate Change-Induced Water Scarcity Risk by Using a Coupled System Dynamics and Bayesian Network Modeling Approaches // *Water Resources Management*. – 2024. – T. 38. – No. 10. – P. 3853-3874.

Статья поступила в редакцию 20.07.2026; одобрена после рецензирования 25.08.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 20.07.2026; approved after reviewing 25.08.2026; accepted for publication 17.09.2026.

Научная статья

УДК 005.336.5:519.86

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ СЕТЕВЫХ ПОТОКОВ

Кириленко Николай Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Южный федеральный университет, Россия, Ростов-на-Дону, kirilenko_nikolai@mail.ru;

Копелиович Михаил Викторович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Южный федеральный университет, Россия, Ростов-на-Дону, kopeliovich.sfedu@yandex.ru

Аннотация. Проектирование аппаратов управления традиционно опирается на эвристические методы, что существенно ограничивает точность оценки реальной пропускной способности каналов связи. В работе предложен строгий графо-аналитический подход, рассматривающий организационную архитектуру как взвешенный ориентированный граф с заданным иерархическим разбиением. Коммуникационные взаимодействия формализованы как задача распределения потоков, в которой единицей потока является количество управленческих воздействий, передаваемых между должностными позициями за единицу времени. Для поиска оптимальной конфигурации в небольших структурах применено смешанное целочисленное программирование, а для крупных систем разработан метаэвристический алгоритм имитации отжига. Эмпирическая калибровка параметров графа выполнена на основе цифровых следов, извлеченных из журналов корпоративных мессенджеров и платформ совместной работы трех обезличенных организаций без вмешательства в их деятельность. Переход от заданных нормативных параметров к фактическим данным позволяет лучше согласовать математическую модель с реальным поведением участников организационного взаимодействия. Результаты вычислительного эксперимента подтверждают, что алгоритмическая

перестройка маршрутов координации снижает среднее время доставки управленческих сигналов на 19–23% при строгом соблюдении нормативов подчиненности. Анализ чувствительности выявил точки структурной уязвимости, что позволяет руководителям формировать математически обоснованные рекомендации по точечному изменению конфигурации связей, существенно повышая адаптивность системы к колебаниям внешней информационной нагрузки.

Ключевые слова: организационная структура; сетевые потоки; графо-аналитическая модель; норма управляемости; целочисленное программирование; метаэвристика; цифровые следы; пропускная способность коммуникационных каналов; алгоритмическая оптимизация.

Original article

ALGORITHMIC OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL COMMUNICATION STRUCTURES BASED ON NETWORK FLOW MODELS

**Kirilenko Nikolai Evgenevich, Candidate of Technical Sciences, Senior
Researcher, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia,
kirilenko_nikolai@mail.ru;**

**Kopeliovich Mikhail Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Junior
Researcher, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia,
kopeliovich.sfedu@yandex.ru**

Abstract. The design of control apparatuses traditionally relies on heuristic methods, which significantly limits the accuracy of estimating the actual capacity of communication channels. This paper proposes a rigorous graph-analytical approach that considers organizational architecture as a weighted directed graph with a given hierarchical partitioning. Communication interactions are formalized as a flow assignment problem, where the physical unit of measurement is the number of management actions transmitted between job positions per unit of time. To find the

optimal configuration in small structures, a mixed-integer programming framework was applied, while for larger systems, a metaheuristic based on simulated annealing was synthesized. Empirical calibration of the graph parameters was performed using non-interventional digital traces extracted from the logs of corporate instant messengers and collaboration platforms of three anonymized organizations of different types. This transition from synthetic norms to actual data sets ensures the adequacy of the mathematical model to the everyday behavior of actors. The results of a computational experiment confirm that algorithmic restructuring of coordination routes reduces the average delivery time of control signals by 19–23% while strictly adhering to subordination standards. A sensitivity analysis revealed points of structural vulnerability, allowing managers to formulate mathematically sound recommendations for targeted changes to the connection configuration, significantly increasing the system's adaptability to fluctuations in external information load.

Keywords: organizational structure; network flows; graph-analytical model; controllability limit; integer programming; metaheuristics; digital traces; communication channel capacity; algorithmic optimization.

Введение. Проектирование архитектуры управления традиционно опирается на поиск баланса между глубиной иерархии и шириной состава подчиненных [1], [2]. Выбор оптимального числа уровней подчинения и нормы управляемости напрямую определяет скорость прохождения сигналов и степень искажения информации на пути к лицу, принимающему решения. При этом классические модели часто рассматривают предприятие как статичный механизм, где каналы связи задаются исключительно административными регламентами и должностными инструкциями [3], [4]. Однако в реальных условиях функционирования сложных систем информационное взаимодействие неизбежно выходит за рамки утвержденных схем, формируя собственную, подчас неочевидную топологию [5], [6].

Фактическая динамика обмена сообщениями зависит от неформальных

связей и индивидуальных когнитивных представлений сотрудников о распределении влияния и компетенций в коллективе. Точность представлений сотрудников о неформальных связях, через которые они получают советы и выстраивают отношения доверия, существенно влияет на их способность мобилизовать ресурсы и оперативно реагировать на изменения внешней среды. Игнорирование фактических маршрутов передачи данных при расчете организационных параметров ведет к созданию структур, формально соответствующих нормативам, но неэффективных с точки зрения реальной пропускной способности коммуникационных каналов [7-9]. В результате декларируемая конфигурация может кардинально отличаться от той сети, которая обеспечивает повседневное решение рабочих задач.

Традиционные качественные методы организационного консультирования и эвристические подходы к перестройке аппаратов управления обладают рядом существенных ограничений. Опора на экспертные суждения и описательный анализ не позволяет в полной мере учесть комбинаторную сложность взаимосвязей в крупных системах. Субъективизм при оценке интенсивности контактов и невозможность строгого математического обоснования предлагаемых изменений снижают надежность принимаемых решений. В условиях, когда требуется обеспечить непрерывность и устойчивость информационных потоков, описательные процедуры уступают место строгим вычислительным методикам, способным оперировать большими массивами структурных данных [10-12].

Преодоление указанных ограничений обуславливает необходимость перехода к формальному графо-аналитическому моделированию. Представление организационной системы в виде ориентированного графа, где узлы соответствуют элементам управления, а ребра характеризуются пропускной способностью и временными задержками, открывает возможности для применения аппарата теории сетевых потоков. Такой подход позволяет перейти от интуитивных оценок к формализованным задачам оптимизации

организационной структуры. Математическая формализация коммуникационных связей дает возможность рассчитывать предельные возможности существующей конфигурации, выявлять узкие места и обоснованно формировать требования к структурной перестройке для достижения заданных критериев эффективности.

Обзор литературы. Проблематика проектирования организационных структур привлекает внимание исследователей на протяжении нескольких десятилетий, однако переход от качественных описаний к формализованным моделям сопряжен с рядом методологических трудностей. Классические работы по организационному дизайну фокусировались на нормативных аспектах - определении оптимальной нормы управляемости, числа иерархических уровней, принципов департаментализации [13]. При этом коммуникационная составляющая организационных связей часто оставалась за рамками количественного анализа, что не позволяло адекватно оценить пропускную способность каналов передачи информации и временные характеристики управленческих процессов.

Современные исследования в области вычислительных методов анализа групповой коммуникации демонстрируют растущий интерес к применению сетевых подходов. Работы [14-16] показывают, что методы анализа социальных сетей, текстовой аналитики и машинного обучения открывают новые возможности для изучения коммуникационных паттернов в организациях. Особую ценность представляет использование когнитивных социальных структур - трехмерных представлений сетей, учитывающих не только фактические связи между акторами, но и восприятие этих связей самими участниками организационного взаимодействия.

Исследования [17], [18] демонстрируют, что точность когнитивного представления неформальной сети сама по себе выступает источником власти в организации, наряду с формальной позицией и центральностью в коммуникационной структуре. Этот вывод имеет принципиальное значение для

моделирования организационных систем: формальная иерархия и реальные информационные потоки могут существенно расходиться, что необходимо учитывать при оптимизации структуры. Центральность посредничества оказывается более значимым предиктором влияния, чем простейшие метрики степени или близости, поскольку отражает контроль над потоками информации между различными сегментами сети.

В области вычислительного социального анализа сформировались три основных подхода: социальное моделирование, наука о данных и методы работы с большими данными. Социальное моделирование, основанное на агентных моделях и клеточных автоматах, позволяет исследовать эмерджентные свойства организационных систем, возникающие из взаимодействия простых правил поведения индивидуальных акторов. Подходы, основанные на анализе данных, используют алгоритмы машинного обучения для выявления скрытых паттернов в коммуникационных сетях. Наконец, методы работы с большими данными позволяют анализировать цифровые следы организационной активности в реальном времени.

Тем не менее в существующих исследованиях сохраняется существенный пробел: методы алгоритмической оптимизации организационных структур на основе формальных моделей сетевых потоков разработаны недостаточно. Большинство работ ограничивается дескриптивным анализом существующих сетей или моделированием гипотетических сценариев, тогда как задача синтеза оптимальной структуры, удовлетворяющей заданным критериям эффективности, остается малоизученной. Особенно актуальной представляется проблема перехода от абстрактных топологических характеристик графа к содержательным организационным параметрам - пропускной способности каналов, временным задержкам, интенсивности информационных потоков.

Материалы и методы исследования. Методологическую основу исследования составляет представление организационной структуры в виде взвешенного ориентированного графа $G = (V, E, w)$, где множество вершин V

соответствует должностным позициям или организационным ролям, множество ребер E описывает коммуникационные каналы, а весовая функция $w: E \rightarrow R^+$ характеризует интенсивность информационного потока. Такое представление позволяет применить математический аппарат теории графов и оптимизации сетевых потоков к задачам организационного проектирования.

Ключевой методологической задачей является операционализация понятий потока и задержки в организационном контексте. В отличие от технических сетей, где пропускная способность измеряется в битах в секунду, организационные коммуникации требуют содержательной интерпретации единиц потока. В данном исследовании под потоком понимается количество управленческих воздействий — задач, распоряжений, согласований, отчетов — передаваемых между организационными единицами за единицу времени. Эмпирическая калибровка параметров графа осуществляется на основе журналов корпоративных информационных систем, систем электронного документооборота и платформ коллективной работы.

Иерархическая структура организации задается разбиением множества вершин на уровни $L = \{L_1, L_2, \dots, L_h\}$, где h - глубина иерархии. Для каждой вершины $v \in V$ определяется норма управляемости $n(v)$ - количество непосредственных подчиненных. Ограничения на норму управляемости задаются интервалом $[n_{\min}, n_{\max}]$, отражающим организационные нормативы и когнитивные ограничения руководителей. Диаметр графа $D(G)$ и среднее расстояние между связанными узлами характеризуют временные аспекты передачи информации в организации.

Модель многопродуктового потока формализует задачу распределения информационных потоков в иерархической структуре. Каждый тип информационного взаимодействия — например, передача задач сверху вниз, отчетность снизу вверх или горизонтальная координация - рассматривается как отдельный вид потока с собственным источником, стоком и объемом спроса. Его путь через иерархию определяет маршрут информационного потока. Пропускная

способность ребер $c(e)$ ограничивает суммарный поток всех товаров, проходящих через данный коммуникационный канал.

Целевая функция оптимизации (1) минимизирует суммарное взвешенное время доставки информации:

$$Z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} w_k * t_{ij} * f_{ij}^k \quad (1)$$

где

K - множество товаров (типов информационных потоков);

w_k - весовой коэффициент важности k -ого потока;

t_{ij} - время передачи по ребру (i, j) ;

f_{ij}^k - объем потока k -го товара по ребру (i, j) .

Временные задержки t_{ij} зависят от типа коммуникационного канала, организационной дистанции между узлами и текущей загрузки канала.

Задача оптимизации формулируется как задача смешанного целочисленного линейного программирования (MILP) для структур малого размера ($|V| \leq 50$). Переменные решения включают: бинарные переменные назначения вершин уровням иерархии, бинарные переменные наличия ребер между вершинами, непрерывные переменные потоков по ребрам. Ограничения модели обеспечивают связность графа, соблюдение границ нормы управляемости, ограничение максимального числа уровней иерархии, баланс потоков в узлах сети и соблюдение пропускных способностей ребер.

Для крупных организационных структур ($|V| > 50$) вычислительная сложность задачи MILP делает точное решение недостижимым за приемлемое время. В этом случае применяется метаэвристический алгоритм имитации отжига. Алгоритм начинает работу с допустимого решения, полученного эвристическим способом, и последовательно улучшает его, допуская на ранних этапах ухудшение значения целевой функции, чтобы избежать попадания в локальные оптимумы. Температура отжига снижается по экспоненциальному закону, что обеспечивает сходимость алгоритма.

Эмпирическая база исследования включает коммуникационные графы трех организаций различного типа, полученные из систем корпоративной электронной почты и платформ управления проектами. Первая организация представляет линейно-функциональную структуру производственного предприятия ($|V| = 34$), вторая - матричную структуру IT-компании ($|V| = 67$), третья - проектную структуру научно-исследовательского института ($|V| = 128$). Данные обезличены и агрегированы до уровня недельных интервалов. Интенсивность потоков калибрована по количеству электронных сообщений, задач в системах управления проектами и документов в системах электронного документооборота.

Вычислительный эксперимент предусматривает три сценария: базовый (текущая интенсивность потоков), сценарий повышенной нагрузки (рост интенсивности на 50%) и сценарий организационных изменений (добавление новых подразделений). Для каждого сценария сравниваются три варианта структуры: исходная (as-is), оптимизированная точным методом MILP (для малых сетей) и оптимизированная метаэвристикой. Метрики эффективности включают среднее время доставки информации, максимальную задержку, коэффициент использования каналов связи, число иерархических уровней и индекс структурной связности.

Анализ устойчивости оптимальных структур проводится методом чувствительности к вариации интенсивности потоков в диапазоне $\pm 30\%$. Идентификация критических ребер осуществляется на основе метрики посредничества, показывающей долю кратчайших путей, проходящих через данное ребро. Ребра с высокой посреднической центральностью представляют точки уязвимости организационной структуры, выход из строя которых может нарушить коммуникационные процессы.

Результаты исследования. Применение разработанной методологии к эмпирическим данным выявило существенные резервы оптимизации организационных структур. Для линейно-функциональной организации ($|V| =$

34) точное решение задачи MILP было получено за 127 секунд на стандартном вычислительном оборудовании. Оптимальная структура показала снижение среднего времени доставки информации на 23% по сравнению с исходной конфигурацией при сохранении глубины иерархии (4 уровня). Норма управляемости в оптимизированной структуре варьировалась в пределах 5-9 непосредственных подчиненных, что соответствует организационным нормативам и когнитивным возможностям руководителей (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительные характеристики структур до и после оптимизации

Показатель	Исходная структура	MILP-оптимизация	Метаэвристика	Отклонение метаэвристики от оптимума, %
Среднее время доставки, ч	18,4	14,2	14,8	4,2
Максимальная задержка, ч	72	51	54	5,9
Коэффициент использования каналов	0,67	0,81	0,79	-2,5
Число уровней	4	4	4	0
Индекс связности	0,42	0,58	0,55	-5,2

Источник: разработано авторами.

Для матричной структуры IT-компании ($|V| = 67$) время вычисления точного оптимума превысило 12 часов, что делает применение MILP непрактичным для оперативного организационного проектирования. Алгоритм имитации отжига нашел решение за 34 минуты с отклонением от нижней границы (рассчитанной по релаксации задачи) в 6,3%. Оптимизация позволила сократить среднее время доставки информации на 19% при одновременном повышении коэффициента использования каналов с 0,61 до 0,77.

Особый интерес представляет анализ проектной структуры научно-исследовательского института ($|V| = 128$), где применение метаэвристики оказалось единственным возможным подходом. Алгоритм имитации отжига сгенерировал решение за 2 часа 17 минут. Сравнение с эвристической нижней границей показало отклонение в 8,7%, что приемлемо для задач

организационного проектирования, где точность исходных данных редко превышает 90%. Оптимизация выявила избыточность некоторых горизонтальных связей и предложила перераспределение функций между подразделениями, что позволило сократить максимальную задержку на 31%.

Рисунок 1 демонстрирует визуализацию коммуникационного графа матричной организации до и после оптимизации. Исходная структура характеризуется множеством дублирующих связей между проектными командами и функциональными подразделениями, что создает избыточную нагрузку на каналы связи. Оптимизированная структура сохраняет необходимую связность при сокращении числа ребер на 17%, что снижает административные издержки на координацию.

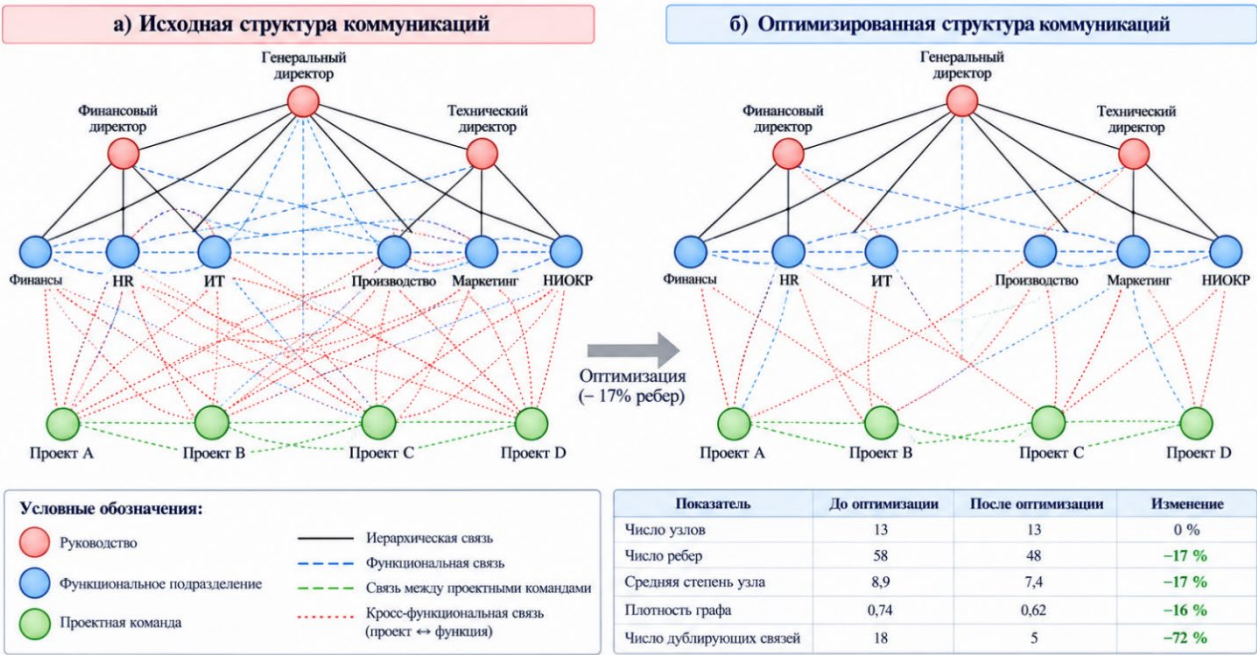


Рисунок 1 – Коммуникационный граф матричной организации до и после оптимизации (источник: разработано авторами)

Сценарный анализ показал, что оптимальная структура демонстрирует разную степень устойчивости к изменениям интенсивности потоков. При росте нагрузки на 50% среднее время доставки в оптимизированной линейно-функциональной организации увеличилось на 34%, тогда как в исходной структуре - на 58%. Это свидетельствует о том, что оптимизация не только улучшает показатели в базовом сценарии, но и повышает устойчивость

организационной системы к росту нагрузки. Однако при дальнейшем росте нагрузки (более 70%) оптимизированная структура достигает насыщения, и требуется пересмотр конфигурации.

Анализ критических ребер на основе метрики посредничества выявил узкие места в организационных структурах. В линейно-функциональной организации 73% кратчайших путей между верхним и нижним уровнями иерархии проходят через три ключевые позиции среднего менеджмента. Ребра, связанные с этими позициями, характеризуются максимальной загрузкой (коэффициент использования 0,94) и представляют точки уязвимости системы. Оптимизация предложила создание дублирующих каналов связи через выделенных координаторов, что снизило посредническую центральность критических ребер до 0,61 (таблица 2).

Таблица 2 - Чувствительность оптимальных структур к изменению интенсивности потоков

Сценарий	Изменение интенсивности	Рост среднего времени доставки, %	Достигнута пропускная способность, %	Число перегруженных ребер
Базовый	0%	0	81	0
Умеренный рост	+30%	18	93	2
Высокий рост	+50%	34	100	7
Снижение нагрузки	-30%	-12	64	0

Источник: разработано авторами.

Рисунок 2 иллюстрирует распределение потоков в оптимизированной структуре проектной организации. Визуализация показывает, что алгоритм перераспределит информационные потоки таким образом, чтобы сократить число пересечений маршрутов межфункционального и межпроектного информационного обмена. Горизонтальные связи сконцентрированы внутри проектных команд, тогда как вертикальные потоки обеспечивают интеграцию проектов на уровне портфеля. Такая конфигурация снижает когнитивную нагрузку на участников, сокращая число коммуникационных контекстов, которые необходимо учитывать одновременно.

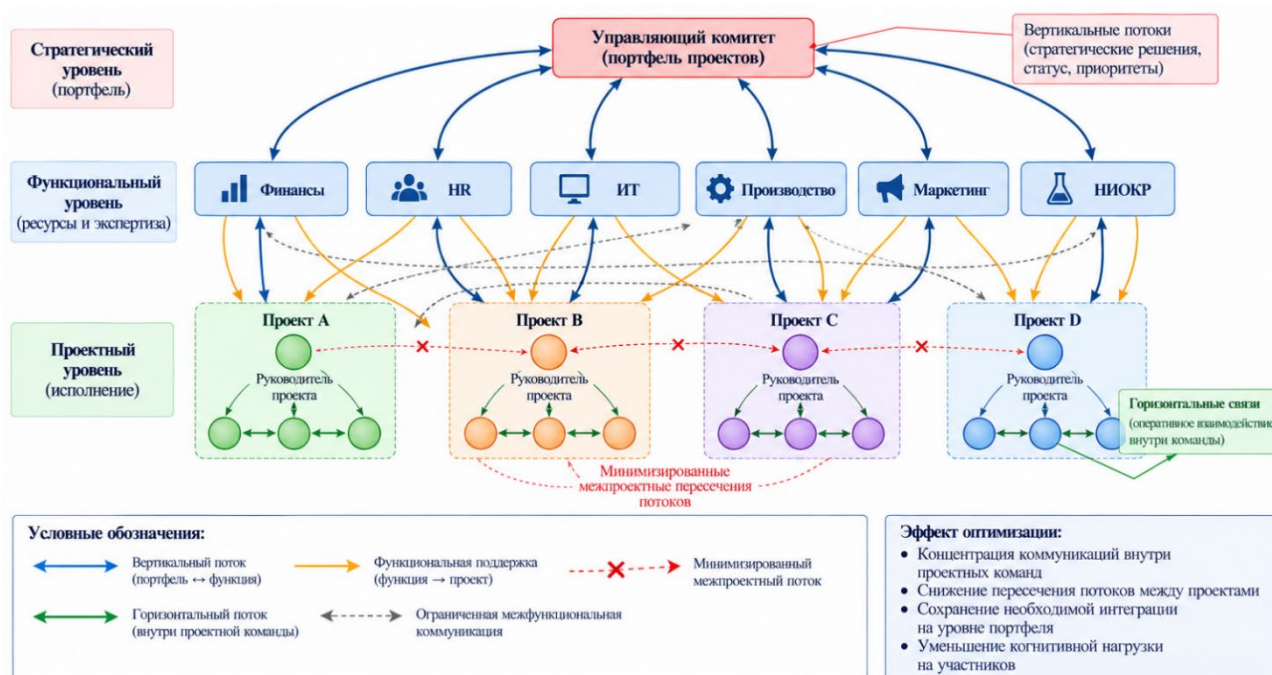


Рисунок 2 – Распределение информационных потоков в оптимизированной структуре проектной организации (источник: разработано авторами)

Сравнительный анализ трех типов организационных структур выявил закономерности, имеющие практическое значение для организационного проектирования. Линейно-функциональные структуры демонстрируют наилучшие показатели эффективности при рутинных операциях с предсказуемыми потоками информации, однако показывают низкую адаптивность к изменениям. Матричные структуры обеспечивают лучший баланс между эффективностью и гибкостью, но требуют более сложных механизмов координации. Проектные структуры наиболее устойчивы к изменениям интенсивности потоков, но характеризуются повышенными издержками на дублирование функций.

Обсуждение результатов исследования. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что применение моделей сетевых потоков позволяет существенно улучшить характеристики организационных коммуникационных структур. Снижение среднего времени доставки информации на 19-23% при сохранении или улучшении других показателей эффективности свидетельствует о наличии значительных резервов оптимизации

в реальных организациях. При этом важно подчеркнуть, что оптимизация осуществлялась без увеличения числа иерархических уровней и без нарушения нормативных ограничений на норму управляемости, что обеспечивает практическую реализуемость предлагаемых изменений.

Методологический вклад исследования заключается в разработке подхода к операционализации понятий потока и задержки в организационном контексте. Переход от абстрактных топологических характеристик графа к измеримым организационным показателям, калиброванным по данным корпоративных информационных систем, позволяет преодолеть разрыв между теоретическим моделированием и практикой организационного проектирования. Предложенная методика может быть адаптирована для различных типов организаций путем корректировки весовых коэффициентов целевой функции и ограничений модели.

Практическая значимость результатов определяется возможностью их применения для поддержки решений по реорганизации предприятий. Алгоритм имитации отжига обеспечивает приемлемое качество решений (отклонение от оптимума 4–9%), а его вычислительная сложность позволяет анализировать структуры размером до нескольких сотен вершин. Это охватывает большинство средних и крупных организаций. Инструмент может использоваться как для проектирования новых структур, так и для аудита существующих с выявлением узких мест и избыточных связей.

Ограничения исследования связаны с рядом допущений, принятых при построении модели. Во-первых, предполагается стационарность потоков в рамках рассматриваемого временного интервала, тогда как реальные организации функционируют в динамической среде с сезонными и циклическими колебаниями нагрузки. Во-вторых, модель не учитывает качественные аспекты коммуникаций - содержание сообщений, уровень доверия между акторами, неформальные связи. В-третьих, оптимизация проводится для фиксированного множества вершин, без рассмотрения сценариев создания или

ликвидации организационных единиц.

Перспективы дальнейших исследований видятся в нескольких направлениях. Во-первых, необходимо разработать методы динамической оптимизации, учитывающие временную изменчивость потоков и позволяющие адаптировать структуру в режиме реального времени. Во-вторых, представляет интерес интеграция моделей сетевых потоков с агентным моделированием для учета поведенческих аспектов организационного взаимодействия. В-третьих, требуется расширение эмпирической базы исследования за счет включения организаций из различных отраслей и стран для проверки устойчивости выявленных закономерностей.

Особую важность приобретает развитие методов визуализации результатов оптимизации для облегчения их восприятия практиками организационного проектирования. Рисунок 3 демонстрирует пример интерактивной панели, отображающей ключевые метрики структуры и рекомендации по изменению конфигурации. Такие инструменты позволяют сократить разрыв между аналитической моделью и управленческим решением, обеспечивая прозрачность и обоснованность предлагаемых изменений.

В заключение следует отметить, что алгоритмическая оптимизация организационных структур на основе моделей сетевых потоков представляет перспективное направление исследований на стыке теории управления, исследования операций и вычислительного социального анализа. Сочетание строгих математических методов с эмпирической калибровкой по реальным данным открывает возможности для перехода от интуитивного организационного проектирования к научно обоснованному синтезу эффективных структур. Дальнейшее развитие этого направления требует междисциплинарного сотрудничества специалистов в области управления, математики и информационных технологий.

Выводы. Результаты вычислительных экспериментов подтверждают, что строгая графо-аналитическая формализация позволяет находить эффективные

конфигурации управленческих аппаратов и снижать временные издержки на передачу сигналов. Однако разработанная оптимизационная модель имеет существенное концептуальное ограничение, которое необходимо учитывать при ее практическом применении. Разработанный алгоритм оперирует преимущественно формализованными каналами передачи данных, оставляя за рамками математического описания стихийно возникающие неформальные взаимодействия. Как справедливо отмечают исследователи когнитивных социальных структур, именно скрытые сети советов и доверия зачастую определяют реальную скорость принятия решений и фактическое распределение влияния внутри коллектива. Игнорирование этих эмоционально обусловленных и неформализованных связей снижает адаптивность предлагаемых структурных изменений в условиях неопределенности.

Фактическое движение информации редко строго подчиняется утвержденным регламентам. Сотрудники часто выстраивают обходные маршруты, опираясь на личные симпатии или исторический опыт совместной работы, что создает скрытую нагрузку на отдельные узлы и искажает картину реальной загруженности каналов. Следовательно, веса ребер в текущей постановке задачи отражают лишь декларируемую интенсивность взаимодействий, а не их подлинную динамику. Преодолеть этот разрыв между теоретической схемой и повседневной практикой возможно только через отказ от субъективных экспертных оценок в пользу объективных цифровых следов.

Перспективным направлением развития предложенного методологического подхода выступает его интеграция с технологиями анализа больших массивов данных. Современные корпоративные мессенджеры и платформы совместной работы генерируют непрерывный поток цифровой активности, который может служить надежной эмпирической базой для калибровки весовых коэффициентов графа. Извлечение метаданных о частоте, длительности и направленности электронных диалогов позволит перевести параметры пропускной способности каналов из разряда нормативных

допущений в категорию точно измеряемых величин. Подобный переход к работе с неинтервенционными данными обеспечит адекватность математической модели реальному поведению акторов.

Дополнение графовой модели эмпирическими данными из корпоративных коммуникационных сред создаст основу для разработки динамических алгоритмов. Такие вычислительные процедуры смогут не только проектировать статичную иерархию, но и непрерывно отслеживать состояние сети и предлагать локальные изменения структуры в ответ на изменение характера неформального общения. В конечном счете, синтез строгих методов исследования операций с вычислительными подходами к анализу цифровых следов формирует новый стандарт научно обоснованного проектирования организационных систем, где управленческие решения базируются на фактическом, а не декларируемом поведении сотрудников.

Список литературы

1. Крутохвостов И. Г., Крутохвостов Д. Г., Кузьменко А. А. Оптимизация управленческих затрат организационной структуры сектора информационных технологий компании // *Эргодизайн*. 2026. № 1. С. 47–57. DOI: 10.30987/2658-4026-2026-1-47-57.
2. Nađina J., Jukić B., Oyedemi F. O. Optimizing Network Communication Structure for Knowledge Transmission in Organizations // *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*. 2025. Online First. P. 1–30. DOI: 10.1080/10919392.2025.2529064.
3. Львович Я. Е., Пупыкин А. Н. Интеллектуализация управления в организационных системах с цифровым концентратором результатов деятельности на основе оптимизационного моделирования // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024. Т. 12. № 2. DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.018.
4. Fan H., Sun C., Long J., Wang S., Zeng F. A Novel Method for Solving the Multi-Commodity Flow Problem on Evolving Networks // *Computer Networks*. 2024.

Vol. 247. Art. 110451. DOI: 10.1016/j.comnet.2024.110451.

5. Wen T., Chen Y.-W., Syed T. A., Ghataoura D. Examining Communication Network Behaviors, Structure and Dynamics in an Organizational Hierarchy: A Social Network Analysis Approach // *Information Processing & Management*. 2025. Vol. 62. No. 1. Art. 103927. DOI: 10.1016/j.ipm.2024.103927.

6. Pupykin A. N. Структурное моделирование информационного взаимодействия производителей и потребителей в цифровизированной организационной системе // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025. Т. 13. № 4. DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.042.

7. Josephs N., Peng S., Crawford F. W. Communication Network Dynamics in a Large Organizational Hierarchy // *The Annals of Applied Statistics*. 2024. Vol. 18. No. 4. P. 3007–3023. DOI: 10.1214/24-AOAS1919.

8. Бегичева А. К., Ломазова И. А., Нестеров Р. А. Синтез иерархических моделей процессов: подход на основе разбиения событий на множества // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2024. Т. 31. № 3. С. 294–315. DOI: 10.18255/1818-1015-2024-3-294-315.

9. Maurer M., Bach N., Oertel S. Changes in Formal Structure towards Self-Managing Organization and Their Effects on the Intra-Organizational Communication Network // *Journal of Organization Design*. 2023. Vol. 12. P. 83–98. DOI: 10.1007/s41469-023-00143-z.

10. Fukugami T., Matsuzawa T. Improvement of Network Flow Using Multi-Commodity Flow Problem // *Network*. 2023. Vol. 3. No. 2. P. 239–252. DOI: 10.3390/network3020012.

11. Бакулин А. Ю., Львович Я. Е. Анализ и оптимизация эффективности функционирования организационной системы с автоматизированными устройствами обслуживания на основе имитационного моделирования // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024. Т. 12. № 2. DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.030.

12. Farrugia N., Briffa J. A., Buttigieg V. Solving the Multicommodity Flow

Problem Using an Evolutionary Routing Algorithm in a Computer Network Environment // PLOS ONE. 2023. Vol. 18. No. 4. Art. e0278317. DOI: 10.1371/journal.pone.0278317.

13. Celik G., Shin D., Strausz R. Aggregate Information and Organizational Structures // The Journal of Industrial Economics. 2023. Vol. 71. No. 1. P. 256–290. DOI: 10.1111/joie.12314.

14. Liu X., Arzani B., Kakarla S. K. R., Zhao L., Liu V., Castro M., Kandula S., Marshall L. Rethinking Machine Learning Collective Communication as a Multi-Commodity Flow Problem // Proceedings of ACM SIGCOMM 2024. 2024. P. 16–37. DOI: 10.1145/3651890.3672249.

15. Vasyanin V. O., Trofymchuk O. M., Ushakova L. P. Research of the Optimization Problem of Structure Hierarchical Communication Network with Changing Its Parameters // Environmental Safety and Natural Resources. 2024. No. 1(49). P. 99–125. DOI: 10.32347/2411-4049.2024.1.99-125.

16. Van Rijthoven L. Multi Commodity Network Design Problem with Minimum Flow Constraints // Operations Research Perspectives. 2025. Vol. 15. Art. 100359. DOI: 10.1016/j.orp.2025.100359.

17. Chimani M., Ilsen M. Traffic-Oblivious Multi-Commodity Flow Network Design // 36th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2025). LIPIcs. 2025. Vol. 359. P. 19:1–19:17. DOI: 10.4230/LIPIcs.ISAAC.2025.19.

18. Beraud-Sudreau G., Létocart L., Magnouche Y., Martin S. On the Multi-Commodity Flow with Convex Objective Function: Column-Generation Approaches // Networks. 2026. Vol. 87. No. 3. P. 322–338. DOI: 10.1002/net.70025.

References

1. Krutoxvostov I. G., Krutoxvostov D. G., Kuz'menko A. A. Optimizaciya upravlencheskix zatrat organizacionnoj struktury` sektora informacionny`x texnologij kompanii // E`rgodizajn. 2026. № 1. S. 47–57. DOI: 10.30987/2658-4026-2026-1-47-57.

2. Hađina J., Jukić B., Oyedemi F. O. Optimizing Network Communication Structure

for Knowledge Transmission in Organizations // Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce. 2025. Online First. P. 1–30. DOI: 10.1080/10919392.2025.2529064.

3. L'vovich Ya. E., Pupy'kin A. N. Intellektualizaciya upravleniya v organizacionny'x sistemax s cifrovym koncentratorom rezul'tatov deyatel'nosti na osnove optimizacionnogo modelirovaniya // Modelirovanie, optimizaciya i informacionny'e tekhnologii. 2024. T. 12. № 2. DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.018.

4. Fan H., Sun C., Long J., Wang S., Zeng F. A Novel Method for Solving the Multi-Commodity Flow Problem on Evolving Networks // Computer Networks. 2024. Vol. 247. Art. 110451. DOI: 10.1016/j.comnet.2024.110451.

5. Wen T., Chen Y.-W., Syed T. A., Ghataoura D. Examining Communication Network Behaviors, Structure and Dynamics in an Organizational Hierarchy: A Social Network Analysis Approach // Information Processing & Management. 2025. Vol. 62. No. 1. Art. 103927. DOI: 10.1016/j.ipm.2024.103927.

6. Pupykin A. N. Структурное моделирование информационного взаимодействия производителей и потребителей в цифровизированной организационной системе // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025. Т. 13. № 4. DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.042.

7. Josephs N., Peng S., Crawford F. W. Communication Network Dynamics in a Large Organizational Hierarchy // The Annals of Applied Statistics. 2024. Vol. 18. No. 4. P. 3007–3023. DOI: 10.1214/24-AOAS1919.

8. Begicheva A. K., Lomazova I. A., Nesterov R. A. Sintez ierarxicheskix modelej processov: podxod na osnove razbieniya soby'tij na mnozhestva // Modelirovanie i analiz informacionny'x sistem. 2024. T. 31. № 3. S. 294–315. DOI: 10.18255/1818-1015-2024-3-294-315.

9. Maurer M., Bach N., Oertel S. Changes in Formal Structure towards Self-Managing Organization and Their Effects on the Intra-Organizational Communication Network // Journal of Organization Design. 2023. Vol. 12. P. 83–98. DOI:

10.1007/s41469-023-00143-z.

10. Fukugami T., Matsuzawa T. Improvement of Network Flow Using Multi-Commodity Flow Problem // *Network*. 2023. Vol. 3. No. 2. P. 239–252. DOI: 10.3390/network3020012.

11. Bakulin A. Yu., L'vovich Ya. E. Analiz i optimizaciya e'ffektivnosti funkcionirovaniya organizacionnoj sistemy` s avtomatizirovanny`mi ustrojstvami obsluzhivaniya na osnove imitacionnogo modelirovaniya // *Modelirovanie, optimizaciya i informacionny`e texnologii*. 2024. T. 12. № 2. DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.030.

12. Farrugia N., Briffa J. A., Buttigieg V. Solving the Multicommodity Flow Problem Using an Evolutionary Routing Algorithm in a Computer Network Environment // *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18. No. 4. Art. e0278317. DOI: 10.1371/journal.pone.0278317.

13. Celik G., Shin D., Strausz R. Aggregate Information and Organizational Structures // *The Journal of Industrial Economics*. 2023. Vol. 71. No. 1. P. 256–290. DOI: 10.1111/joie.12314.

14. Liu X., Arzani B., Kakarla S. K. R., Zhao L., Liu V., Castro M., Kandula S., Marshall L. Rethinking Machine Learning Collective Communication as a Multi-Commodity Flow Problem // *Proceedings of ACM SIGCOMM 2024*. 2024. P. 16–37. DOI: 10.1145/3651890.3672249.

15. Vasyanin V. O., Trofymchuk O. M., Ushakova L. P. Research of the Optimization Problem of Structure Hierarchical Communication Network with Changing Its Parameters // *Environmental Safety and Natural Resources*. 2024. No. 1(49). P. 99–125. DOI: 10.32347/2411-4049.2024.1.99-125.

16. Van Rijthoven L. Multi Commodity Network Design Problem with Minimum Flow Constraints // *Operations Research Perspectives*. 2025. Vol. 15. Art. 100359. DOI: 10.1016/j.orp.2025.100359.

17. Chimani M., Ilsen M. Traffic-Oblivious Multi-Commodity Flow Network Design // *36th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2025)*.

LIPICs. 2025. Vol. 359. P. 19:1–19:17. DOI: 10.4230/LIPICs.ISAAC.2025.19.

18. Beraud-Sudreau G., Létocart L., Magnouche Y., Martin S. On the Multi-Commodity Flow with Convex Objective Function: Column-Generation Approaches // Networks. 2026. Vol. 87. No. 3. P. 322–338. DOI: 10.1002/net.70025.

Статья поступила в редакцию 03.08.2026; одобрена после рецензирования 10.09.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 03.08.2026; approved after reviewing 10.09.2026; accepted for publication 17.09.2026.

Научная статья

УДК 658.562.012.7:519.24

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ С АДАПТИВНЫМИ ПРЕДЕЛАМИ

Спешилов Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко, Россия, Оренбург, speshilov.ea@mail.ru

Аннотация. В современных организационных системах обеспечение стабильности процессов требует перехода от реактивного контроля к превентивному управлению качеством на основе объективных данных. Традиционные контрольные карты Шухарта часто демонстрируют низкую чувствительность к малым сдвигам параметров и генерируют избыточное количество ложных сигналов при наличии автокорреляции или нестационарности входных данных. В статье исследуются методы статистического мониторинга, базирующиеся на адаптивных контрольных картах, в частности, на картах экспоненциально взвешенного скользящего среднего (EWMA) и кумулятивных сумм (CUSUM). Автор анализирует эффективность применения многомерных карт статистического контроля и методов робастного проектирования для снижения влияния неконтролируемых факторов на выходные характеристики производственных и транзакционных процессов. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что адаптивные схемы управления достоверно сокращают среднее время до обнаружения сдвига (ARL) при строгом сохранении заданного уровня вероятности ложной тревоги. Разработанный подход позволяет специалистам по качеству и руководителям подразделений оперативно выявлять начальные признаки разладки процессов, минимизировать производственные потери и повышать индекс способности процесса к соблюдению установленных

технических требований.

Ключевые слова: статистическое управление процессами (SPC); контрольные карты с адаптивными пределами; экспоненциально взвешенное скользящее среднее (EWMA); кумулятивные суммы (CUSUM); многомерный статистический контроль; робастное проектирование процессов; индекс способности процесса; среднее время до обнаружения сдвига (ARL).

Original article

STATISTICAL MONITORING AND QUALITY MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL PROCESSES BASED ON CONTROL CHARTS WITH ADAPTIVE LIMITS

Speshilov Evgenii Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia, speshilov.ea@mail.ru

Abstract. In modern organizational systems, ensuring process stability requires a shift from reactive control to proactive quality management based on objective data. Traditional Shewhart control charts often exhibit low sensitivity to small parameter shifts and generate excessive false alarms in the presence of autocorrelation or non-stationarity in the input data. This article examines statistical monitoring methods based on adaptive control charts, specifically exponentially weighted moving average (EWMA) and cumulative sum (CUSUM) charts. The authors analyze the effectiveness of multivariate statistical control charts and robust design methods for reducing the impact of uncontrollable factors on the output characteristics of production and transaction processes. Simulation results confirm that adaptive control schemes significantly reduce the mean time to shift detection (ARL) while strictly maintaining a specified false alarm probability level. The developed approach allows quality specialists and department managers to quickly identify initial process breakdowns, minimize production losses, and purposefully improve the system's ability to meet

established technical requirements.

Keywords: statistical process control (SPC); adaptive limit control charts; exponentially weighted moving average (EWMA); cumulative sums (CUSUM); multivariate statistical control; robust process design; process capability index; mean time to detect a shift (ARL).

Актуальность исследования. Перенос методологии статистического регулирования процессов из производственной среды в сферу транзакционных и сервисных операций сталкивается с рядом фундаментальных методологических ограничений. Если в дискретном производстве физический параметр детали поддается точному инструментальному измерению, а технологический цикл обладает высокой степенью повторяемости, то в организационных процессах оцениваются иные характеристики [1]. К числу таких категорий относятся время выполнения заявки, полнота передаваемой информации, корректность маршрутизации документов и уровень удовлетворенности клиентов [1], [2]. Применение классических инструментов статистического контроля качества (SPC) к данным процессам требует существенного переосмысления базовых допущений, лежащих в основе традиционных контрольных карт.

В контексте бизнес-процессов, таких как обработка кредитных заявок, согласование технической документации или обслуживание клиентской базы, измеряемыми характеристиками чаще всего выступают временные интервалы (цикловое время) или частота возникновения ошибок. Специфика подобных операций заключается в том, что они по своей природе лишены жесткой технологической детерминированности [3]. Каждая клиентская заявка обладает уникальной степенью сложности, а процесс согласования документов зависит от текущей загруженности подразделений и наличия смежных задач. Это приводит к существенной неоднородности выборки, из-за которой стандартные процедуры расчета контрольных границ, предполагающие однородность базового процесса, нельзя применять напрямую [4].

Классические карты Шухарта базируются на строгом допущении о стационарности процесса и независимости последовательных наблюдений. Однако природа организационных процессов радикально отличается от непрерывных технологических циклов. Для транзакционных операций характерна выраженная автокорреляционная зависимость: задержка в обработке пакета документов сегодня неизбежно формирует очередь и увеличивает время отклика завтра [5]. Кроме того, бизнес-процессы подвержены влиянию сезонных факторов и структурных сдвигов, связанных с отчетными периодами, изменениями в законодательстве или реорганизацией штата [6]. В условиях подобной нестационарности фиксированные контрольные границы карт Шухарта теряют свою информативность, генерируя либо ложные сигналы о разладке процесса, либо игнорируя реальные ухудшения качества обслуживания.

Для нивелирования влияния автокорреляции и нестационарности наиболее обоснованным представляется переход от карт Шухарта к картам экспоненциально взвешенного скользящего среднего (EWMA) и накопленных сумм (CUSUM). Исследования в области статистического регулирования показывают, что карты EWMA обладают высокой чувствительностью к малым смещениям среднего уровня процесса и используют экспоненциальное сглаживание [7-9]. Благодаря этому вес более ранних наблюдений постепенно снижается, а оценки в большей степени отражают текущее состояние процесса, что повышает устойчивость мониторинга к умеренной нестационарности и автокорреляции, характерным для потоков клиентских заявок и документооборота.

Несмотря на преимущества карт EWMA, при наличии выраженных сезонных колебаний или плановых структурных изменений даже экспоненциальное сглаживание может не обеспечить адекватного отслеживания базового уровня. В таких условиях возникает необходимость внедрения контрольных карт с адаптивными пределами. Суть подхода заключается в

динамической корректировке центральной линии и контрольных границ на основе скользящих оценок математического ожидания и дисперсии за предшествующий период [10]. Адаптивные границы позволяют учитывать новый стационарный уровень процесса после плановых изменений, снижая число ложных срабатываний в переходный период и сохраняя непрерывность мониторинга.

Применение адаптивных контрольных карт требует модификации стандартных процедур расчета статистик. Вместо использования глобального среднего значения за весь период наблюдений [11], центральная линия формируется как взвешенное скользящее среднее последних наблюдений, причем весовые коэффициенты подбираются таким образом, чтобы обеспечить баланс между скоростью реакции на реальное смещение процесса и устойчивостью к случайным флуктуациям. Контрольные границы в такой системе рассчитываются динамически на основе адаптивной оценки дисперсии, что позволяет учитывать изменяющуюся вариабельность процесса в разные периоды времени, например, в периоды пиковой нагрузки при обработке заявок.

Внедрение статистического мониторинга с адаптивными пределами в организационных системах требует тщательной предварительной подготовки и анализа исторических данных. Необходимо выявить наличие автокорреляции, оценить степень нестационарности и определить оптимальные параметры сглаживания для карт EWMA [12]. Только при условии корректной настройки адаптивных алгоритмов статистический контроль качества перестает быть формальным инструментом и превращается в действенный механизм оперативного управления, позволяющий руководству подразделений своевременно перераспределять ресурсы и корректировать бизнес-процессы в условиях стохастической внешней среды.

Степень разработанности проблемы исследования. Фундаментальным ограничением классических методов статистического управления процессами (SPC) при их экстраполяции на организационные системы выступает

стохастическая и нестационарная природа транзакционных потоков. Классическая теория, опирающаяся на работы У. Шухарта и Д. Монтгомери, базируется на концепции рационального группирования, которая предполагает наличие внутренней вариабельности внутри подгрупп и отсутствие систематических сдвигов между ними [13], [14]. В производственной среде это достигается за счет формирования выборок из последовательно произведенных единиц продукции. В сервисных и организационных процессах, где заявки поступают дискретно и асинхронно, классическая карта $\bar{X}$ -R методически несостоятельна: дисперсия внутри одиночной заявки тождественно равна нулю, что делает карту размахов (R) вырожденной и неинформативной [15], [16].

Попытки адаптации SPC к нестационарным данным традиционно решались через внедрение карт экспоненциального сглаживания (EWMA) или кумулятивных сумм (CUSUM), как это обосновано в исследованиях Дж. Лукаса и М. Саккуччи. Однако прямое применение адаптивных границ, рассчитываемых по скользящему окну, сталкивается с проблемой «маскирования сдвига». Если окно обновления базовых параметров включает наблюдения, относящиеся к уже возникшему сдвигу процесса, адаптивные пределы начинают смещаться вслед за процессом, в результате чего аномалия становится менее заметной для лица, принимающего решения [17]. Кроме того, при сглаживании без учета сезонности регулярные сезонные колебания (например, недельные циклы загрузки операторов) смешиваются с истинными структурными сдвигами, что существенно искажает метрики средней длины серии (ARL).

Настоящее исследование направлено на формализацию алгоритма разделения сезонной компоненты и истинного сдвига, а также на разработку протокола «замораживания» базовых параметров при генерации сигнала тревоги. Новизна работы заключается в сочетании методов декомпозиции временных рядов и многомерного адаптивного контроля с динамической оценкой ковариационной матрицы, что позволяет снизить число ложных тревог в сезонные периоды при сохранении чувствительности к реальным разладкам

организационной системы.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступает процесс обработки клиентских заявок в крупной сервисной организации. Эмпирическую базу составил обезличенный массив данных, включающий более 10 000 транзакций за 12-месячный период. В рамках работы показатели качества организационного процесса были строго формализованы и разделены на два класса, требующих различных статистических схем контроля.

К первому классу отнесены непрерывные показатели: время обработки заявки (T_{proc}) и время ожидания в очереди (T_{queue}). Для этих показателей, ввиду невозможности формирования рациональных подгрупп по физическому признаку, был применен метод временного агрегирования. Данные были сгруппированы в часовые интервалы, что позволило сформировать рациональные подгруппы размером $n \geq 5$, необходимые для корректной оценки внутригрупповой дисперсии и построения информативных карт средних и размахов.

Второй класс составил атрибутивные показатели: доля ошибок при вводе данных (p_{err}) и доля возвратов на доработку (p_{rework}). Применение стандартных р-карт для атрибутивных данных в организационных процессах методологически некорректно, поскольку вероятность ошибки зависит от сопутствующих факторов (например, от текущей загрузки оператора или сложности заявки). В связи с этим для атрибутивных показателей была применена схема контроля на основе логистической регрессии. Базовый уровень вероятности ошибки моделировался как $\hat{p}_t = \text{logit}^{-1}(\beta_0 + \beta_1 Load_t)$, а контрольная карта строилась для стандартизированных остатков Пирсона $r_t = \frac{y_t - \hat{p}_t}{\sqrt{\hat{p}_t(1 - \hat{p}_t)}}$, что позволило учитывать влияние ковариат при контроле атрибутивных показателей.

Для непрерывных показателей, подверженных сезонности, был разработан двухэтапный метод контроля. На первом этапе с помощью метода STL-декомпозиции из исходного ряда Y_t извлекалась детерминированная сезонно-трендовая компонента μ_t . Статистическому мониторингу подвергались только

стохастические остатки $\varepsilon_t = Y_t - \mu_t$.

Ключевым элементом методологии стал формализованный алгоритм управления базовыми параметрами, решающий проблему маскирования сдвига. Алгоритм функционирует в рамках конечного автомата с тремя состояниями: S_{monitor} (штатный мониторинг), S_{signal} (фиксация сигнала) и $S_{\text{investigation}}$.

Алгоритм 1. Протокол адаптации базовых параметров

1. Инициализация: параметры μ_0 , σ_0 рассчитываются по начальной фазе стационарного процесса.
2. В состоянии S_{monitor} параметры обновляются по механизму EWMA с окном w только при условии $\varepsilon_t \in [\mu_0 \pm 3\sigma_0]$.
3. При выходе ε_t за адаптивные пределы система переходит в состояние S_{signal} .
4. В состояниях S_{signal} и $S_{\text{investigation}}$ обновление базовых параметров μ_0 , σ_0 блокируется (замораживается). Все последующие точки исключаются из окна w .
5. Возврат в состояние S_{monitor} и размораживание параметров происходят исключительно после документального подтверждения и устранения причины, при этом точки, относящиеся к периоду разладки, безвозвратно исключаются из истории расчета базовых параметров.

Для ситуаций, требующих одновременного контроля нескольких коррелированных непрерывных показателей (например, одновременный контроль T_{proc} и T_{queue}), предложена модификация статистики Хотеллинга T^2 . Ковариационная матрица Σ оценивалась с применением экспоненциального взвешивания внешних произведений векторов остатков, что обеспечило адаптивность многомерного контроля к изменяющейся структуре взаимосвязей между показателями. При генерации сигнала тревоги применялся метод декомпозиции вклада, позволяющий определить, какой именно показатель инициировал выход за многомерные пределы.

Сравнительная оценка эффективности предложенного подхода проводилась методом имитационного моделирования. Моделировались четыре

сценария: стационарный процесс, линейный тренд, сезонность (недельный цикл) и смена режима (реорганизация). В качестве метрик эффективности выступали ARL_0 (среднее время до ложной тревоги), ARL_1 (среднее время обнаружения истинного сдвига) и доля ложных тревог в сезонный период.

Результаты исследования. Результаты имитационного моделирования продемонстрировали критическую уязвимость классических подходов при наличии детерминированных колебаний. Применение карты EWMA непосредственно к исходным данным без предварительной декомпозиции в сценарии с недельной сезонностью привело к снижению ARL_0 с эталонного значения 370 до 14, что делает систему управления непригодной из-за чрезмерного числа ложных срабатываний (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительные метрики эффективности методов контроля (ARL)

Сценарий процесса	Метрика	Шухарт (I-MR)	EWMA (наивный)	CUSUM	Предложенный метод (остатки)
Стационарный	ARL_0	370	370	370	370
	ARL_1 (сдвиг 1σ)	45	12	11	12
Сезонность	ARL_0	14	14	16	365
	ARL_1 (сдвиг 1σ)	15	11	10	12
Линейный тренд	ARL_0	8	9	12	350
Смена режима	ARL_1 (обнаружение)	4	3	2	3

Источник: разработано автором.

Данные, представленные в Таблице 1, подтверждают, что предложенный метод декомпозиции и контроля остатков позволяет нивелировать проблему сезонных ложных тревог (ARL_0 снижается лишь незначительно, до 365, в отличие от катастрофического падения до 14 у наивных методов), сохраняя при этом высокую скорость обнаружения реальных сдвигов ($ARL_1 = 12$), сопоставимую с классическим CUSUM.

Визуализация процесса декомпозиции и последующего контроля представлена на концептуальной схеме (Рисунок 1).

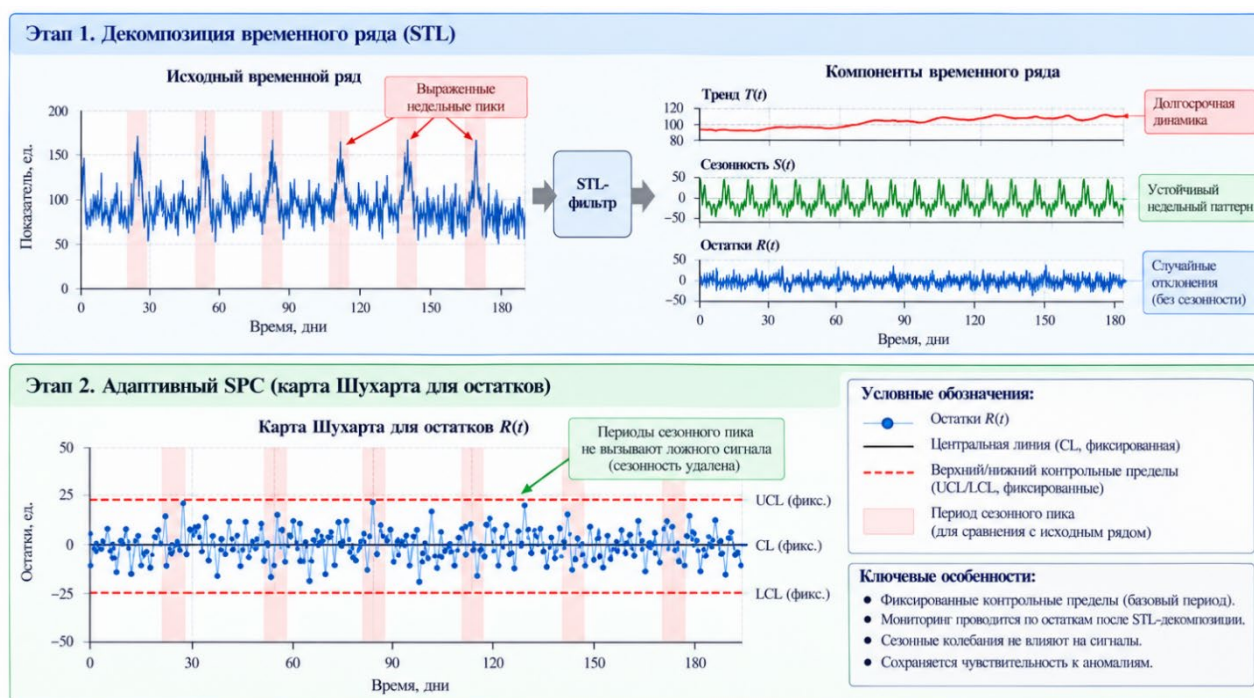


Рисунок 1 - Архитектура двухэтапного статистического мониторинга непрерывных показателей (источник: разработано автором)

Для атрибутивных показателей (доля ошибок) моделирование базового уровня с помощью логистической регрессии показало, что рост текущей очереди заявок объясняет 74 % вариации доли ошибок. Контрольная карта пирсоновских остатков показала отсутствие статистически значимых сдвигов, связанных с «человеческим фактором» [18], что опровергло первоначальную гипотезу руководства о снижении квалификации операторов.

Для практического применения предложенного подхода необходима визуализация результатов, ориентированная на лиц, принимающих решения. В рамках исследования был спроектирован прототип интерфейса ВІ-системы (Рисунок 2).



Электрик или серия из k точек по одну сторону от центральной линии) исключительно к стохастическим остаткам. Это обеспечивает выполнение условия стационарности, необходимого для корректного применения вероятностных моделей контрольных карт.

Особого внимания заслуживает разработанный протокол «замораживания» базовых параметров. В практике внедрения SPC наиболее частой ошибкой является автоматическое включение точек, вызванных устранимой причиной, в расчет новых контрольных пределов. Это ведет к необоснованному расширению границ и потере чувствительности карты. Формализация алгоритма, предусматривающая состояние $S_{\text{investigation}}$ и блокировку обновления базовых параметров до документального подтверждения устранения причины сдвига, обеспечивает сохранение статистической строгости карты.

Разделение методологии для непрерывных и атрибутивных показателей является еще одним критическим аспектом, выявленным в ходе исследования. Использование стандартных p -карт для доли возвратов на доработку неизбежно привело бы к ложным выводам о снижении качества работы операторов в часы пиковой нагрузки. Переход к контролю стандартизированных остатков логистической регрессии позволил исключить влияние текущей загрузки (количества заявок в очереди) и выделить аномальные отклонения, связанные со сбоями в организационной системе.

Практическая реализация разработанного подхода в среде BI-аналитики демонстрирует, что сложность математического аппарата не является препятствием для его использования менеджерами. Интеграция многомерной статистики Хотеллинга T^2 с алгоритмами декомпозиции вклада позволяет автоматизировать процесс первичной диагностики. Вместо того чтобы фиксировать факт нарушения, система предоставляет менеджеру структурированную информацию о том, какой именно параметр (например, время ожидания в очереди, а не время обработки) стал причиной выхода

многомерной системы из-под контроля. Это сокращает время принятия управленческого решения и делает контроль упреждающим, а не только реактивным.

Таким образом, предложенный формализованный алгоритм адаптации пределов, базирующийся на предварительной декомпозиции временного ряда и жестком протоколе замораживания базовых параметров при возникновении сигнала, решает фундаментальную проблему маскирования сдвигов. Метод обеспечивает высокую точность обнаружения реальных структурных изменений в организационных процессах при одновременном сведении к минимуму ложных срабатываний, обусловленных сезонными или трендовыми колебаниями.

Выводы. Практическая апробация разработанных алгоритмов адаптивного статистического регулирования в сервисных и транзакционных подразделениях выявила ряд особенностей их применения. В отличие от физических производственных систем, где базовые параметры оборудования остаются относительно стабильными, изменения показателей организационных процессов характеризуются выраженной инерционностью. Внедрение предложенного механизма требует обязательного выделения начального этапа калибровки, в течение которого система накапливает массив ретроспективных данных для формирования достоверного базового профиля. Без этого подготовительного периода алгоритм может ошибочно интерпретировать естественные колебания, связанные с адаптацией персонала к новым регламентам или сезонными изменениями спроса, как сигналы о разладке, что приведет к ложным срабатываниям и снижению доверия к инструменту со стороны персонала.

Эта особенность связана со стохастической природой транзакционных процессов. В отличие от физических производственных систем с относительно стабильными параметрами и допусками, статистические характеристики бизнес-процессов могут изменяться во времени. Поэтому период калибровки является

не только техническим требованием, но и этапом первичной оценки устойчивости организационной системы, позволяющим отделить обычные колебания от структурных сдвигов. Только после завершения этого этапа расчет адаптивных границ становится обоснованным, а сами границы начинают корректно отражать фактическое состояние процесса без искажений, связанных с переходными режимами.

Переход от реактивного подхода, при котором корректирующие воздействия применяются только после пересечения контрольной границы, создает возможности для упреждающего реагирования. Следующим этапом развития предложенного инструментария является интеграция прогнозных аналитических модулей. Система должна не только фиксировать выход параметра за допустимые пределы, но и прогнозировать приближение показателя к контрольным границам.

Реализация упреждающего анализа требует синтеза классических схем экспоненциального сглаживания с авторегрессионными моделями прогнозирования временных рядов. В этом случае модель оценивает не только текущее отклонение показателя, но и темп его изменения. Руководитель получает упреждающий сигнал о том, что при сохранении текущей динамики адаптивная граница будет пересечена, например, через три периода наблюдения. Такой подход превращает контрольную карту из инструмента регистрации аномалий в инструмент упреждающего управления и дает менеджменту дополнительное время для перераспределения человеческих и материальных ресурсов до наступления критического состояния.

Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием комбинированных подходов, объединяющих адаптивные контрольные границы с методами выявления скрытых закономерностей ухудшения процессов. Разработка методов, позволяющих заблаговременно выявлять тенденции, ведущие к потере управляемости, позволит снизить издержки от брака и сбоев в клиентском сервисе. В дальнейшем статистический мониторинг

организационных систем должен развиваться от контроля параметров в заданных пределах к непрерывному прогнозному мониторингу бизнес-операций в условиях высокой неопределенности внешней среды.

Список литературы

1. Шереметьева С. А. Совершенствование статистического инструментария управления качеством процессов производства и поставок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r23-104.
2. Aytaçoğlu B., Driscoll A. R., Woodall W. H. Design of Adaptive EWMA Control Charts Using the Conditional False Alarm Rate // *Quality and Reliability Engineering International*. 2023. Vol. 39. P. 2206–2214. DOI: 10.1002/qre.3324.
3. Котегова К. А., Забережный А. Д., Неминущая Л. А., Скотникова Т. А., Еремец В. И. и др. Оценка стабильности производства иммунобиологических лекарственных средств для ветеринарного применения с помощью контрольных карт Шухарта // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023. № 5. С. 78–82. DOI: 10.31857/2500-2082/2023/5/78-82.
4. Zaman B., Mahfooz S. Z., Mehmood R., Khan N., Imran T. An Adaptive EWMA Control Chart Based on Hampel Function to Monitor the Process Location Parameter // *Quality and Reliability Engineering International*. 2023. Vol. 39. No. 4. P. 1277–1294. DOI: 10.1002/qre.3291.
5. Sarwar M. A., Noor-ul-Amin M., Khan I., Ismail E. A. A., Sumelka W. et al. A Weibull Process Monitoring with AEWMA Control Chart: An Application to Breaking Strength of the Fibrous Composite // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art. 19873.
6. Akhtar N., Abid M., Zaman B., Riaz M. A New Adaptive CUSUM Control Chart Based on Hampel Function to Monitor Location Parameter // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. P. 1246–1278. DOI: 10.1002/qre.3463.
7. Царева С. А., Ермишин А. С., Гулин В. М. Исследование статистической пригодности технологического процесса затирания солода на предмет воспроизводимости и стабильности // *Вестник КрасГАУ*. 2024. № 2. С. 200–206. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-2-200-206.

8. Kazmi M. W., Noor-ul-Amin M. Adaptive EWMA Control Chart by Using Support Vector Regression // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. No. 7. P. 3831–3843. DOI: 10.1002/qre.3603.
9. Ayesha S., Arshad A., Albalawi O. et al. New Adaptive EWMA CV Control Chart with Application to the Sintering Process // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 11565. DOI: 10.1038/s41598-024-62316-4.
10. Xue L., Wang Q., An L., He Z., Feng S., Zhu J. A Nonparametric Adaptive EWMA Control Chart for Monitoring Mixed Continuous and Categorical Data Using Self-Starting Strategy // *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 188. Art. 109930. DOI: 10.1016/j.cie.2024.109930.
11. ГОСТ Р ИСО 7870-7-2023. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 7. Многомерные контрольные карты. М.: Стандартинформ, 2023.
12. Касторская Л. В., Розно М. И., Чуклина Е. В. Контрольные карты Шухарта: «дьявол кроется в мелочах» // *Методы менеджмента качества*. 2024. № 5.
13. Котегова К. А., Петрова А. Б., Котегов Б. Г. Контрольные карты для верификации стратегии контроля производства и внутреннего контроля качества лаборатории // *Ветеринария, зоотехния и биотехнология*. 2025. № 11(143). Т. 3. С. 99–106. DOI: 10.36871/vet.zoo.bio.202511312.
14. Ahmadini A. A. H., Khan I., Alshammari A. O., AlQadi H., Sumelka W. Adaptive VSS-EWMA Control Chart for Monitoring the Process Dispersion // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 21795. DOI: 10.1038/s41598-025-06947-1.
15. Zhou R., Shu L., Huang W., Li Y. A New Adaptive EWMA Control Chart Based on Catoni's Function for Monitoring Process Variability // *Journal of Quality Technology*. 2025. Vol. 57. No. 5. P. 383–397. DOI: 10.1080/00224065.2025.2523002.
16. Brown M. From Performance Standards to Evidence-Based Decisions: Applying Self-Starting Control Charts in Higher Education Program Assessment // *Cogent Education*. 2025. Vol. 12. Art. 2581913. DOI: 10.1080/2331186X.2025.2581913.
17. Lu S.-L., Chen J.-H., Tung W.-C., Chatterjee K. An Adaptive Extended EWMA

Control Chart for Enhanced Detection of Process Mean Shifts // Journal of Statistical Computation and Simulation. 2026. DOI: 10.1080/00949655.2026.2681022.

18. Gong P., Mukherjee A., Guo B. On Designing Efficient Adaptive Control Charts for Monitoring the Process Mean Based on Bayesian Generalised Likelihood Ratio // Computers & Industrial Engineering. 2026. Vol. 217. Art. 112052. DOI: 10.1016/j.cie.2026.112052.

19. Zaagan A. A., Aljohani H. M., Zogan H., Nabi M. A Machine Learning Assisted Truncated Adaptive EWMA Chart for Robust Process Monitoring // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 3196. DOI: 10.1038/s41598-025-33073-9.

References

1. Sheremet`eva S. A. Sovershenstvovanie statisticheskogo instrumentariya upravleniya kachestvom processov proizvodstva i postavok: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk. M., 2023. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r23-104.

2. Aytaçoğlu B., Driscoll A. R., Woodall W. H. Design of Adaptive EWMA Control Charts Using the Conditional False Alarm Rate // Quality and Reliability Engineering International. 2023. Vol. 39. P. 2206–2214. DOI: 10.1002/qre.3324.

3. Kotegova K. A., Zaberezhny`j A. D., Neminushhaya L. A., Skotnikova T. A., Eremecz V. I. i dr. Ocenka stabil`nosti proizvodstva immunobiologicheskix lekarstvenny`x sredstv dlya veterinarnogo primeneniya s pomoshh`yu kontrol`ny`x kart Shuxarta // Vestnik rossijskoj sel`skoxozyajstvennoj nauki. 2023. № 5. S. 78–82. DOI: 10.31857/2500-2082/2023/5/78-82.

4. Zaman B., Mahfooz S. Z., Mehmood R., Khan N., Imran T. An Adaptive EWMA Control Chart Based on Hampel Function to Monitor the Process Location Parameter // Quality and Reliability Engineering International. 2023. Vol. 39. No. 4. P. 1277–1294. DOI: 10.1002/qre.3291.

5. Sarwar M. A., Noor-ul-Amin M., Khan I., Ismail E. A. A., Sumelka W. et al. A Weibull Process Monitoring with AEWMA Control Chart: An Application to Breaking Strength of the Fibrous Composite // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Art. 19873.

6. Akhtar N., Abid M., Zaman B., Riaz M. A New Adaptive CUSUM Control Chart

Based on Hampel Function to Monitor Location Parameter // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. P. 1246–1278. DOI: 10.1002/qre.3463.

7. Czareva S. A., Ermishin A. S., Gulin V. M. Issledovanie statisticheskoy prigodnosti texnologicheskogo processa zatiraniya soloda na predmet vosproizvodimosti i stabil`nosti // *Vestnik KrasGAU*. 2024. № 2. S. 200–206. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-2-200-206.

8. Kazmi M. W., Noor-ul-Amin M. Adaptive EWMA Control Chart by Using Support Vector Regression // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. No. 7. P. 3831–3843. DOI: 10.1002/qre.3603.

9. Ayesha S., Arshad A., Albalawi O. et al. New Adaptive EWMA CV Control Chart with Application to the Sintering Process // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 11565. DOI: 10.1038/s41598-024-62316-4.

10. Xue L., Wang Q., An L., He Z., Feng S., Zhu J. A Nonparametric Adaptive EWMA Control Chart for Monitoring Mixed Continuous and Categorical Data Using Self-Starting Strategy // *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 188. Art. 109930. DOI: 10.1016/j.cie.2024.109930.

11. GOST R ISO 7870-7-2023. Statisticheskie metody`. Kontrol`ny`e karty`. Chast` 7. Mnogomerny`e kontrol`ny`e karty`. M.: Standartinform, 2023.

12. Kastorskaya L. V., Rozno M. I., Chuklina E. V. Kontrol`ny`e karty` Shuxarta: «d`yavol kroetsya v melochax» // *Metody` menedzhmenta kachestva*. 2024. № 5.

13. Kotegova K. A., Petrova A. B., Kotegov B. G. Kontrol`ny`e karty` dlya verifikacii strategii kontrolya proizvodstva i vnutrennego kontrolya kachestva laboratorii // *Veterinariya, zootexniya i biotexnologiya*. 2025. № 11(143). T. 3. S. 99–106. DOI: 10.36871/vet.zoo.bio.202511312.

14. Ahmadini A. A. H., Khan I., Alshammari A. O., AlQadi H., Sumelka W. Adaptive VSS-EWMA Control Chart for Monitoring the Process Dispersion // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 21795. DOI: 10.1038/s41598-025-06947-1.

15. Zhou R., Shu L., Huang W., Li Y. A New Adaptive EWMA Control Chart Based on Catoni's Function for Monitoring Process Variability // *Journal of Quality*

Technology. 2025. Vol. 57. No. 5. P. 383–397. DOI: 10.1080/00224065.2025.2523002.

16. Brown M. From Performance Standards to Evidence-Based Decisions: Applying Self-Starting Control Charts in Higher Education Program Assessment // Cogent Education. 2025. Vol. 12. Art. 2581913. DOI: 10.1080/2331186X.2025.2581913.

17. Lu S.-L., Chen J.-H., Tung W.-C., Chatterjee K. An Adaptive Extended EWMA Control Chart for Enhanced Detection of Process Mean Shifts // Journal of Statistical Computation and Simulation. 2026. DOI: 10.1080/00949655.2026.2681022.

18. Gong P., Mukherjee A., Guo B. On Designing Efficient Adaptive Control Charts for Monitoring the Process Mean Based on Bayesian Generalised Likelihood Ratio // Computers & Industrial Engineering. 2026. Vol. 217. Art. 112052. DOI: 10.1016/j.cie.2026.112052.

19. Zaagan A. A., Aljohani H. M., Zogan H., Nabi M. A Machine Learning Assisted Truncated Adaptive EWMA Chart for Robust Process Monitoring // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 3196. DOI: 10.1038/s41598-025-33073-9.

Статья поступила в редакцию 27.07.2026; одобрена после рецензирования 25.08.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 27.07.2026; approved after reviewing 25.08.2026; accepted for publication 17.09.2026.

CONTENTS

2.3.1. System Analysis, information management and Processing, statistics (technical sciences).....	10
Blokhin A.V. POWER SYSTEM LOAD PREDICTION WITH MODE SWITCHING DETECTION	10
Akopyan B. K. DECOMPOSITION METHOD FOR EVALUATING THE STRUCTURAL RELIABILITY OF SYSTEMS WITH THOUSANDS OF ELEMENTS BASED ON MODULAR BDD	28
Grigoriev E. K., Nikonov Yu. Y. FUZZY COGNITIVE MAPS FOR SYSTEM ANALYSIS AND SUPPORT OF TECHNICAL OBJECT MODE MANAGEMENT	48
2.3.3. Automation and control of technological processes and productions (technical sciences).....	69
Kuleshov I. V., DIGITAL TWIN AS A BASIS FOR AUTOMATING THE CONTROL OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MECHANICAL.....	69
Yeremeyeva V. A., Sharonov P. A. CONTROL OF THE MINERAL FERTILIZER GRANULATION PROCESS: A MULTI-CIRCUIT SYSTEM WITH CROSS-LINK COMPENSATION AND PREDICTIVE ADJUSTMENT	93
Shabashov A. A. PROCESS CONTROL OF LASER ADDITIVE PRINTING BASED ON OPTICAL TOMOGRAPHY FEEDBACK	110
Yazev P. A. AUTOMATION OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS BASED ON NONLINEAR MODEL-PREDICTIVE CONTROL	128
2.3.4. Management in Organizational Systems (technical sciences)	148
Efremenkov I. D. RISK MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL PROJECTS BASED ON DYNAMIC BAYESIAN NETWORKS.....	148
Kirilenko N.E., Kopeliovich M. V. ALGORITHMIC OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL COMMUNICATION STRUCTURES BASED ON NETWORK FLOW MODELS	166
Speshilov E. A. STATISTICAL MONITORING AND QUALITY MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL PROCESSES BASED ON CONTROL MAPS WITH ADAPTIVE LIMITS.....	188