

# ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ



УПРАВЛЕНИЕ И ВЫСОКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ

2026  
№1 (73)



ISSN 2074-1707

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. Н. ТАТИЩЕВА

# **ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2026**

**№ 1 (73)**

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК России для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям.

**Группа специальностей 1.2 «Компьютерные науки и информатика»:**

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

**Группа специальностей 2.2 «Электроника, фотоника, приборостроение и связь»:**

2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки);

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки);

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

**Группа специальностей 2.3 «Информационные технологии и телекоммуникации»:**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);

2.3.4 – Управление в организационных системах (технические науки);

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

2.3.6 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

Журнал входит в базу данных Ulrich's Periodicals Directory.

Астрахань

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева

2026

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом  
Астраханского государственного университета имени В. Н. Татищева

**ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:  
управление и высокие технологии**  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2026  
№ 1 (73)**

**Редакционная коллегия**

*А.М. Лихтер*, доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры физики, профессор кафедры информационных технологий, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Рациональное использование природных ресурсов» Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева (**главный редактор**)

*И.В. Аникин*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы информационной безопасности» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ

*А.А. Большаков*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и управления» Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

*Л.А. Демидова*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительной и прикладной математики» Рязанского государственного радиотехнического университета

*А.С. Катасёв*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем информационной безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ

*И.Ю. Квятковская*, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

*А.Г. Кравец*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» Волгоградского государственного технического университета

*В.Ю. Кузнецова*, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева

*Ю.В. Литовка*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета

*А.А. Лобатый*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального исследовательского технического университета (Республика Беларусь, г. Минск)

*Е.В. Никольцев*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и моделирование систем» Московского технологического университета (МИРЭА)

*В.О. Осипян*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии» Кубанского государственного университета (г. Краснодар)

*И.Ю. Петрова*, доктор технических наук, профессор, первый проректор Астраханского государственного архитектурно-строительного университета, заведующая кафедрой САПР Астраханского государственного архитектурно-строительного университета

*А.В. Рыбаков*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технологии материалов и промышленной инженерии Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева

*А.В. Скрипаль*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Медицинская физика» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

*И.Б. Старченко*, доктор технических наук, профессор, ООО «Параметрика», научный руководитель (г. Таганрог Ростовской области)

*Т.Л. Тен*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Карагандинского экономического университета (Республика Казанстан, г. Караганда)

*Е.Н. Тищенко*, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и защита информации» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ) – г. Ростов-на-Дону

*С.А. Флистр*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Биомедицинская инженерия» Юго-Западного государственного университета (г. Курск)

*Л.Р. Фионова*, доктор технических наук, профессор, декан факультета Вычислительной техники, заведующая кафедрой «Информационное обеспечение управления и производства» Пензенского государственного университета

*В.А. Цимбал*, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» (Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого МО в г. Серпухов Московской области)

*Н.К. Юрков*, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета

*N.A. Kolesova*, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

*Serg Miranda*, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science, University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS dept. and MBDS innovation lab ([www.mbd-fr.org](http://www.mbd-fr.org))

Журнал выходит 4 раза в год  
Все материалы, поступающие в редколлегию журнала,  
проходят независимое рецензирование

© Астраханский государственный университет,  
имени В.Н. Татищева, 2026  
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2026

ASTRAKHAN TATISHCHEV STATE UNIVERSITY

**PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:  
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii**

**CASPIAN JOURNAL:  
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2026  
No. 1 (73)**

The journal is included in the list of the reviewed scientific journals recommended by VAK of Russia for the publication of the main scientific results of theses for the candidate of science degree, for the doctor of science degree on the following scientific specialties.

**Group of specialties 1.2 “Computer science and informatics”:**

1.2.2 – Mathematical modelling, numerical methods and complexes of programmes (technical sciences).

**Group of specialties 2.2 “Electronics, photonics, instrument engineering and communication”:**

2.2.4 – Instruments and methods of measurement (by type of measurement) (technical sciences);

2.2.11 – Information-measuring and control systems (technical sciences);

2.2.12 – Medical devices, systems and products (technical sciences).

**Group of specialties 2.3 “Information technologies and telecommunications”:**

2.3.1 – System analysis, information control and processing (technical sciences);

2.3.4 – Management in organizational systems (technical sciences);

2.3.5 – Mathematical software and software for computing systems, complexes and computer networks (technical sciences);

2.3.6 – Information security methods and systems, information security (technical sciences).

The journal is included into the database Ulrich’s Periodicals Directory.

Astrakhan  
Astrakhan Tatishchev State University  
2026

Recommended by the Editorial and Publishing Board  
of Astrakhan Tatishchev State University

**CASPIAN JOURNAL:  
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2026**

**No. 1 (73)**

**Editorial Board**

*A.M. Likhter*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Consulting Professor of the Department of Physics, Professor of the Department of Information Technology, Leading Researcher of the Scientific and Educational Center "Rational Use of Natural Resources", Astrakhan Tatishchev State University (**Editor-in-Chief**)

*I.V. Anikin*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Security System Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

*A.A. Bolshakov*, Doct. Sci. (Engineering), Professor of «Systems of Automated Design Engineering and Control» department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

*L.A. Demidova*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computational and Applied Mathematics Department, Ryazan State Radio Engineering University

*A.S. Katasev*, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Information Security Systems, Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev – KAI

*I.Yu. Kvyatkovskaya*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of "Information Technologies and Communications" Institute of the Astrakhan State Technical University

*A.G. Kravets*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Automated Design Engineering Systems and Search Constructing Department, Volgograd State Technical University

*V.Yu. Kuznetsova*, Cand. Sci. (Engineering), Senior Lecturer of Information Security Department, Astrakhan Tatishchev State University

*Yu.V. Litovka*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Automated Support System for Decision-Making, Tambov State Technical University

*A.A. Lobaty*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Systems and Technologies Department, Belarusian National Technical University (Belarus, Minsk)

*E.V. Nikulchev*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the System Management and Modeling Department, Moscow Technological University

*V.O. Osipyan*, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Kuban State University (Krasnodar)

*I.Yu. Petrova*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, First Vice-Rector of the Astrakhan State Architectural and Construction University, Head of the CAD department of Astrakhan State Architectural and Construction University

*A.V. Rybakov*, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Materials Technology and Industrial Engineering Astrakhan Tatishchev State University

*A.V. Skripal*, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Medical Physics Department of the Saratov national research State University named after N.G. Chernyshevsky

*I.B. Starchenko*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, OOO «Parametrica» (Taganrog, Rostov Oblast), Research Supervisor

*T.L. Ten*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Karaganda Economic University (Republic of Kazakhstan, Karaganda)

*E.N. Tishchenko*, Doct. Sci. (Economics), Professor, Head of the Information Technologies & Information Security Department, Rostov State University of Economics (Rostov-on-Don)

*S.A. Filist*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of Biomedical Engineering Department, Southwest State University (Kursk)

*L.R. Fionova*, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Computer Technology Faculty, Head of the Department «Information Support of Management and Production, Penza State University

*V.A. Tsimbal*, Doct. Sci. (Engineering), Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Professor of the Automated Control Systems Department (Branch of the Military Academy of the Russian Strategic Missile Forces named after Peter the Great of the Moscow Oblast, Serpukhov, Moscow Oblast)

*N.K. Yurkov*, Honored worker of science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the department «Designing and production of the radio equipment», Penza State University

*N.A. Kolesova*, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

*Serg Miranda*, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science dept., University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS department and MBDS innovation lab ([www.mbds-fr.org](http://www.mbds-fr.org))

The journal is published four times a year  
All materials that come to the Editorial Board of the journal  
are subject to independent peer-review

© Astrakhan Tatishchev State University, 2026  
© S. Yu. Gayfitdinova, cover design, 2026

# СОДЕРЖАНИЕ

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

**Н. Н. Анашкин**

Программа подбора материалов лент конвейерных систем..... 9–17

**Д. В. Старов, В. А. Корякова**

Программно-аппаратный комплекс для автоматизированного контроля  
промышленной безопасности в опасных зонах  
с применением компьютерного зрения ..... 18–31

**И. П. Бурукина, Е. С. Егоров, М. Д. Колос**

Опыт разработки и внедрения локального мобильного приложения  
для повышения эффективности контроля посещаемости учебных занятий ..... 32–39

### **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

**Д. И. Новохрестова, Е. Ю. Костюченко, С. Д. Томилина,  
Е. А. Красавина, Е. Л. Чойнзонов**

Технология комплексного оценивания речи при реабилитации ..... 40–47

**М. А. Кузнецов, А. Н. Земцов, Р. С. Ткаченко,  
К. А. Майданников, Д. С. Пшеничный**

Сравнительный анализ моделей прогнозирования урожайности  
на основе спутниковых снимков ..... 48–56

**Н. А. Косюра, В. Д. Елисеева, А. Э. Шкарупа**

Сравнительная оценка методов автоматического извлечения  
основного текстового контента веб-страниц ..... 57–66

**И. А. Данилов, Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин,  
В. Д. Срыбный, Е. А. Иванова**

Оценка энергообеспеченности маршрутов электробусов  
с учетом особенностей маршрута и индивидуальных  
эксплуатационных характеристик электробусов ..... 67–78

**И. Б. Парашук, Д. Э. Сабиров**

Показатели качества реализации процедур  
интеллектуального анализа информационных массивов  
в облачных хранилищах и центрах обработки данных ..... 79–86

### **УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

**В. С. Михеев, М. В. Шермадини**

Управление информационными потоками в организационных  
системах: интегрированная модель и показатели эффективности ..... 87–97

### **МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**А. А. Никифоров, Е. К. Порваткин, М. А. Шаронов, А. А. Львов**

Создание цифровых двойников переходных процессов, возникающих в электросетях,  
для изучения качества электроснабжения ..... 98–109

**А. И. Иванов, Ю. И. Серикова, А. П. Иванов**

Уязвимость симметрии двух проколов энтропии  
нейросетевой биометрии, построенной на бинарных нейронах  
или нейронах с многоуровневыми квантователями ..... 110–118

**М. Н. Юсупов, В. Ю. Кузнецова**

Системный анализ категорий задач и профессиональных компетенций участников в соревнованиях Capture The Flag (CTF) по информационной безопасности..... 119–128

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

**С. А. Андронов**

Оценка степени противодействия при распространении недостоверной информации ..... 129–140

**М. Р. Курбанназаров, Ю. В. Литовка**

Разработка интеллектуальной системы проектирования гальванического процесса кадмирования с нанодобавками ..... 141–148

**Е. С. Бабаскин, М. О. Таныгин, Е. А. Кулешова, А. В. Киселев**

Оценка влияния анонимности узлов на характеристики передачи сообщений в реконфигурируемых сетях..... 149–158

**Д. С. Пономарев, В. Г. Исаков**

Синергетический эффект гибридных нейросетей (на примере *AE-LSTM*) в задаче интеллектуального управления процессом подготовки питьевой воды..... 159–168

**Д. А. Винокурский, Н. В. Кононова, Е. В. Крахоткина, Н. И. Шляхова**

Оценка кинематических параметров квадрокоптера с отказами адаптивного наблюдателя ..... 169–176

**П. Ф. Чернавин**

Анализ данных на основе выпуклых оболочек..... 177–185

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ  
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

**В. Ю. Кузнецова**

Разработка автоматизированной системы контроля полива сельскохозяйственных культур на основе метода расчета эвапотранспирации ..... 186–192

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ** ..... 193

# CONTENTS

## **INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL**

### **MATHEMATICAL SOFTWARE AND SOFTWARE FOR COMPUTING MACHINES, COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS**

#### **N. N. Anashkin**

The program of selection of materials of belts of conveyor systems ..... 9–17

#### **D. V. Starov, V. A. Koryakova**

A hardware and software system for automated industrial safety  
monitoring in hazardous areas using computer vision ..... 18–31

#### **I. P. Burukina, E. S. Egorov, M. D. Kolos**

Experience in developing and implementing a local mobile application  
to improve the effectiveness of classroom attendance monitoring..... 32–39

### **SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING**

#### **D. I. Novokhrestova, E. Yu. Kostyuchenko, S. D. Tomilina, E. A. Krasavina, E. L. Choynzonov**

Technology for comprehensive speech assessment in rehabilitation ..... 40–47

#### **M. A. Kuznetsov, A. N. Zemtsov, R. S. Tkachenko, K. A. Maidannikov, D. S. Pshenichny**

Comparative analysis of yield forecasting models  
based on satellite images..... 48–56

#### **N. A. Kosyura, V. D. Eliseeva, A. E. Shkarupa**

Comparative evaluation of methods for automatic extraction  
of main textual content from web pages ..... 57–66

#### **I. A. Danilov, N. P. Sadovnikova, D. S. Parygin, V. D. Srybny, E. A. Ivanova**

Evaluation of the energy supply of electric bus routes  
taking into account the route features and individual  
operational characteristics of electric buses ..... 67–78

#### **I. B. Parashchuk, D. E. Sabirov**

Quality indicators for the implementation of procedures  
for intelligent analysis of information arrays  
in cloud storage and data processing centers..... 79–86

### **MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS**

#### **V. S. Mikheev, M. V. Shermadini**

Information flow management in organizational systems:  
an integrated model and performance indicators ..... 87–97

### **METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION PROTECTION, INFORMATION SECURITY**

#### **A. A. Nikiforov, E. K. Porvatkin, M. A. Sharonov, A. A. Lvov**

Creation of digital twins for transient processes arising  
in power grids to study the quality of electric supply ..... 98–109

#### **A. I. Ivanov, Yu. I. Serikova, A. P. Ivanov**

The vulnerability of the symmetry of two entropy punctures  
of neural network biometrics built on binary neurons  
or neurons with multilevel quantizers ..... 110–118

**M. N. Yusupov, V. Yu. Kuznetsova**

System analysis of task categories and professional competencies  
of participants in Capture The Flag (CTF)  
information security competitions ..... 119–128

**MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS  
AND PROGRAM SYSTEMS**

**S. A. Andronov**

Assessing the degree of counteraction  
to the dissemination of false information ..... 129–140

**M. R. Kurbannazarov, Yu. V. Litovka**

The development of an intellectual system  
for galvanic cadmium plating process using nanomaterials ..... 141–148

**E. S. Babaskin, M. O. Tanygin, E. A. Kuleshova, A. V. Kiselev**

Assessing the impact of node anonymity on message  
transmission characteristics in reconfigurable networks ..... 149–158

**D. S. Ponomarev, V. G. Isakov**

Synergistic effect of hybrid neural networks (using *AE-LSTM* as an example)  
in intelligent control of drinking water preparation ..... 159–168

**D. L. Vinokursky, N. V. Kononova, E. V. Krakhotkina, N. I. Shlyakhova**

Assessment of kinematic parameters of a quadrotor  
with failures by an adaptive observer ..... 169–176

**P. F. Chernavin**

Convex hull-based data analysis ..... 177–185

**INSTRUMENT ENGINEERING, MEASUREMENT SCIENCE,  
INFORMATION AND MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

**INFORMATION, MEASURING AND CONTROL SYSTEMS**

**V. Yu. Kuznetsova**

Information system for training  
in countering social engineering attacks ..... 186–192

**RULES FOR THE AUTHORS** ..... 193

# **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

УДК 004.9:621.867.2

### **ПРОГРАММА ПОДБОРА МАТЕРИАЛОВ ЛЕНТ КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМ**

*Анашкин Николай Николаевич*, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Российская Федерация, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, старший преподаватель, ORCID: 0009\_0003\_8032\_811X, e-mail: tocross@yandex.ru

Рассмотрены особенности подбора материалов лент машин непрерывного транспорта с помощью методологии системного анализа на основании характеристик транспортируемых грузов. Проведен анализ основных видов материалов конвейерных лент на основании открытых источников крупнейших поставщиков в РФ вышеуказанных комплекствующих (ООО «ГД СПБелт» <https://pospbelt.ru>, «Компания прогресс» <https://tcpprogress.ru>, ООО «Авангард системс» <https://a-konveer.ru>, ООО «ТПК Белтимпэк» <https://beltimpeks.clients.site>, ООО «ТПК Сигма» <https://sigma-tpk.ru>). Рассмотрены и классифицированы преимущества и недостатки каждого материала в отдельности с учетом сфер применения, режимов эксплуатации транспортного оборудования, иных требований к перемещению грузов в химической и пищевых отраслях. Описаны необходимые исходные данные для определения наиболее ответственного и дорогостоящего элемента ленточных конвейеров в составе конвейерных систем пищевой и химической отраслей промышленности – лент. Представлена комплексная логико-информационная модель, содержащая основные этапы для быстрого и корректного проведения процедуры подбора материала транспортерных лент. Объектом исследования является процесс подбора материалов конвейерных лент на стадиях проектирования и технического обслуживания транспортеров. Предметом – модели и алгоритмы базовых стадий проектирования машин непрерывного транспорта. Целью исследования является разработка и внедрение актуальных методик подбора комплектующих узлов, практическое применение которых позволит сократить сроки проектирования и комплексной замены отработанных элементов при текущем ремонте систем ленточных транспортеров. Результатом работы является разработанный программный модуль на языке программирования Python (высокоуровневом интерпретируемом языке программирования общего назначения), прошедший тестирование при выполнении проектов по разработке конвейерных систем.

**Ключевые слова:** ленточные конвейеры, функциональная модель, системный анализ, автоматизация

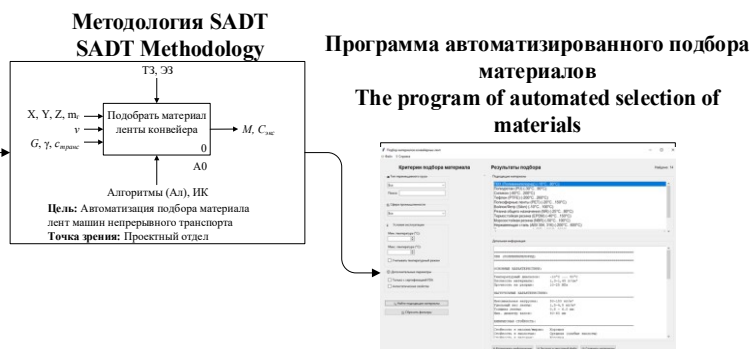
### **THE PROGRAM OF SELECTION OF MATERIALS OF BELTS OF CONVEYOR SYSTEMS**

*Anashkin Nikolay N.*, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Prospekt, Perm, 614990, Russian Federation, Senior Lecturer, ORCID: 0009\_0003\_8032\_811X, e-mail: tocross@yandex.ru

The features of the selection of materials for belts of continuous transport vehicles using the methodology of system analysis based on the characteristics of transported goods are considered. The analysis of the main types of conveyor belt materials was carried out based on open sources from the largest suppliers of the above-mentioned components in the Russian Federation («TD SPBelt LLC» <https://pospbelt.ru>, «Progress Company» <https://tcpprogress.ru>, «Avangard Systems LLC» <https://a-konveer.ru>, «LLC TPK Beltimpex» <https://beltimpeks.clients.site>, «LLC TPK Sigma» <https://sigma-tpk.ru>). The advantages and disadvantages of each material are considered and classified separately, taking into account the fields of application, modes of operation of transport equipment, and other requirements for the movement of goods in the chemical and food industries. The necessary initial data for determining the most important and expensive element of conveyor belts in the conveyor systems of the food and chemical industries, belts, are described. A comprehensive logical and information model is presented, which contains the main steps for the rapid and correct selection of conveyor belt material. The object of the research is the process of selecting conveyor belt materials at the stages of conveyor design and maintenance. The subject is models and algorithms of the basic stages of designing continuous transport vehicles. The purpose of the research is to develop and implement relevant methods for selecting components, the practical application of which will reduce the design time and comprehensive replacement of spent elements during the ongoing repair of belt conveyor systems. The result of the work is a developed software module in the Python programming language (a high-level interpreted general-purpose programming language), which has been tested during conveyor system development projects.

**Keywords:** conveyor belts, functional model, system analysis, automation

## Graphical annotation (Графическая аннотация)

Проблема подбора материалов конвейерных лент  
The problem of selecting conveyor belt materials**ВВЕДЕНИЕ**

Наиболее распространенным и востребованным оборудованием для транспортировки грузов в химической, пищевой и других основных отраслях промышленности остаются ленточные машины непрерывного транспорта [1, 2]. С учетом сложности современных производственных линий и повышения количества параллельно протекающих технологических операций (часто конвейеры должны сочетать в себе свойства оборудования для охлаждения, нагревания, селективного отбора, фасовки, упаковки), одиночные ленточные транспортеры стали использоваться редко.

Ленточные конвейерные системы (КС) расширили возможности безостановочного перемещения грузов/сырья в процессе высокой автоматизации производственных процессов (вплоть до полного исключения участия вспомогательного персонала).

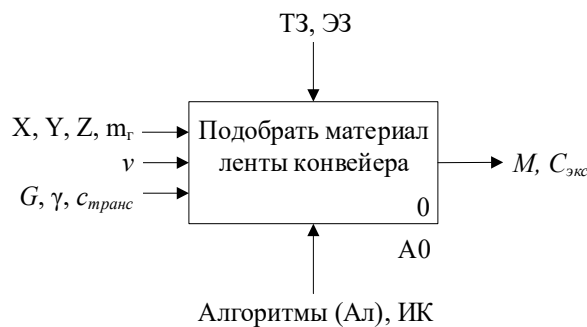
При проектировании КС важно понимать, что преимущества вышеупомянутого оборудования (универсальность [3], высокая степень эксплуатационной надежности [4], эффективность [5]) достигаются только при грамотном подборе материала основного элемента – транспортной ленты. Высокая стоимость ленты (30–50 % от стоимости конвейера) влияет также на обслуживание и ремонт данных машин [6].

Конвейерная лента представляет [7] собой гибкое замкнутое цельное полотно шириной рабочей зоны транспортера, которое непрерывно движется по направлению вращения приводного элемента с заданной скоростью. В зависимости от требований, предъявляемых к перемещению грузов, полотно может быть изготовлено из различных материалов, каждый из которых обладает своими характеристиками [8].

Анализ литературных источников позволил выявить многочисленные работы [9–13], содержащие различные методики расчета конвейерного транспорта. Однако ни один из предлагаемых способов вычислений не учитывает стадию подбора материалов лент – наиболее дорогостоящего компонента (30÷50 % от стоимости транспортера [14]) ленточных машин непрерывного транспорта.

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ**

Механизм осуществления процесса подбора материала лент был формализован в соответствии с методологией SADT [15] и методами функционального моделирования. В результате формализации была разработана функциональная модель (рис. 1), где применены следующие условные обозначения: ТЗ – техническое задание; ЭЗ – экспертные знания; Ал – алгоритм; ИК – инженер-конструктор; X, Y, Z – максимальные размеры транспортируемого груза; m – масса транспортируемого груза; v – вид транспортируемого груза; G – производительность ленточного транспортера; γ – рекомендуемый угол подъема/спуска транспортируемого груза; C<sub>транс</sub> – требования к процессу транспортировки груза; M – материал ленты; C<sub>экс</sub> – режим эксплуатации.



**Цель:** Автоматизация подбора материала лент машин непрерывного транспорта

**Точка зрения:** Проектный отдел

Рисунок 1 – Контекстная диаграмма верхнего уровня функциональной модели

На рисунке 2 показана декомпозиция блока А0 «Подобрать материал ленты конвейера», состоящая из трех основных блоков и связей между ними для получения двух главных характеристик – материала ленты и режима ее эксплуатации.

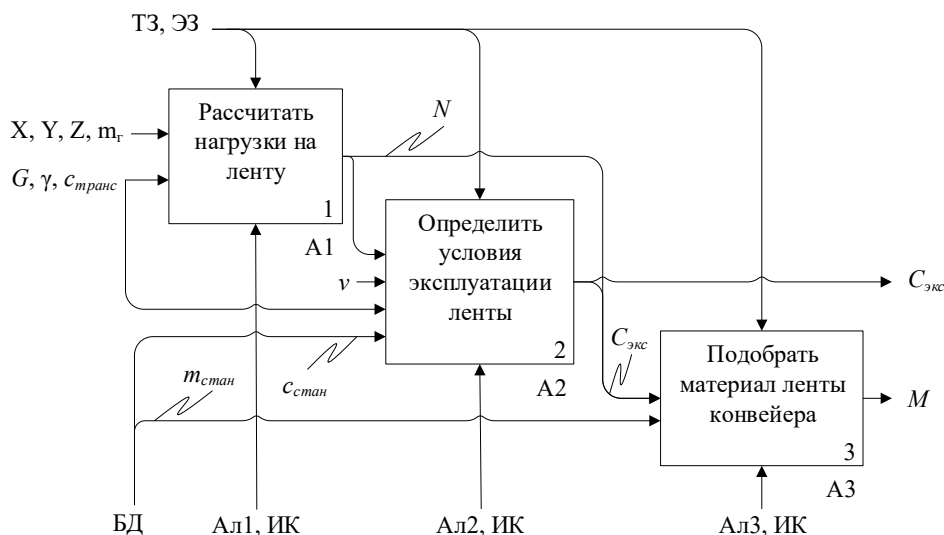


Рисунок 2 – Декомпозиция блока А0 функциональной модели – Подобрать материал ленты конвейера:  $N$  – нагрузки, воспринимаемые лентой в процессе эксплуатации;  $c_{стан}$  – стандартные режимы эксплуатации;  $m_{стан}$  – стандартные материалы лент

Начальной процедурой подбора материала ленты является уточнение действующих на нее нагрузок – данная информация формируется с помощью необходимых исходных данных: размеров и веса, угла подъема/спуска, скорости перемещаемых грузов.

Не менее важным является определение условий транспортировки груза (режима эксплуатации полотна). Частично это формализовано с помощью ГОСТ 20–2018 «Ленты конвейерные резиноканевые. Технические условия». Несмотря на то, что документ посвящен резиноканевым лентам, рекомендации его можно использовать для лент всех материалов по причине отсутствия других аналогичных руководств.

ГОСТ 20–2018 делит условия эксплуатации лент на 4 категории по показателям:

- вид и размер перемещаемой продукции;
- абразивность;
- температура груза;
- высота перемещения и другие параметры.

1. Легкие условия (транспортировка мелких сыпучих грузов с минимальной абразивностью и температурой до 100°). Износ и требования к полотну в таком режиме минимальны.

2. Средние условия (транспортировка кусковых грузов размером 10–15 см с возможной высокой абразивностью температурой до 150–200° и средними ударными нагрузками). Могут использоваться ленты, предназначенные для легких условий, однако продолжительность эксплуатации будет в 3–4 раза короче.

3. Тяжелые (большой вес, высокая степень абразивности и крупный размер перемещаемых кусковых материалов – до 50 см). Чаще помимо истирания или растягиваний лент при таком режиме работы можно наблюдать разрывы и пробитие лент, вызванные острой грузой и высокими ударными нагрузками.

4. Очень тяжелые условия (транспортировка преимущественно руд чёрных или цветных металлов, крепких горных пород размером до 50 см, брёвен диаметром до 90 см).

Для составления перечня наиболее востребованных и часто используемых материалов при изготовлении полотна конвейерных лент необходимо обратиться к открытым источникам крупнейших поставщиков конвейерных лент в РФ [16–20]. Анализ полученной информации позволил выявить наиболее важные требования к поставляемой продукции:

- прочность и износостойкость (ленты должны обладать высокой прочностью на разрыв и устойчивостью к механическим повреждениям, таким как истирание, порезы и разрывы, значит, материал должен выдерживать длительную эксплуатацию в условиях интенсивных нагрузок и не терять своих характеристик со временем);

- устойчивость к химическим воздействиям (в зависимости от условий эксплуатации, лента может подвергаться воздействию различных химических веществ, таких как масла, кислоты, щелочи и растворители, значит, материал должен быть устойчивым к этим веществам и не разрушаться под их воздействием);

- термостойкость (в некоторых производствах конвейерные ленты работают при высоких или низких температурах, значит, материал должен сохранять свои характеристики в широком диапазоне температур и не терять эластичности при низких температурах и не плавиться при высоких);

- эластичность и гибкость (лента должна быть достаточно эластичной, чтобы выдерживать изгибы и перегибы на роликах и барабанах конвейера);

- гигиеничность (в пищевой промышленности конвейерные ленты должны быть изготовлены из материалов, пригодных для контакта с пищевыми продуктами и легко поддающихся санитарной обработке, значит, материал должен быть нетоксичным и не вступать в реакцию с пищевыми продуктами).

Также полученная информация позволила составить базу данных табличной формы (рис. 3) в программной среде SQLite, классифицировав каждый материал по сферам использования [21] и условиям эксплуатации.

Материал	Темп. °С	Химстойкость	FDA	Цена	Применение
ПВХ	-10...+80	Средняя	Да	€	Лёгкие продукты
Полиуретан	-30...+90	Хорошая	Да	€€€	Мясо, рыба
Силикон	-60...+200	Отличная	Да	€€€€	Выпечка
Тефлон	-200...+260	Отличная	Да	€€€€€	Экстрим
Полиэфир	-20...+150	Хорошая	Да*	€€	Тяжёлые грузы
Войлок	-10...+100	Низкая	Нет	€	Хрупкие изделия
Резина NR	-25...+80	Низкая	Нет	€	Общепром
Резина EPDM	-40...+150	Хорошая	Да	€€	Горячие продукты
Резина NBR	-50...+100	Хорошая	Да	€€	Заморозка
Металл	-200...+600	Отличная	Да	€€€€€	Экстрим
PE модуль	-30...+80	Хорошая	Да	€€	Универсал
PP модуль	-10...+100	Отличная	Да	€€	Горячее
POM модуль	-40...+90	Хорошая	Да	€€€	Тяжёлые грузы
PA модуль	-40...+110	Средняя	Да	€€€	Макс. нагрузка

Рисунок 3 – База данных материалов (краткая) конвейерных лент

Список материалов, используемых при производстве современных лент для КС, в общей сложности исчисляется десятками видов, но самыми популярными являются:

1. Поливинилхлорид (PVC) – наиболее универсальный материал, использующийся в различных отраслях. Ленты из него имеют многослойную структуру, основу которой также составляет цельнотканый каркас, пропитанный ПВХ. Пропитка существенно упрочняет конструкцию, снижает продольное растяжение и улучшает сцепление с обкладками, предотвращая расслоение ленты даже при больших нагрузках.

Преимущества: низкая стоимость, устойчивость к влаге, легкость в обслуживании.

Недостатки: низкая прочность, потеря свойств при температурах от 90 градусов.

2. Полиуретан (PU) – практическая альтернатива PVC, которая превосходит его по прочности на разрыв, устойчивости к истиранию, гибкости и эластичности (даже при низких температурах), устойчивости к многократным изгибам лент.

Преимущества: не теряет свойств при температуре до –60 градусов, не расслаивается на бортах даже при повреждениях.

Недостатки: высокая цена.

3. Силикон (Silicon) – материал был разработан для пищевого производства и позволяет продукции проходить различные технологические тоннели, связанные с нагревом или охлаждением.

Преимущества: не разрушается от периодического сжатия, пожаробезопасен, устойчив к продолжительной работе на большой скорости и при широком рабочем диапазоне температур (от –60 до +250 °С).

Недостатки: недостаточная твердость, повышенная мягкость материала (причина низкой сопротивляемости изделия к поперечным разрывам).

4. Синтетический фетр и хлопок – материал, обладающий масло- и жиростойкостью, плохо впитывает жидкость, предотвращает прилипание продукции к ленте.

Преимущества: высокая плотность, устойчивость к низкой температуре, работа в высокотемпературных условиях (сочетание хлопковой поверхности и термопластичного ПВХ).

Недостатки: высокая цена.

5. Полиэстер – синтетический материал, обладающий прочностью, устойчивостью к агрессивным веществам и механическому истиранию.

Преимущества: высокая прочность, минимальное изменение длины, возможность эксплуатации в условиях постоянной влажности (на поверхности, в основании материала не будет плесени и гнили).

Недостатки: низкая устойчивость к температурам (лента хуже переносит перепады температур и сильнее растягивается при нагревании), высокая цена.

6. Полипропилен (PP) – синтетический термопласт, идеален для средних и легких производственных процессов.

Преимущества: легкость, химическая стойкость (не вступает в реакцию с большинством используемых агрессивных материалов), экологичность (легко поддается переработке).

Недостатки: теряет свои свойства при высоких температурах, быстрее изнашивается при постоянном контакте с грубыми материалами.

7. Нейлон – материал, обладающий высокими прочностными характеристиками, которые позволяют использовать его для тяжелых промышленных условий.

Преимущества: высокая прочность на растяжение (нейлоновые ленты лучше других выдерживают большие нагрузки), устойчивость к износу (влияет на срок эксплуатации), низкие коэффициенты трения (снижает износ других компонентов системы).

Недостатки: высокая стоимость, чувствительность к влажной среде.

8. Резинотканые – цельнорезиновых лент практически не бывает по причине быстрого растяжения при нагрузках. Это ведет к проскальзыванию на роликах и приводных валах. Рабочая и ходовая поверхность производятся из резины – смесей на основе синтетических каучуков. По типу каркаса такие ленты делятся на 2 категории:

– резинотканевые (каркас выполнен из натуральной или синтетической прочной ткани);

– резинотросовые (каркас изготавливается на основе стальных тросов).

В зависимости от вида транспортируемого груза выделяют 7 групп полотна, изготавливаемого на основе резины:

– общего назначения. Для стандартных условий эксплуатации: при оптимальной внешней температуре и среднем уровне нагрузки;

– теплостойкие (Т1, Т2, Т3). Способны выдерживать температуру от +100 до +200 °С, могут использоваться для перемещения горячих грузов;

– морозостойкие (М). Могут эксплуатироваться при внешней температуре до –60 °С;

- маслобензостойкие (МС). Выдерживают воздействие масел и топливных жидкостей без потери свойств;
- шахтные (Ш, ШТС). Надёжно защищены от возгорания, обладают способностью к самозатуханию;
- пищевые (П). Безопасны для пищевой продукции, даже при прямом контакте не вступают с ней в химическую реакцию;
- шевронные. Работают при подъеме или наклоне до 45 градусов, за счет специального шеврона груз удерживается на месте.

Преимущества: долговечность (материал обладает высоким уровнем износостойкости) и гибкость (легко адаптируется к различным формам и размерам, что делает ее идеальным материалом для конвейеров с нестандартной формой).

Недостатки: высокая стоимость (дороже по сравнению с другими материалами) и температурные ограничения в эксплуатации.

9. Металл – наиболее прочный и долговечный материал с областью применения в тяжелых условиях.

Преимущества: позволяет транспортировать липкие и горячие грузы без вреда для конструкции.

Недостатки: высокая стоимость, большой вес (что может усложнять установку и транспортировку).

10. Тефлон – синтетический довольно тонкий и устойчивый к разрывам материал на основе полимера – тетрафторэтилена.

Преимущества: не горит, чрезвычайно низкая адгезия (самый «скользкий» материал), высочайшая химическая стойкость (допускается прямой контакт не только с водой, но и кислотами и щелочами, различными растворителями, маслами и жирами), диэлектрические и антипригарные свойства.

Недостатки: высокая стоимость.

#### **ПРОГРАММА ПОДБОРА МАТЕРИАЛОВ**

Грамотный подбор вышеуказанных материалов является важным и ответственным аспектом, обеспечивающим в первую очередь бесперебойное и эффективное функционирование транспортных систем, а также протекание остальных базовых стадий жизненного цикла машин непрерывного транспорта. По данной причине был разработан программный модуль (рис. 4), позволяющий упростить процесс принятия решений на стадиях проектирования, снабжения и ремонта КС. Подбор материала лент КС, производимый с помощью вышеуказанного модуля, обладает рядом преимуществ:

- база данных, на основании которой производится отбор материалов содержит, не только актуальную информацию от поставщиков комплектующих КС, но и перечень условий и режимов эксплуатации уже проверенных в выполненных инженерных проектах (часто менеджеры изменяют характеристики продаваемых лент в большую сторону, используя маркетинговые ходы для увеличения продаж);

- независимость от знаний предметной области (при расчёте вручную большой объём данных, которые необходимо учитывать, требует наличия профильных специалистов с опытом подбора материалов);

- использование специализированного программного обеспечения сокращает время на проектирование независимо от количества текущих проектов [22].

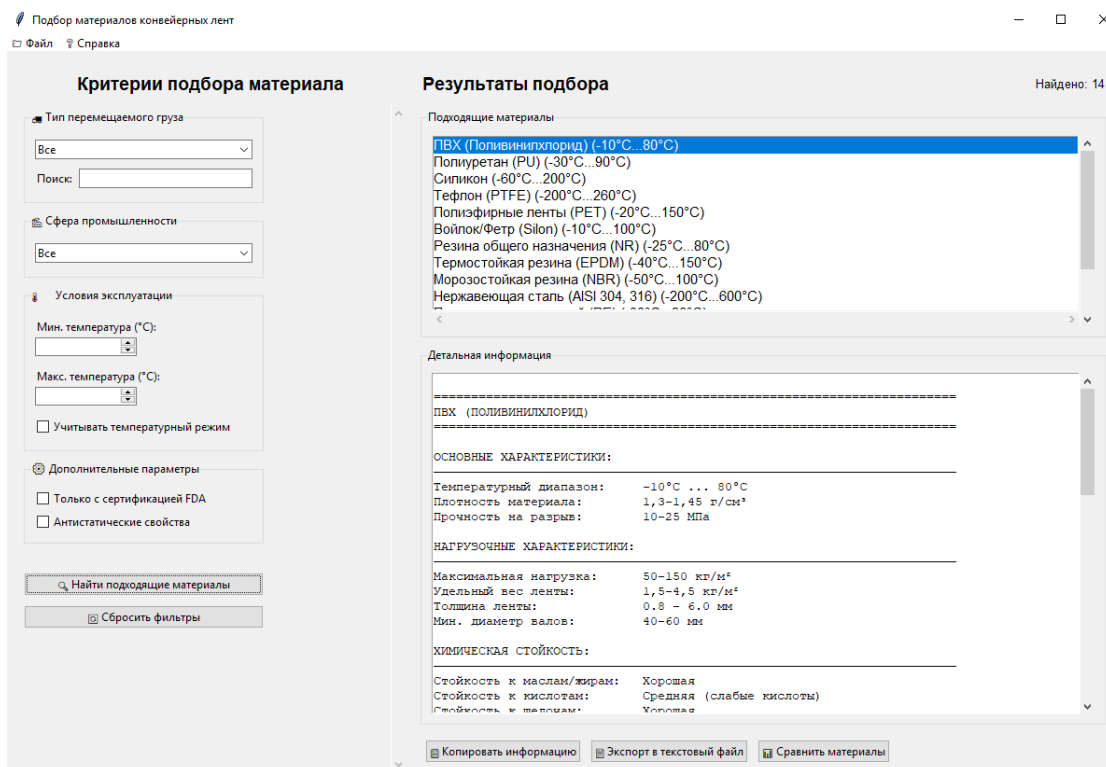


Рисунок 4 – Разработанная программа подбора материалов конвейерных лент на языке программирования Python

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конвейерные ленты – это не просто элемент оборудования, а важная часть современной промышленности. Благодаря внедрению инновационных материалов и технологий их возможности постоянно расширяются.

Ошибки при выборе материалов полотна становятся поводом внештатных остановок производственных линий, ускоренного износа компонентов и просто малоэффективной эксплуатации оборудования.

По вышеуказанным причинам процесс определения материалов (где необходимо принимать во внимание целый ряд критериев, включая характеристики транспортируемых материалов, особенности условий эксплуатации, требования к производительности системы и прочие значимые факторы) необходимо автоматизировать с помощью современных методов и интеллектуальных систем.

Научная новизна настоящей работы заключается в разработанных моделях и алгоритмах, предлагающих новое решение актуальной проблемы – автоматизацию процесса подбора материалов полотна ленточных транспортеров, как неотъемлемой части проектной и ремонтной стадий жизненного цикла конвейерных систем.

В ходе выполнения данного исследования были получены следующие результаты:

- проведён анализ современных материалов конвейерных лент, выделены и описаны основные преимущества и недостатки;
- разработана ФМ, описывающая порядок проведения процесса выбора материалов полотна и необходимые для этого исходные данные;
- разработана база данных табличного типа, содержащая классификацию материалов по ключевым параметрам;
- разработан программный модуль на языке программирования Python, прошедший тестирование при выполнении проектов по разработке конвейерных систем в компании ООО ТПК Сигма (г. Пермь).

Использование вышеуказанного модуля подбора позволяет сократить сроки проведения прежде всего проектного этапа жизненного цикла КС, что повысит конкурентоспособность и эффективность конструирования подобного оборудования в современных условиях в целом.

## Список источников

1. Bajda, M. Energy Efficiency of Conveyor Belts in Raw Materials Industry / M. Bajda, M. Hardygora, D. Marasova // Energies. – 2022. – № 15. <https://doi.org/10.3390/en15093080>.
2. Ananth, K. N. S. Design and selecting the proper conveyor-belt / K. N. S. Ananth, V. Rakesh, P. K. Visweswarao // International Journal of Advanced Engineering Technology. – 2013. – Vol. 4, № 2. – P. 43–49.

3. Zrnić, N. History of belt conveyors until the end of the 19th century / N. Zrnić, M. Đorđević, V. Gašić // *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 210–223. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-98499-1\\_18](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-98499-1_18).
4. Криницин, П. Г. Диагностика конвейерного оборудования с применением нейросетевых алгоритмов / П. Г. Криницин, С. В. Ченцов // *Научный результат. Информационные технологии*. – 2025. – Т. 10, № 2. – С. 84–92. – DOI 10.18413/2518-1092-2025-10-2-0-8.
5. Дмитриева, В. В. Использование современных программно-технических комплексов для автоматизации конвейерных линий / В. В. Дмитриева, И. Ф. Авхадиев, П. Е. Сизин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 2. – С. 150–163. – DOI 10.25018/0236-1493-2021-2-0-150-163.
6. Błażej, R. Profitability of conveyor belt refurbishment and diagnostics in the light of the circular economy and the full and effective use of resources / R. Błażej et al. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, № 20. <https://doi.org/10.3390/en15207632>.
7. Planković, N. Fundamentals of conveyor belts / N. Planković, D. Živanić. – Билград, Сербия, 2022.
8. Marijić, J. Product development of conveyor belts system with a focus on structural features / J. Marijić et al. // *21st Natural Gas, Heat and Water Conference, 14th International Natural Gas, Heat and Water Conference*. – 2023. – P. 181–189.
9. Проектирование и расчет ленточного конвейера : учебно-методическое пособие / С. Ф. Каменских, С. С. Осьмушин, В. В. Каржавин. – Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2020. – 74 с.
10. Киселев, Б. Р. Ленточный конвейер. Расчет и проектирование основных узлов : учеб. пособие / Б. Р. Киселев, М. Ю. Колобов ; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2019. – 179 с.
11. Холодилин, А. Н. Расчет конвейеров: учебное пособие / А. Н. Холодилин. – Оренбург : ОГУ, 2017. – 126 с.
12. Ромакин, Н. Е. Машины непрерывного транспорта : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. Е. Ромакин. – Москва : Издательский центр «Академия», 2008. – 427 с.
13. Пособие по проектированию конвейерного транспорта. Ленточные конвейеры (к СНиП 2.05.07–85) / Промтранспроект. – Москва : Стройиздат, 1988. – 48 с.
14. Анашкин, Н. Н. Разработка функциональной модели определения характеристик лент спиральных транспортёров / Н. Н. Анашкин, Е. Р. Мошев // *Математические методы в технологиях и технике*. – 2023. – № 3. – С. 37–41. DOI 10.52348/2712- 8873\_ММТТ\_2023\_3\_42.
15. Марка, Дэвид А. Методология структурного анализа и проектирования SADT / Дэвид А. Марка, К. МакГоуэн. – Москва : Метатехнология, 1993. – 239 с.
16. Конвейерные ленты. Производитель ООО «ТД СПбелт». – URL: <https://pospbelt.ru/products/konveernie-lenti/> (дата обращения: 29.09.2025).
17. Конвейерные ленты. Производитель «Компания прогресс». – URL: <https://ttcprogress.ru/downloads/?kind=1> (дата обращения: 29.09.2025).
18. Конвейерные ленты. Производитель ООО «Авангард системс». – URL: [https://a-konveer.ru/konveernie\\_lenti.html](https://a-konveer.ru/konveernie_lenti.html) (дата обращения: 29.09.2025).
19. Конвейерные ленты. Производитель ООО «ТПК Белтимпэкс». – URL: <https://beltimpeks.clients.site/#services> (дата обращения: 29.09.2025).
20. Конвейерные ленты. Производитель ООО «ТПК Сигма». – URL: <https://sigma-tpk.ru/services.html> (дата обращения: 29.09.2025).
21. Анашкин, Н. Н. Устройство и технология гуммирования приводных валов машин непрерывного транспорта в химическом машиностроении / Н. Н. Анашкин, Е. Р. Мошев // *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. – 2021. – № 2. – С. 229–242. – DOI: 10.15593/2224-9400/2021.2.18.
22. Желтухина, Ю. А. Использование российского программного обеспечения arm winmachine в машиностроительных расчетах / Ю. А. Желтухина, П. Н. Кускашов, С. П. Ереско // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2022. – Т. 1. – С. 427–428.

#### References

1. Bajda, M., Hardygora, M., Marasova, D. Energy Efficiency of Conveyor Belts in Raw Materials Industry. *Energies*, 2022, no. 15. <https://doi.org/10.3390/en15093080>.
2. Ananth, K. N. S., Rakesh, V., Visweswarao, P. K. Design and selecting the proper conveyor-belt. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 43–49.
3. Zrnić, N., Đorđević, M., Gašić, V. History of belt conveyors until the end of the 19th century. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*. Cham, Springer International Publishing, 2022, pp. 210–223. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-98499-1\\_18](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-98499-1_18).
4. Krinitsyn, P. G., Chentsov, S. V. Diagnostics of Conveyor Equipment Using Neural Network Algorithms. *Scientific Result. Information Technologies*, 2025, vol. 10, no. 2, pp. 84–92. DOI 10.18413/2518-1092-2025-10-2-0-8 (In Russ.).
5. Dmitrieva, V. V., Avkhadiev, I. F., Sizin, P. E. The use of modern software and hardware systems for automation of conveyor lines. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2021, no. 2, pp. 150–163. DOI 10.25018/0236-1493-2021-2-0-150-163 (In Russ.).
6. Błażej, R. et al. Profitability of conveyor belt refurbishment and diagnostics in the light of the circular economy and the full and effective use of resources. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 20. <https://doi.org/10.3390/en15207632>.
7. Planković, N., Živanić, D. *Fundamentals of conveyor belts*. Bilgrad, Serbia, 2022.

8. Marijić, J. et al. Product development of conveyor belts system with a focus on structural features. *21st Natural Gas, Heat and Water Conference, 14th International Natural Gas, Heat and Water Conference*, 2023, pp. 181–189.
9. Kamenskikh, S. F., Osmushin, S. S., Karzhavin, V. V. *Design and calculation of a conveyor belt: an educational and methodical manual*. Ekaterinburg, Publishing House of Russian State Professional and Pedagogical, 2020. 74 p. (In Russ.).
10. Kiselev, B. R., Kolobov M. Yu. *The conveyor belt. Calculation and design of the main components : textbook*. Ivanovo, 2019. 179 p. (In Russ.).
11. Kholodilin, A. N. *Calculation of conveyors : a textbook*. Orenburg, Orenburg State University 2017. 126 p. (In Russ.).
12. Romakin, N. E. *Continuous transport vehicles : textbook for students of higher educational institutions*. Moscow, Publishing Center “Academy”, 2008. 427 p. (In Russ.).
13. *The guide to the design of conveyor transport. Belt conveyors (SNIP 2.05.07–85)*. Promtransniiproekt. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 48 p. (In Russ.).
14. Anashkin, N. N., Moshev, E. R. Development of a functional model for determining the characteristics of spiral conveyor belts. *Mathematical methods in technology and engineering*, 2023, no. 3, pp. 37–41. DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2023\_3\_42 (In Russ.).
15. Marka, Dehvid A., MaKGouehn, K. *SADT Structural Analysis and Design Methodology SADT*. Moscow, Metatekhnologiya Publ., 1993. 239 p. (In Russ.).
16. *Conveyor belts. The manufacturer is TD SPBelt LLC*. Available at: [https://pospbelt.ru/products/konveernie\\_lenti/](https://pospbelt.ru/products/konveernie_lenti/) (accessed 09.29.2025) (In Russ.).
17. *Conveyor belts. The manufacturer is Progress Company*. Available at: <https://ttcprogress.ru/downloads/?kind=1> (accessed 09.29.2025) (In Russ.).
18. *Conveyor belts. The manufacturer is Avangard Systems LLC*. Available at: [https://a-konveer.ru/konveyernie\\_lenti.html](https://a-konveer.ru/konveyernie_lenti.html) (accessed 09.29.2025) (In Russ.).
19. *Conveyor belts. The manufacturer is TPK Beltimpex LLC*. Available at: <https://beltimpeks.clients.site/#services> (accessed 09.29.2025) (In Russ.).
20. *Conveyor belts. The manufacturer is TPK Sigma LLC*. Available at: <https://sigma-tpk.ru/services.html> (accessed 09.29.2025) (In Russ.).
21. Anashkin, N. N., Moshev, E. R. The device and technology of gumming of drive shafts of continuous transport machines in chemical engineering. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology*, 2021, no. 2, pp. 229–242. DOI 10.15593/2224-9400/2021.2.18 (In Russ.).
22. Zheltukhina, Yu. A., Kuskashov, P. N., Eresko, S. P. The use of Russian APM winmachine software in engineering calculations. *Current issues in aviation and cosmonautics*, 2022, vol. 1, pp. 427–428 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 03.02.2026.

The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 03.02.2026.

УДК 004.3

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОПАСНЫХ ЗОНАХ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

*Старов Дмитрий Владимирович*, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

старший преподаватель кафедры технологии материалов и промышленной инженерии, ORCID: 0009-0002-0377-3044, e-mail: bortv715ke@mail.ru

*Корякова Виктория Андреевна*, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

ассистент кафедры информационной безопасности, ORCID: 0000-0002-2472-9248, e-mail: koryakova-01@mail.ru

В статье рассматривается задача выявления потенциально опасных ситуаций, определяемых как одновременное присутствие человека и движения механизмов в заранее заданной опасной зоне. Предложен комбинированный алгоритм обработки видеопотока, включающий распознавание человека нейросетевым детектором, выделение движущихся областей методом вычитания фона, пространственную фильтрацию распознаваний по периметру опасной зоны и модуль устранения двойного распознавания движущегося человека. Формируется дискретный статус ситуации (четыре класса), который передается в промышленный контроллер и фиксируется в журнале событий. Проведена валидация детектора человека на тестовой выборке; достигнуто значение  $mAP@0,5 = 0,915$ . По результатам испытаний комплекса заявлена точность распознавания событий более 95 % и устойчивость работы без сбоев в период наблюдения. Обсуждаются ограничения решения, связанные с изменением условий освещения и положением камеры, а также направления дальнейшего развития, включая расширение контроля использования средств индивидуальной защиты и повышение робастности к промышленным помехам.

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, опасная зона, компьютерное зрение, распознавание человека, анализ движения, видеоаналитика, журналирование событий, мониторинг в реальном времени

**A HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR AUTOMATED INDUSTRIAL SAFETY  
MONITORING IN HAZARDOUS AREAS USING COMPUTER VISION**

*Starov Dmitry V.*, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Senior Lecturer at the Department of Materials Technology and Industrial Engineering, ORCID: 0009-0002-0377-3044, e-mail: bortv715ke@mail.ru

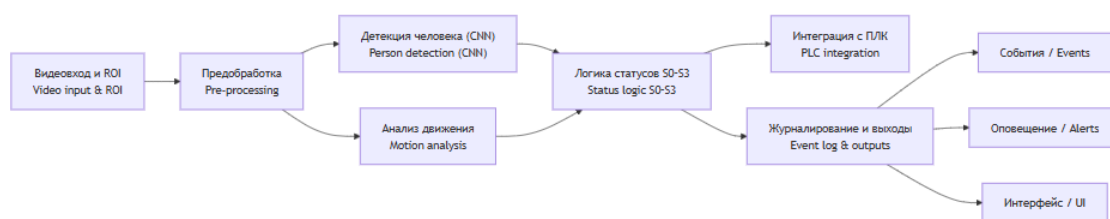
*Koryakova Victoria A.*, Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Assistant of the Department of Information Security, ORCID: 0000-0002-2472-9248, e-mail: koryakova-01@mail.ru

This article examines the problem of identifying potentially dangerous situations, defined as the simultaneous presence of a person and moving machinery in a predetermined danger zone. A combined video stream processing algorithm is proposed, including human recognition using a neural network detector, detection of moving areas using background subtraction, spatial filtering of recognitions along the perimeter of the danger zone, and a module for eliminating double recognition of a moving person. A discrete situation status (four classes) is generated, transmitted to an industrial controller, and recorded in the event log. The human detector was validated on a test sample; the achieved value of  $mAP@0.5 = 0.915$ . Based on test results, the system demonstrated an event recognition accuracy of over 95 % and reliable operation without failures during the observation period. The solution's limitations related to changing lighting conditions and camera position are discussed, as well as areas for further development, including expanded control over the use of personal protective equipment and increased robustness to industrial interference.

**Keywords:** industrial safety, hazardous area, computer vision, human recognition, motion analysis, video analytics, event logging, real-time monitoring

Graphical annotation (Графическая аннотация)



**ВВЕДЕНИЕ**

Несмотря на развитие культуры охраны труда и регламентов промышленной безопасности, производственная среда остается источником повышенных рисков из-за сочетания человеческого фактора, динамики технологического оборудования и ограниченности ресурсов на непрерывный ручной контроль. В таких условиях востребованы решения, которые обеспечивают непрерывное наблюдение и раннее обнаружение опасных событий без увеличения нагрузки на персонал, при этом обладая трассируемостью (фиксацией фактов и временных меток) и возможностью включения в контур управления. На глобальном уровне значимость этой задачи подтверждается оценками Международной организации труда, указывающими на сохраняющуюся высокую нагрузку от несчастных случаев и профессиональных рисков, что поддерживает актуальность автоматизированных инструментов мониторинга безопасности в промышленности.

В контексте цифровизации производственных процессов технологии компьютерного зрения позволяют перейти от «постфактум расследования» к превентивной диагностике риска: система в реальном времени выделяет присутствие персонала в опасной зоне и движение потенциально опасных механизмов, формируя сигнал тревоги при опасном совпадении факторов. В работе данное направление реализуется в виде программно-аппаратного комплекса, ориентированного на эксплуатацию в промышленном помещении и снижение травматизма путем автоматизированного выявления потенциально опасных ситуаций.

Цель исследования состоит в разработке и экспериментальной оценке программно-аппаратного комплекса для автоматизированного контроля соблюдения требований промышленной безопасности, обеспечивающего детектирование персонала и движения механизмов в заданной опасной зоне и выдачу однозначного статуса ситуации для интеграции с промышленной автоматикой.

Задача формализуется следующим образом. На вход подается поток видеокладов с камеры наблюдения (или несколько потоков), описание опасной зоны в координатах кадра, а также параметры алгоритмов (включая файл весов детектора) и, при необходимости, конфигурационные данные обмена с контроллером. На выходе формируется дискретный статус ситуации (например, опасно / работает оборудование / присутствуют люди / тревога), а также сопутствующие данные для объяснимости и последующей обработки (координаты детекций, отметка времени, идентификатор зоны) с передачей в контур промышленного управления и записью в базу данных. Критериями успешности выступают приемлемые показатели качества детектирования и классификации статусов (метрики точности/полноты и mAP для детектора), устойчивость к типовым индустриальным помехам (тени, блики, задымление в пределах допустимого) и ограничение задержки реакции до уровня, совместимого с задачами предупреждения опасных событий. Ограничения постановки включают зависимость от геометрии сцены и статичности камеры: изменение точки установки или масштаба кадра требует перенастройки параметров зоны и/или повторной калибровки.

Область применения комплекса – производственные помещения, где рядом с работающим технологическим оборудованием находятся люди, а опасные зоны могут быть заданы как фиксированные участки пространства, подлежащие непрерывному контролю. Для практического внедрения принципиально важна интеграция с промышленной автоматикой: предусмотрена передача событий/статусов в ПЛК и параллельное журналирование в базе данных с возможностью последующего анализа и формирования отчетности.

Научный и практический вклад работы включает, во-первых, алгоритмическую часть: объединение распознавания человека на основе модели YOLOv10 и анализа движения методом вычитания фона, пространственную фильтрацию по опасной зоне и логику формирования статуса по комбинации признаков; во-вторых, системную часть: построение прикладного конвейера обработки видеопотока с фиксацией событий и интерфейсом обмена с программно-логическим контроллером, что обеспечивает применимость решения в реальном производственном контуре.

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

При анализе существующих решений для автоматизированного контроля потенциально опасных ситуаций в производственных помещениях целесообразно разделять два уровня: алгоритмический (детекция, трекинг, анализ движения, логика принятия решения) и инженерно-внедряемый (развертывание, требования к вычислителю/ускорителю, интеграция с промышленной автоматикой и журналирование). В качестве базовых критериев сопоставления используются: точность (для детекции – AP/mAP в понимании современных бенчмарков, для трекинга – MOTA/IDF1/HOTA, для выделения движения – precision/recall/F-measure на специализированных наборах), задержка/частота обработки (latency/FPS/Hz), устойчивость к помехам (изменение освещения, тени, перекрытия, динамический фон), требования к оборудованию и воспроизводимость (описание протокола испытаний, доступность кода/весов/датасета) [1].

Современная практика в видеонаблюдении опирается на одностадийные детекторы семейства YOLO, поскольку они дают воспроизводимый компромисс «точность – скорость» и хорошо масштабируются по размеру модели. На уровне публичных бенчмарков (например, Microsoft COCO) семейство YOLOv10 демонстрирует измеримые выигрыши по AP и задержке инференса: в сравнении под 300 эпох обучения приводятся значения APval и latency (мс) для разных масштабов модели (YOLOv10-S: 45,6 % APval при 2,49 мс; YOLOv10-M: 50,3 % APval при 4,74 мс; YOLOv10-X: 53,6 % APval при 10,70 мс) [2].

Критически важный вывод для промышленного применения заключается в том, что бенчмарк-точность на COCO сама по себе не гарантирует переносимость в домен производственных сцен (спецодежда, частичные перекрытия, зашумление, нетипичные ракурсы). Поэтому большинство промышленных внедрений фактически опираются на transfer learning: модель инициализируется предобученными весами и дообучается на локальном датасете предприятия, что ускоряет сходимость и снижает требования к объему разметки по сравнению с обучением «с нуля». Обоснование переносимости признаков по слоям и рисков доменного разрыва подробно обсуждается в классической работе о переносимости признаков в глубоких сетях, где показано, что «ранние» признаки более универсальны, а «поздние» быстрее специализируются под исходную задачу и хуже переносятся при росте различия доменов [3]. Практический аспект переноса модели обучения для YOLO-семейства отражен и в документации, где прямо фиксируется, что использование pretrained-весов обычно ускоряет обучение и улучшает итоговые показатели относительно обучения с нуля при сопоставимых затратах [4].

Отдельная линия развития – end-to-end детекторы без NMS (DETR-подход), которые уменьшают «ручные» компоненты постобработки и потенциально стабилизируют латентность. В RT-DETR показано, что end-to-end детектор может достигать высокого AP при высокой частоте: заявлено 53,1% AP и 108 FPS для варианта RT-DETR-R50 на COCO val2017 (а также 54,3 % AP и 74 FPS для R101), при этом внимание уделено проблеме влияния NMS на скорость и необходимости end-to-end бенчмаркинга скорости [5]. Для задач контроля опасных зон это важно тем, что задержка должна быть предсказуемой: система безопасности хуже переносит «хвосты» латентности, чем умеренное снижение средней точности.

Модуль трекинга или анализа движения в задачах безопасности решает две разные, но связанные проблемы: подавление одиночных ложных детекций (через временную устойчивость) и выделение действительно значимого движения механизмов/объектов. В классическом трекинге модели SORT и Deep SORT остаются практичными базовыми решениями благодаря простоте и воспроизводимой скорости. SORT демонстрирует на MOT-бенчмарке показатели MOTA = 33,4 и MOTP = 72,1, а также скорость обновления трекинга 260 Hz на одном ядре Intel i7 (2,5 GHz) при заданной конфигурации [6]. Deep SORT добавляет признак внешности (appearance) для устойчивости к перекрытиям и снижает число ID-переключений; на MOT16 приводится MOTA = 61,4 [7].

Более современные ассоциативные трекаеры, такие как ByteTrack, смещают акцент на использование «почти всех» детекций (включая низкоуверенные) и показывают высокие показатели на MOT17: 80,3 MOTA, 77,3 IDF1, 63,1 HOTA при скорости 30 FPS на одном GPU V100 [8]. Для промышленных сцен этот класс методов полезен прежде всего тогда, когда много перекрытий и динамика сложна, однако он повышает и требования к качеству детектора и к вычислительным ресурсам.

Анализ движения в статичной камере традиционно реализуется через вычитание фона, поскольку он значительно дешевле оптического потока и проще по внедрению. Классическая линия – адаптивные вероятностные модели фона (например, улучшенная адаптивная GMM-модель), которые лежат в основе распространенных реализаций типа MOG2 [9]. Альтернативный широко цитируемый подход – ViVe, где прямо заявляется ориентация на системы, работающие в реальном времени, и приводится аргументация по вычислительной эффективности, а также указываются параметры и псевдокод (важно для воспроизводимости) [10].

Оптический поток (особенно нейросетевой) становится актуальным при движущейся камере или при сложном «нестационарном» фоне, но резко увеличивает стоимость инференса. RAFT демонстрирует низкую ошибку на бенчмарках (например, EPE 1,43 на тестовой выборке для одной из конфигураций), при этом в работе фигурируют измерения временной задержки на GPU и отдельно указано, что для 1080p-видео из DAVIS время составляет порядка 550 мс на кадр, что для многих сценариев мониторинга безопасности в реальном времени является ограничением без мощного ускорителя и/или без снижения разрешения [11].

Ключевая особенность реальных систем безопасности состоит в том, что «опасность» редко определяется одним детектором. На уровне прикладной семантики обычно требуется комбинирование признаков: человек в зоне риска, движение (или приближение) механизма, нарушение СИЗ, пересечение границы, «опасная близость» по времени и расстоянию. Обзорные работы по безопасности в динамичных производственных/строительных средах подчеркивают, что из-за изменчивости сцены и процедур трудно стандартизовать правила и метрики, а многие исследования остаются «пилотными» и недостаточно проработанными для практики; отдельно отмечаются проблемы перекрытий, выбора положения камеры, нехватки датасетов и отсутствие количественных метрик для небезопасных действий/условий [12].

Показателен класс решений, где в центре стоит не просто детекция людей, а сопоставление людей с геометрией опасных зон, иногда меняющейся по плану работ. В подходе IDC4D (связка компьютерного зрения и 4D-BIM) цель – выявлять вход работников в опасные зоны с учетом пространственно-временной конфигурации; метрики Average и Precision равны 93 % и 94 % на двух фазах тестирования прототипа [13]. Даже при таких цифрах методологически критичны два вопроса, которые многие публикации описывают недостаточно: как именно формируется для «опасной зоны» (геометрия, допуски, временная синхронизация) и как считается precision для события (кадр-уровень, эпизод-уровень, логическая агрегация по времени).

На этом фоне решения правило-ориентированного типа (логика статусов, временные фильтры, подавление двойного учета) остаются инженерно привлекательными: они прозрачны для аудиторов безопасности и проще в сертификационном контуре, но часто страдают от переносимости порогов (освещение/тени/вибрации камеры) и от того, что протоколы испытаний в публикациях описываются фрагментарно. Практически это проявляется в отсутствии единого тестового протокола: разные авторы используют разные датасеты/условия/метрики, что затрудняет репликацию и честное сравнение междоменных решений [12].

#### **РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА**

Функциональные требования к ПАК определяются задачами промышленного мониторинга: система должна распознавать присутствие человека в опасной зоне и фиксировать факт пересечения границ опасной зоны; детектировать движение механизмов (как отдельный признак опасности); формировать статус ситуации в дискретной форме (включая тревожный режим при сочетании «люди + движение»); передавать статус и событийные флаги в промышленный контроллер (ПЛК) и параллельно сохранять события в базе данных с доступом через веб-интерфейс; обеспечивать управление светозвуковой сигнализацией через ПЛК как исполнительный уровень.

Нефункциональные требования для промышленной эксплуатации целесообразно нормировать через показатели латентности, производительности и устойчивости. Выбранный edge-вычислитель должен обеспечивать обработку одного кадра не более чем за 200 мс при разрешении 800×600 пикселей.

Эксплуатационные требования включают работоспособность при статичной установке камеры и неизменной геометрии сцены. Опасная зона задается координатами прямоугольника в кадре, а изменение позиционирования камеры и/или размера выходного кадра приводит к необходимости перенастройки модели; следовательно, к эксплуатационным условиям следует отнести требование к жесткости крепления, стабильности поля зрения и управляемости изменений освещения.

Требования к безопасности и интеграции с ПЛК включают сетевую совместимость и корректный транспорт данных. В работе интеграция реализована через клиентскую библиотеку Snp7 и опирается на стандартный сетевой обмен по TCP/IP с использованием ISO-оп-TCP (RFC 1006) и порта 102 для семейства S7, что также фиксируется в документации производителя контроллеров. Наличие фиксированного канала (порт 102) и специфика протокола накладывают требования к сегментации сети (минимизация несанкционированного доступа), контролю задержек и повторов передач.

Аппаратная структурная схема ПАК строится вокруг edge-вычислителя, который объединяется с видеокameraми и выполняет вычисления распознавания; результаты распознавания (статус ситуации и координаты областей детектирования) передаются в ПЛК и одновременно записываются в базу данных на рабочем месте оператора. При этом ПЛК выступает не только исполнительным элементом (управление светозвуковой сигнализацией и приводами оборудования), но и концентратором сигналов дополнительных датчиков (например, датчика открытия дверей и вибрационного датчика), которые

затем считываются программной частью комплекса для корректной реакции на событие появления человека в опасной зоне.

Для разрабатываемого программно-аппаратного комплекса была составлена структурная схема, представленная на рисунке 1.

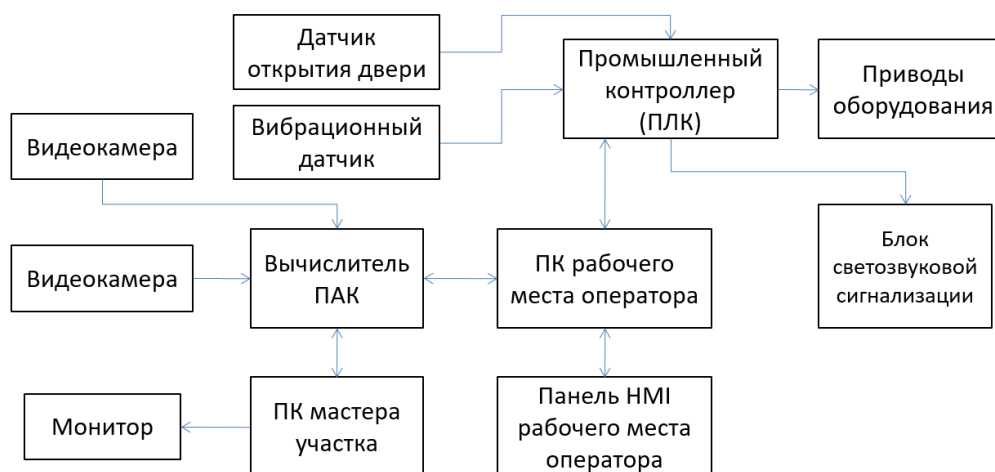


Рисунок 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса

С точки зрения потоков данных целесообразно разделять: видеопоток(и) и, при наличии, карту глубины (сенсорный поток высокой частоты); сигналы дискретных датчиков, поступающие в ПЛК (событийный поток низкой частоты); управляющие команды в ПЛК (флаги статуса/тревоги и служебные биты готовности); записи событий в базу данных (журналирование с привязкой ко времени и зоне) и визуализацию на операторском ПК.

В состав программно-аппаратного комплекса для автоматизированного контроля соблюдения требований промышленной безопасности на основании разработанной структурной схемы было решено включить следующее оборудование, представленное в таблице 1.

Был выбран одноплатный компьютер Orange Pi 5 на базе RK3588S, что обосновывается более высокой вычислительной мощностью (8-ядерная схема big.LITTLE) и наличием NPU как аппаратного ускорителя задач машинного обучения. На официальных страницах производителя подтверждается, что Orange Pi 5 использует RK3588S с конфигурацией quad-A76 + quad-A55, 8-нм техпроцесс и частоту до 2,4 ГГц, что согласуется с логикой выбора «edge-инференс на CPU/NPU при ограниченном энергопотреблении».

В качестве камера-сенсорного узла выбрана стереокамера Luxonis OAK-D, поскольку она сочетает получение RGB-потока и глубины, а также имеет встроенную архитектуру RVC2. В документации производителя указывается, что OAK-D построена на RVC2 и имеет 4 TOPS вычислительной мощности, поддерживает кодирование H.264/H.265/MJPEG, а также стереоглубину с фильтрацией и постобработкой; отдельно задаются базовые эксплуатационные параметры, важные для монтажа: baseline – 75 мм, диапазон глубины – 0,7–12 м, потребление порядка – 2,5–3 Вт в базовом режиме и до 5, а также наличие креплений – 1/4» и VESA – 75 мм.

Сетевая и энергетическая часть ориентирована на удаленное питание и связь по одному кабелю: выбран PoE-сплиттер PS5712TG с поддержкой IEEE 802.3af/at (до 30 Вт) и входным диапазоном 44–57 В с преобразованием на 12 В, а затем понижающий DC-DC преобразователь D064V, обеспечивающий гибкую выдачу напряжения и ток до 5 А при заявленной эффективности до 95 %. Применение PoE опирается на общеизвестную инженерную практику питания устройств по витой паре и хорошо согласуется с характеристиками стандартов IEEE 802.3af/at.

Интерфейс с ПЛК ориентирован на контроллеры Siemens семейства S7, а обмен реализуется поверх TCP с портом 102 и ISO-on-TCP (RFC 1006); это подтверждается документацией производителя, где указывается использование ISO-on-TCP по RFC 1006 для S7-коммуникации и соответствующий порт. Такой выбор для промышленного внедрения рационален по двум причинам: он минимизирует «ручные» мосты между ИТ-частью (edge-узел) и АСУ ТП (ПЛК) и позволяет формализовать протоколы испытаний связности и задержек по стандартному TCP-каналу.

Таблица 1 – Выбранные компоненты

Наименование компонента	Роль в ПАК	Ключевые характеристики	Обоснование выбора
Orange Pi 5 (RK3588S)	Edge-вычислитель для инференса и логики	8-ядерный SoC (A76/A55), до 2,4 ГГц, наличие NPU; поддержка Linux	Достаточный запас по CPU и наличие аппаратного ускорения для ML при умеренном энергопотреблении; доступность и воспроизводимость
Luxonis OAK-D	Стереозрение (RGB + depth) и первичная видеообработка	RVC2, 4 TOPS; baseline 75 мм; depth 0,7–12 м; крепления 1/4» и VESA 75 мм; потребление до 5 Вт	Хорошее соотношение «глубина + RGB + встроенная обработка» и совместимость по USB-интерфейсу; промышленный корпус
DC-DC D064V	Понижение/стабилизация питания	Вход 5–32 В; выход 0,8–30 В; ток до 5 А; эффективность до 95 %	Обеспечение стабильного питания вычислителя/периферии при питании от PoE-цепи
PoE-сплиттер PS5712TG	Передача питания и данных по Ethernet	IEEE 802.3af/at; вход 44–57 В; выход 12 В; гигабит; защита КЗ/перенапряжения	Упрощение монтажа: один кабель до узла, питание совместимо с PoE-инфраструктурой
PoE-источник питания (PSE) 802.3at	Подача питания в линию	802.3at типично до 30 Вт/порт; поддержка legacy 802.3af	Стандартизированная подача питания, снижает риск некорректного питания конечного устройства
Кабель Ethernet (Cat5e/Cat6)	Линия связи и питания PoE	Длина 20 м; пропускная способность до 1 Гбит/с (по классу)	Соответствие PoE-режиму и гигабитному каналу, простота обслуживания
ПЛК Siemens S7 (семейство)	Исполнительный контур и концентрация дискретных датчиков	ISO-op-TCP (RFC1006), порт 102; память DB для обмена	Стандартизированный промышленный контроллер, удобный для управления сигнализацией/приводами и интеграции с внешними модулями
Датчик открытия дверей	Контроль доступа/режимов	Дискретный сигнал в ПЛК	Уточнение контекста «появления человека» и событий доступа
Вибрационный датчик	Контроль вибраций /состояния участка	Дискретный/аналоговый сигнал в ПЛК	Учет шумов и событий, влияющих на корректность реакции системы
Светозвуковая сигнализация	Оповещение персонала	Управление от ПЛК; режимы «предупреждение /тревога»	Непосредственная реакция на ALARM-статус; интеграция в регламент безопасности
Рабочее место оператора (ПК/сервер)	База данных и веб-интерфейс	Запись событий, визуализация параметров	Трассируемость, аудит, выгрузка данных и отчеты

Требования к установке камеры в рассматриваемом ПАК вытекают из допущения статичности: опасная зона задается координатами прямоугольника в кадре, поэтому камера должна быть закреплена жестко и защищена от вибраций; любые изменения положения или разрешения требуют перенастройки зоны. С учетом паспортного диапазона «идеальной» глубины 0,7–12 м для OAK-D желательно выбирать высоту и угол установки так, чтобы контролируемая зона лежала в середине этого диапазона и не попадала в геометрические «края» поля зрения, где возрастает вероятность ошибок по глубине и детекции. Практически монтаж удобно реализовать через 1/4» или VESA-крепление, применяя защитный корпус/экран от пыли и освещения, а также разгрузку кабеля, чтобы исключить микросмещения на длинной линии.

Электропитание реализовано по PoE-цепи: используется питание 48 В по линии длиной 20 м, фиксируется падение напряжения до 46 В на входе DC-DC, после чего формируется 5 В для вычислителя, а камера питается от вычислителя через USB-порт. Такая архитектура рациональна тем, что переносит потери по линии на высокий уровень напряжения и упрощает трассировку, но требует обязательного контроля качества PoE-источника и защиты от перенапряжений; соответствие PoE-оборудования стандартам IEEE 802.3af/at.

Для реализации программно-аппаратного комплекса вначале была создана трехмерная модель в среде Kompas 3D. Были спроектированы отдельные модели камер и электронных модулей, которые затем объединялись в сборку, представленную на рисунке 2.

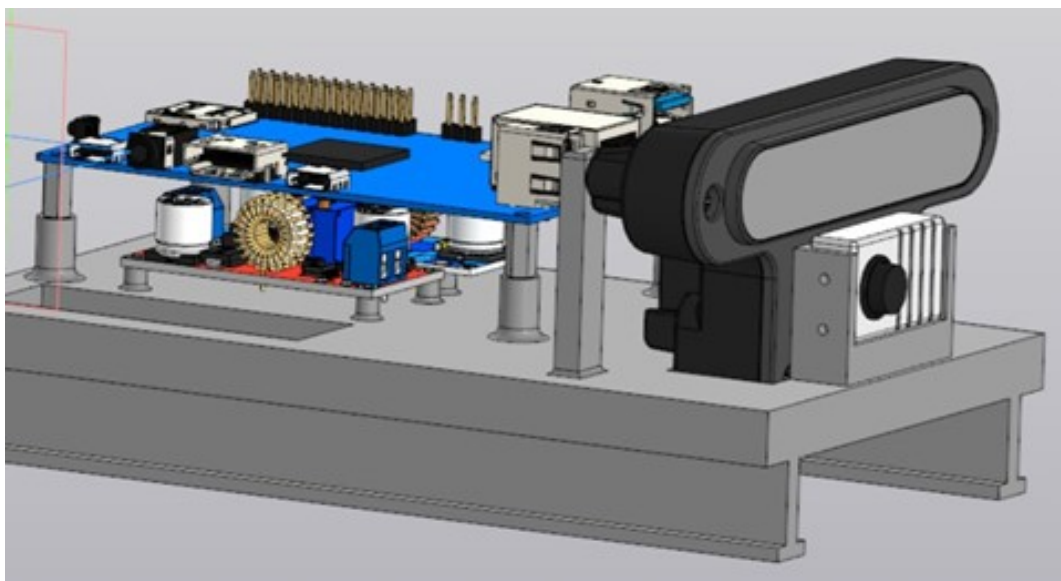


Рисунок 2 – Трехмерная модель аппаратной части комплекса

Аппаратная конфигурация системы включает камеру Luxonis OAK-D, установленную в спроектированном корпусе, и одноплатный микрокомпьютер Orange Pi 5, выполняющий роль вычислительного шлюза. Камера соединена с Orange Pi 5 через интерфейс USB 3.0. Управляющий ПЛК Siemens может быть непосредственно подключен к Orange Pi 5 через отдельный сетевой интерфейс в сегменте промышленной сети или через компьютер оператора.

Основа для размещения электронных модулей была напечатана на 3D-принтере с использованием пластика ABS. Далее компоненты были размещены на основе и подключены к питанию.

Подключение аппаратной части осуществлялось следующим образом: питание для всего программно-аппаратного комплекса передавалось с использованием блока питания для POE устройств с рабочим напряжением 48 В, далее, учитывая выбранную длину линии 20 метров, происходило падение напряжения до 46 В, которое и подавалось на вход преобразователя напряжения. На выходе DC-DC преобразователя получалось 5В для питания вычислителя, который, в свою очередь, через разъемы TYPE-C обеспечивал питанием видеокамеру.

#### **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА**

Общая схема работы модели представлена на рисунке 3. Для каждого кадра, поступающего с видеопотока, определяется периметр потенциально опасного участка, осуществляется поиск людей и движущихся механизмов.

Поскольку видеокамера в производственном помещении установлена статично, то потенциально-опасная зона определяется координатами прямоугольника, описывающего периметр участка, на котором необходимо исключить одновременное присутствие человека и движущихся механизмов. Изменение позиционирования камеры и/или размера выходного кадра приведет к необходимости перенастройки модели.

Поиск людей осуществляется с помощью предобученной модели детектирования людей YOLO 10 [14]. Обнаружение движущихся механизмов происходит с помощью алгоритма вычитания фона. Фоном при этом считается предыдущий кадр.

С помощью разработанного модуля программной фильтрации движения моделью исключаются из рассмотрения люди и движущиеся объекты, выходящие за пределы потенциально опасной зоны. При этом обнаруженный человек или движущийся объект считаются находящимися в потенциально опасной зоне, если нижний левый угол рамки, обозначающей область детектирования, находится внутри или на границе периметра потенциально опасной зоны. Алгоритм работы модуля представлен на рисунке 4.

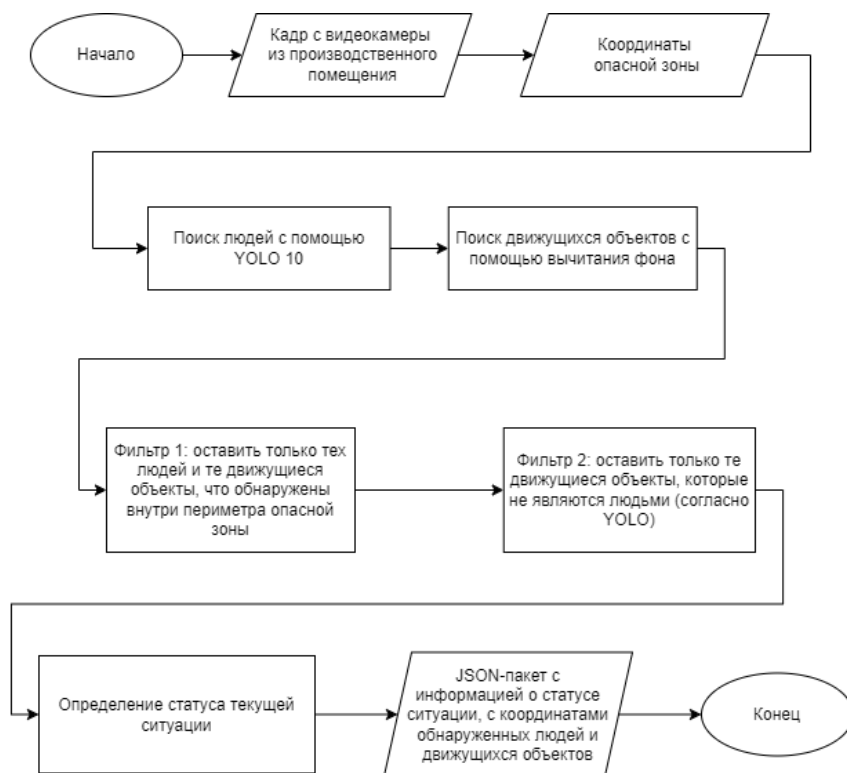


Рисунок 3 – Общая блок-схема работы модели определения потенциально опасных ситуаций

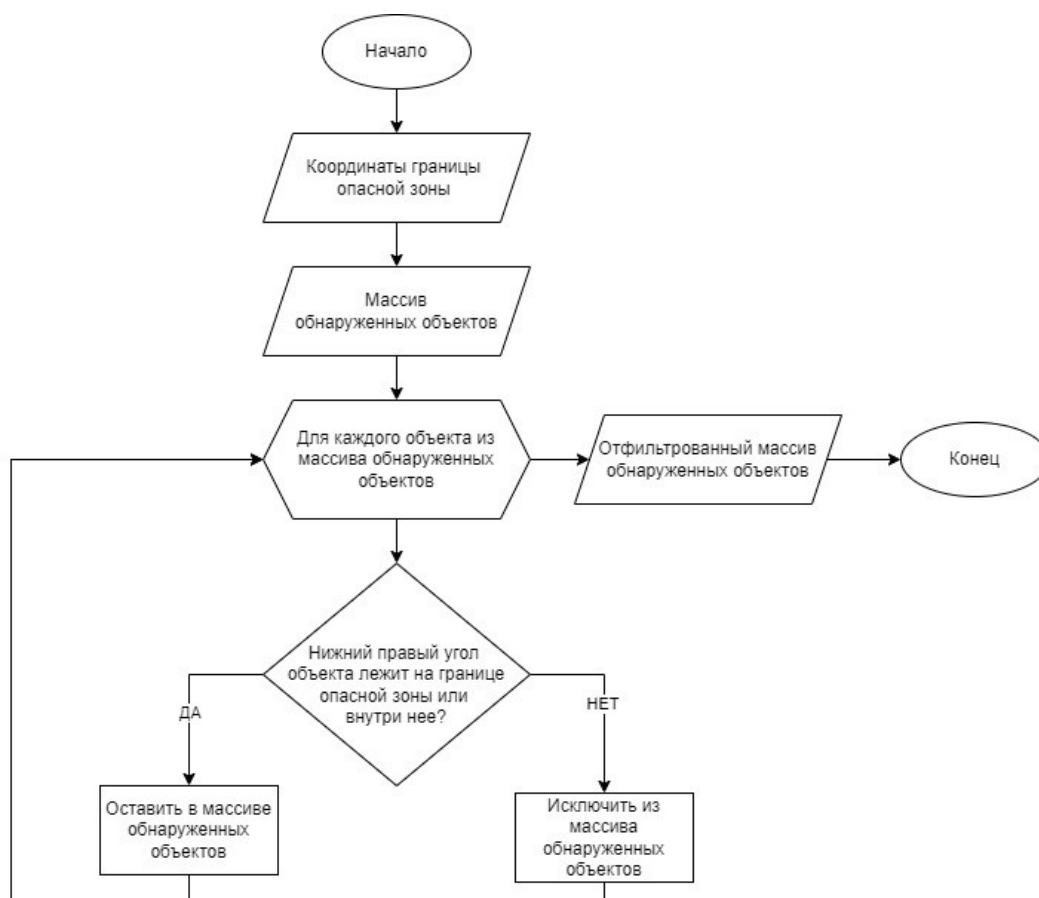


Рисунок 4 – Блок-схема работы модуля фильтрации движения

После этого с помощью модуля фильтрации двойного распознавания обрабатывается ситуация распознавания движущегося человека одновременно двумя моделями. Движущийся в пределах потенциально опасного участка человек детектируется как моделью обнаружения человека, так и моделью обнаружения движущихся объектов. Для исключения такой ситуации проверяется условие пересечения области детектирования человека и области детектирования движущегося объекта с точностью  $\pm 15$  px. Блок-схема алгоритма работы модуля представлена на рисунке 5.

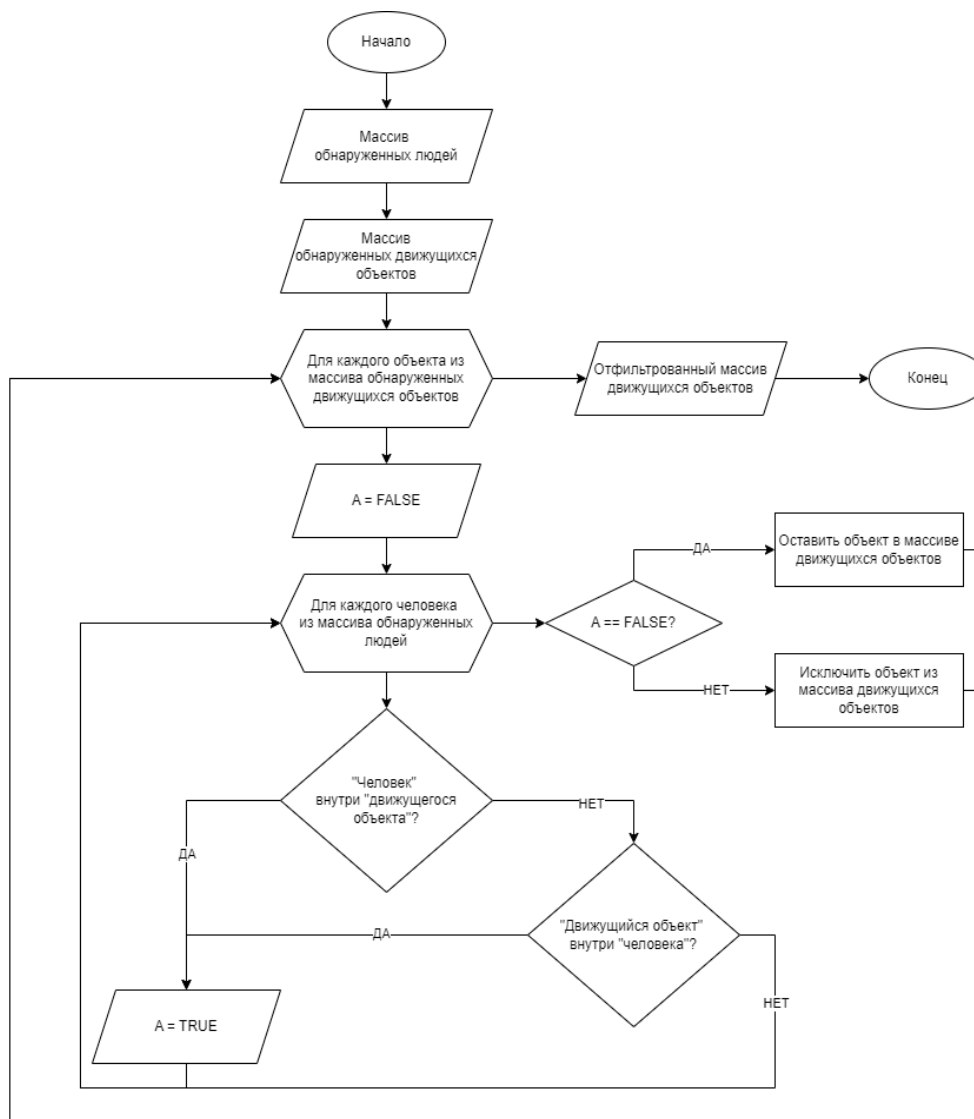


Рисунок 5 – Блок-схема работы модуля фильтрации двойного распознавания

После детектирования в потенциально опасной зоне людей и движущихся объектов, а также после обработки ситуации двойного распознавания движущегося человека, модель делает вывод о статусе текущей ситуации согласно таблице 2.

Таблица 2 – Таблица определения статуса ситуации

Количество людей	Количество движущихся объектов	Код статуса ситуации	Ситуация
= 0	= 0	0	Безопасная ситуация
= 0	$\geq 1$	1	Рабочая ситуация: движутся механизмы
$\geq 1$	= 0	2	Рабочая ситуация: присутствуют люди
$\geq 1$	$\geq 1$	3	ALARM!!! Опасная ситуация

После выполнения всех действий модель передает ПАК статус ситуации и перечень координат областей, внутри которых обнаружены люди и/или движущиеся объекты в потенциально опасной зоне.

Для программной части комплекса была предложена монолитная архитектура (рис. 6). Программное обеспечение разработано на языке Python и имеет модульную структуру.

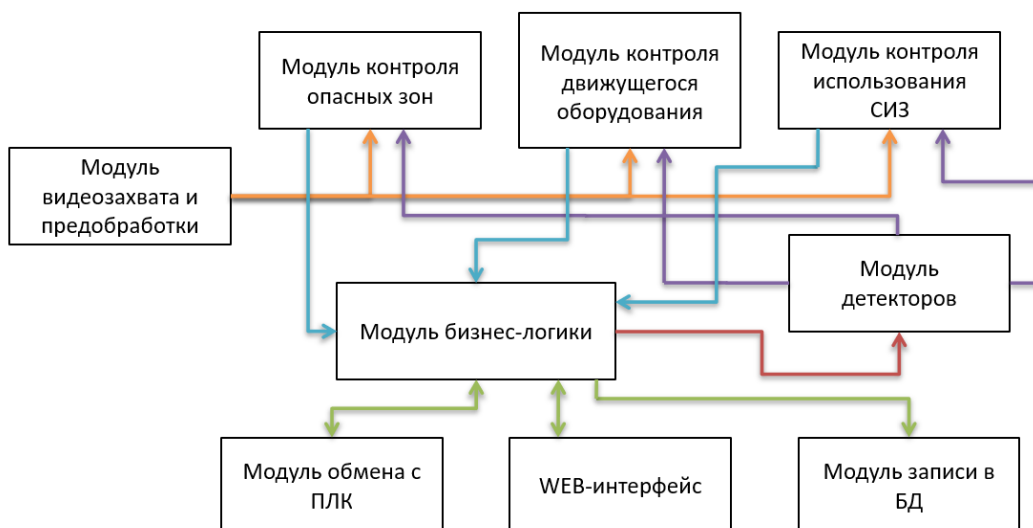


Рисунок 6 – Архитектура программного обеспечения комплекса

Программная часть комплекса выполняет следующие функции:

- собирает данные с оборудования (модуль обмена с ПЛК) и камер (модуль видеозахвата и предобработки);
- анализирует и детектирует потенциально опасные ситуации с помощью специализированных алгоритмов (модуль детекторов, модули контроля опасных зон, движущегося оборудования, использования СИЗ);
- обрабатывает логику принятия решений (модуль бизнес-логики);
- сохраняет результаты и предоставляет доступ к данным (модуль записи в БД, WEB-интерфейс).

### СТРУКТУРА И ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

Изначально на вход модели подаются координаты, описывающие периметр потенциально опасной зоны, а также в виде отдельного файла передается предобученная модель обнаружения людей (на основе YOLO 10). Более детально описание входной информации для модели представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Входные данные модели

Наименование данных	Обозначение	Структура данных	Способ ввода данных	Ограничения
Текущий кадр видеопотока	–	frame_temp	Видеокамера, установленная в производственном помещении	высота – 360px ширина – 640px
Предыдущий кадр видеопотока	–	frame	Видеокамера, установленная в производственном помещении	высота – 360px ширина – 640px
X координата верхнего левого угла потенциально-опасной зоны	X1	int	Константа	$0 \leq X1 \leq 640px$
Y координата верхнего левого угла потенциально-опасной зоны	Y1	int	Константа	$0 \leq Y1 \leq 360px$
«Высота» потенциально-опасной зоны	H1	int	Константа	$0 \leq H1 \leq 360px$
«Ширина» потенциально-опасной зоны	W1	int	Константа	$0 \leq W1 \leq 640px$
Предобученная модель	YOLO10	Файл yolov10n.pt	Хранится в исходных файлах модели	*.pt

Подробнее параметры выходных данных представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Выходные данные модели

Наименование данных	Обозначение	Структура данных	Способ вывода данных	Ограничения
Перечень обнаруженных людей	people_coords	list	внутри пакета JSON-	–
Перечень обнаруженных движущихся объектов	large_contours	list	внутри пакета JSON-	–
Статус ситуации	status	int	внутри пакета JSON-	[0, 3]
Описание ситуации	def_status	string	внутри пакета JSON-	{«Безопасная ситуация», «Рабочая ситуация: движутся механизмы», «Рабочая ситуация: присутствуют люди», «ALARM!!! Опасная ситуация»}

На выходе модель сообщает статус текущей ситуации и перечень координат областей, внутри которых обнаружены люди и/или движущиеся объекты в потенциально опасной зоне.

#### ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОСЕТОВОЙ МОДЕЛИ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТРИК

В качестве основы выбран детектор семейства YOLOv10 с практикой дообучения «поверх» предобученных весов yolov10n.pt, реализованной в экосистеме Ultralytics. Выбор малой (nano) версии логически связан с требованием минимальной латентности: в оригинальной публикации YOLOv10 приведены характеристики для YOLOv10-N порядка 2,3 млн параметров и 6,7 GFLOPs, что объясняет ее применимость к ресурсно-ограниченным устройствам при сохранении приемлемой точности на стандартных бенчмарках.

Процедура обучения представляет собой как итеративный подбор гиперпараметров с контролем кривых обучения и метрик качества детекции; в качестве ключевых метрик мониторинга названы precision, recall и mAP50.

Процесс обучения YOLOv10 для детектирования человека в опасной зоне – это создание модели, понимающей пространственный контекст. Модель должна идентифицировать не просто человека, а факт его нахождения в заданной области.

Сначала была выполнена разметка людей на участках. Разметка включает два типа аннотаций: bounding box для всех людей с классом person и полигональную маску или bounding box для области с классом danger\_zone. Датасет отражает реальные условия: разную спецодежду, позы, перекрытия, освещение и промышленные помехи.

Итоговый график Precision-Recall приведен на рисунке 7.

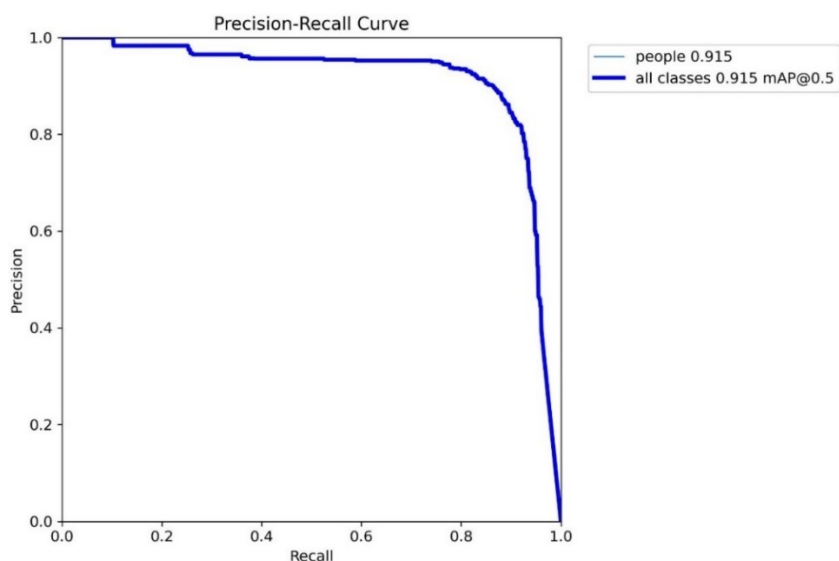


Рисунок 7 – График Precision-Recall

Здесь можно отметить, что  $mAP@0,5$  достиг значения 0,915. Модель валидировалась на отдельном тестовом наборе данных. Проверялись краевые случаи: человек на границе зоны, несколько людей, пустая зона. Проблемные кадры были добавлены в тренировочный набор для последующего дообучения, что позволило улучшить качество.

Итоговый файл весов (.pt) развертывался в целевой среде вместе с модулем постобработки. При обучении легкой модели YOLOv10 на большом датасете в течение 150–300 эпох необходимо было подбирать гиперпараметры.

В работе настраивались следующие ключевые гиперпараметры:

- размер батча (batch\_size). Для легкой модели на используемой видеокарте Nvidia RTX3060 был протестированы размеры батчей 16 и 32. Большой батч улучшает стабильность градиента, но требует больше памяти. В итоге он и показал лучший результат;
- скорость обучения (lr). Начальную скорость обучения обычно устанавливают в диапазоне 0,01–0,001. Было использовано расписание linear для плавного снижения lr к последним эпохам, что помогает точной настройке весов;
- вес распада (weight\_decay). Значение 0,0005 помогает бороться с переобучением, ограничивая рост весов модели;
- аугментация данных (augment). Для разнообразного датасета была использована умеренная аугментация: мозаика (mosaic = 0,5), случайные аффинные преобразования (translate = 0,1, scale = 0,5), изменение насыщенности и яркости (hsv\_h = 0,015, hsv\_s = 0,7, hsv\_v = 0,4);
- тип оптимизатора и его коэффициенты. Был выбран оптимизатор AdamW. Для него оставили значения по умолчанию (momentum = 0,937, eps = 1e-8);
- функция потерь (loss). Использовали стандартные для YOLO функции: box\_loss (CIoU/GIoU), cls\_loss (BCE), dfl\_loss.

В работе процесс настройки гиперпараметров был разбит на 3 стадии:

- стадия 1 (эпохи 1–3): заморозка части слоев (freeze), низкий lr (например, 0,001) для тонкой настройки «головы» детектора;
- стадия 2 (эпохи 4–100): разморозка всех слоев, основной lr (например, 0,01), активная аугментация. Это основной этап обучения;
- стадия 3 (эпохи 101–150): отключение мозаики (mosaic = 0,0), уменьшение lr на порядок (до 0,001), снижение уровня аугментации. Эта фаза финальной калибровки модели на «чистых» данных.

Финальный выбор гиперпараметров был определен после нескольких попыток. Было запущено несколько коротких прогонов (10–20 эпох) с разными lr и batch\_size, проанализированы кривые обучения, и выбран финальный наиболее подходящий набор.

Результаты обучения по эпохам представлены на рисунке 8.

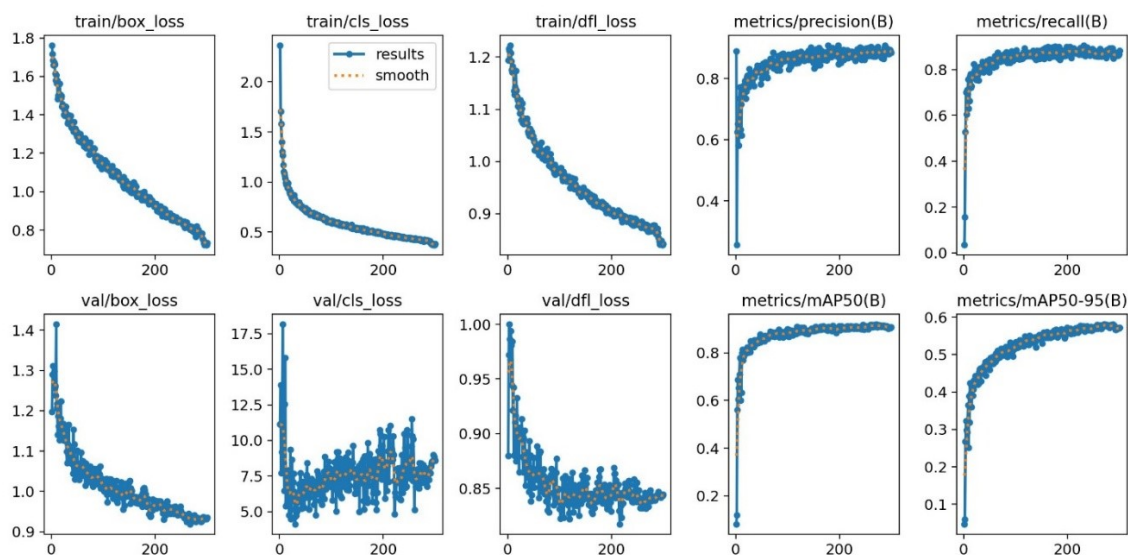


Рисунок 8 – Итоговые кривые обучения нейросетевой модели

С точки зрения улучшения качества распознавания при сохранении реального времени ключевыми рекомендациями являются, во-первых, расширение и стратификация данных: добавление негативных кейсов (люди вне зоны, отражения, тени, частичные перекрытия оборудованием) и выделение независимых «слоев» по условиям освещения; во-вторых, внедрение cross-validation либо,

как минимум, повторяемого эксперимента с несколькими seed и фиксированным протоколом split; в-третьих, калибровка confidence-порога под заданный профиль риска (например, минимизация false alarm при ограничении на miss rate).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и испытан программно-аппаратный комплекс видеоаналитики для контроля опасных зон на производстве, объединяющий компьютерное зрение, событийную логику и интеграцию с ПЛК. Комплекс ориентирован на промышленную эксплуатацию с выдачей статуса в контур управления и фиксацией событий. В результате анализа обучения нейросетевой модели детектирования человека для ПАК промышленной видеоаналитики подтверждена практическая реализуемость подхода на основе легковесного детектора YOLOv10n и специализированного промышленного датасета. В работе обучение описано как дообучение предобученных весов yolov10n.pt в среде Ultralytics с подбором ключевых гиперпараметров (batch\_size до 32 на GPU NVIDIA RTX3060, lr0 в диапазоне 0,01–0,001 с этапным снижением, weight\_decay 0,0005, умеренные аугментации, оптимизатор AdamW), а качество контролировалось через кривые Precision-Recall и метрику mAP@0.5, достигшую 0,915.

### Список источников

1. Lin, T. Y. Microsoft coco: Common objects in context / T. Y. Lin et al. // European conference on computer vision. – Cham : Springer International Publishing, 2014. – P. 740–755.
2. Wang, A. YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection / A. Wang, H. Chen, L. Liu, K. Chen, Z. Lin, J. Han, & G. Ding // ArXiv. – 2024. – Abs/2405.14458.
3. Yosinski, J. How transferable are features in deep neural networks? / J. Yosinski, J. Clune, Y. Bengio, & H. Lipson // ArXiv. – 2014. – Abs/1411.1792.
4. Machine Learning Best Practices and Tips for Model Training. – URL: <https://docs.ultralytics.com/guides/model-training-tips/> (дата обращения: 14.12.2025).
5. Lv, W. DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection / W. Lv, S. Xu, Y. Zhao, G. Wang, J. Wei, C. Cui, Y. Du, Q. Dang & Y. Liu // 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2023. – P. 16965–16974.
6. Bewley, A. Simple online and realtime tracking / A. Bewley, Z., Ge, L. Ott, F. T. Ramos & B. Upercroft // 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – 2016. – P. 3464–3468.
7. Wojke, N. Simple online and realtime tracking with a deep association metric / N. Wojke, A. Bewley, & D. Paulus // 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – 2017. – P. 3645–3649.
8. Zhang, Y. ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box / Y. Zhang, P. Sun, Y. Jiang, D. Yu, Z. Yuan, P. Luo, W. Liu, & X. Wang // ArXiv. – 2021. – Abs/2110.06864.
9. Zivkovic, Z. Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction / Z. Zivkovic // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – 2004. – Vol. 2, № 2. – P. 28–31.
10. Barnich, O. ViBe: A Universal Background Subtraction Algorithm for Video Sequences / O. Barnich & M. Van Droogenbroeck // IEEE Transactions on Image Processing. – 2011. – Vol. 20. – P. 1709–1724.
11. Teed, Z. RAFT: Recurrent All-Pairs Field Transforms for Optical Flow / Z. Teed, & J. Deng // ArXiv. – 2020. – Abs/2003.12039.
12. Seo, J. Computer vision techniques for construction safety and health monitoring / J. Seo, S. Han, S. Lee & H. Kim // Adv. Eng. Informatics. – 2015. – Vol. 29. – P. 239–251.
13. Tran, S. V.-T. A Human Detection Approach for Intrusion in Hazardous Areas Using 4D-BIM-Based Spatial-Temporal Analysis and Computer Vision / S. V.-T. Tran, D. Lee, Q. L. Bao, T. Yoo, M. Khan, J. Jo, C. Park // Buildings. – 2023. – Vol. 13 (9). <https://doi.org/10.3390/buildings13092313>.
14. YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection // GitHub. – URL: <https://github.com/THU-MIG/yolov10> (дата обращения: 14.12.2025).

### References

1. Lin, T. Y. et al. Microsoft coco: Common objects in context. *European conference on computer vision*. Cham, Springer International Publishing, 2014, pp. 740–755.
2. Wang, A., Chen, H., Liu, L., Chen, K., Lin, Z., Han, J., & Ding, G. YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection. *ArXiv*, 2024, abs/2405.14458.
3. Yosinski, J., Clune, J., Bengio, Y., & Lipson, H. How transferable are features in deep neural networks? *ArXiv*, 2014, abs/1411.1792.
4. *Machine Learning Best Practices and Tips for Model Training*. Available at: <https://docs.ultralytics.com/guides/model-training-tips/> (accessed 14.12.2025).
5. Lv, W., Xu, S., Zhao, Y., Wang, G., Wei, J., Cui, C., Du, Y., Dang, Q., & Liu, Y. DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection. *2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2023, pp. 16965–16974.
6. Bewley, A., Ge, Z., Ott, L., Ramos, F. T., & Upercroft, B. Simple online and realtime tracking. *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2016, pp. 3464–3468.
7. Wojke, N., Bewley, A., & Paulus, D. Simple online and realtime tracking with a deep association metric. *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017, pp. 3645–3649.
8. Zhang, Y., Sun, P., Jiang, Y., Yu, D., Yuan, Z., Luo, P., Liu, W., & Wang, X. ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box. *ArXiv*, 2021, abs/2110.06864.

9. Zivkovic, Z. Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction. *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2004, vol. 2, no. 2, pp. 28–31.
10. Barnich, O., & Van Droogenbroeck, M. ViBe: A Universal Background Subtraction Algorithm for Video Sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, vol. 20, pp. 1709–1724.
11. Teed, Z., & Deng, J. RAFT: Recurrent All-Pairs Field Transforms for Optical Flow. *ArXiv*, 2020, abs/2003.12039.
12. Seo, J., Han, S., Lee, S., & Kim, H. Computer vision techniques for construction safety and health monitoring. *Adv. Eng. Informatics*, 2015, vol. 29, pp. 239–251.
13. Tran S. V.-T., Lee D., Bao Q. L., Yoo T., Khan M., Jo J., Park, C. A Human Detection Approach for Intrusion in Hazardous Areas Using 4D-BIM-Based Spatial-Temporal Analysis and Computer Vision. *Buildings*, 2023, vol. 13 (9), p. 2313. <https://doi.org/10.3390/buildings13092313>.
14. YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection. *GitHub*. Available at: <https://github.com/THU-MIG/yolov10> (accessed 14.12.2025).

Статья поступила в редакцию 04.01.2026; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 08.02.2026.

The article was submitted 04.01.2026; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 08.02.2026.

УДК 004.422.8

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ПОСЕЩАЕМОСТИ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ

**Бурукина Ирина Петровна**, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40,  
кандидат технических наук, заведующий кафедрой, ORCID: 0009-0006-1953-2914, e-mail: burukinairina@gmail.com

**Егорев Егор Сергеевич**, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40,  
бакалавр, e-mail: egor57557@mail.ru

**Колос Максим Дмитриевич**, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40,  
бакалавр, e-mail: maxkolosda@yandex.ru

Актуальность разработки мобильного приложения для учета посещаемости студентов обусловлена необходимостью повышения эффективности образовательного процесса и упрощения рутинных задач преподавателей и кураторов. Локальная версия приложения позволяет сократить зависимость от интернет-подключения, увеличить скорость обработки данных и повысить общую надежность системы. Разработанное мобильное приложение базируется на архитектуре *Local-First*, обеспечивает быстрый доступ к данным о посещаемости студентов, снижает нагрузку на преподавателей и кураторов, а также улучшает качество мониторинга успеваемости. Оценка эффективности внедрения разработанного локального мобильного приложения проведена на основании анкетирования пользователей, совокупности модульных и приемочных тестов, а также эмпирических наблюдений. Анализ полученных результатов подтвердил существенное (до 50 %) снижение нагрузки на преподавателей и кураторов при использовании приложения.

**Ключевые слова:** мобильное приложение, локальная версия, посещаемость, учет, преподаватели, кураторы, эффективность

## EXPERIENCE IN DEVELOPING AND IMPLEMENTING A LOCAL MOBILE APPLICATION TO IMPROVE THE EFFECTIVENESS OF CLASSROOM ATTENDANCE MONITORING

**Burukina Irina P.**, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department, ORCID: 0009-0006-1953-2914, e-mail: burukinairina@gmail.com

**Egorov Egor S.**, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, bachelor, e-mail: egor57557@mail.ru

**Kolos Maxim D.**, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, bachelor, e-mail: maxkolosda@yandex.ru

The relevance of developing a mobile application for recording student attendance is due to the need to improve the efficiency of the educational process and simplify the routine tasks of teachers and supervisors. The local version of the application allows to reduce the dependence on an Internet connection, increase the speed of data processing and increase the overall reliability of the system. The developed mobile application, based on the *Local-First* architecture, provides fast access to the data on student attendance, reduces the workload of teachers and supervisors, and improves the quality of monitoring of academic performance. The effectiveness of the developed local mobile application was evaluated based on user surveys, a set of module and acceptance tests, and empirical observations. The analysis of the results confirmed a significant (up to 50%) reduction in the workload of teachers and curators when using the application.

**Keywords:** mobile application, local version, attendance, accounting, teachers, curators, efficiency

### Graphical annotation (Графическая аннотация)



## ВВЕДЕНИЕ

Проблема организации эффективного учебного процесса остается актуальной для любого высшего учебного заведения. Одним из ключевых факторов успешной реализации образовательных целей является контроль над регулярностью посещения учебных мероприятий [1, 2]. Это позволяет обеспечить систематичность усвоения материала, дисциплину и мотивацию учащихся.

Традиционный учет посещаемости предполагает ведение журнала преподавателем вручную либо заполнение электронных таблиц сотрудниками кафедры. Недостатком данного метода являются высокая трудоемкость, вероятность ошибок и низкая точность сбора данных. Процесс обработки информации занимает значительное количество времени преподавателя, отвлекая его внимание от основной образовательной деятельности. Кроме того, отсутствие централизованной базы данных затрудняет доступ кураторов и администрации к необходимой информации, что снижает возможность оперативного реагирования на случаи пропусков занятий учащимися.

В связи с этим актуальным становится внедрение современных технологий, позволяющих упростить и ускорить процесс внесения данных о посещаемости и своевременно получать аналитическую информацию о показателях дисциплины студентов. Популярная технология *RFID* (*Radio Frequency Identification*) предполагает интеграцию специальных меток в студенческие удостоверения или карточки, обеспечивающие дистанционное считывание данных о присутствии студента посредством бесконтактного сканирования документа на входе аудитории [3, 4]. Биометрия, включающая идентификацию по отпечаткам пальцев или лицу, отличается повышенной точностью фиксации присутствия, снижением вероятности погрешностей и мошенничества [5,6]. В отдельных учебных заведениях практикуется применение *QR*-кодов (*Quick Response*), которые учащиеся сами сканируют перед каждым занятием, облегчая процедуру сбора данных и уменьшая нагрузку на преподавателя [7, 8]. Одновременно немалую роль играют электронные журналы и специализированные базы данных, служащие средством централизации и упорядочивания информации о посещениях. Они интегрированы в образовательные платформы, предоставляя доступ преподавателям и администрации университетов к актуальной статистике пропусков и прогулов [9, 10, 11]. Важным моментом является использование интеллектуальных аналитических инструментов, реализуемых в рамках *BI*-решений (*Business Intelligence*) [12, 13]. Такие средства позволяют проводить глубокий анализ полученных данных, формировать наглядные графики и диаграммы, обнаруживать скрытые взаимосвязи и выявлять общие тенденции. Еще одним направлением инноваций выступает внедрение облачных хранилищ данных, отличающихся высоким уровнем надежности, защищенности информации и обеспеченностью круглосуточного доступа из любых географических точек [14, 15].

Указанные технологии активно внедряются в университетах и колледжах, позволяя существенно сократить временные затраты на ведение учетных записей вручную и повысить качество мониторинга уровня дисциплины среди учащихся. Примерами успешного применения являются российские университеты, такие как МГУ имени Ломоносова, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Московский физико-технический институт, а также зарубежные учебные заведения Китая, Южной Кореи и т. д.

Несмотря на очевидные преимущества, существует ряд проблем, ограничивающих массовое использование технологий автоматизации учета посещаемости в высших учебных заведениях [16]. Во-первых, стандартные коммерческие системы трудно адаптировать под специфику функционирования отдельного учебного заведения. Во-вторых, поддержка и обслуживание таких продуктов, включая обновление программного обеспечения и техническую поддержку, требует значительных финансовых вложений. Кроме этого, многие системы имеют стандартные шаблоны отчетов, которые могут не удовлетворять требованиям конкретной образовательной программы. Также централизованные системы нередко сталкиваются с проблемами производительности при обработке большого количества запросов одновременно, особенно в высших учебных заведениях с тысячами студентов. И самое главное, что всем вышеуказанным технологиям требуется строгое бесперебойное интернет-соединение, которое в настоящее время может быть недоступным в учебных заведениях из-за вопросов безопасности.

В то же время применение локальных мобильных приложений характеризуется рядом существенных преимуществ. Во-первых, сокращаются задержки передачи данных и повышается скорость обработки запросов. Во-вторых, уменьшается зависимость от глобальных сетей связи, что повышает надежность и устойчивость системы в условиях ограниченной доступности интернета. Наконец, локальная версия способствует улучшению конфиденциальности и безопасности данных пользователей путем минимизации рисков утечки информации при передаче через публичные сети.

Исходя из вышесказанного, очевидно, что разработка и внедрение в учебный процесс локальной системы является важной частью стратегии усовершенствования цифровой среды образовательных учреждений.

Цель исследования – разработка локального мобильного приложения для учета посещаемости студентов, направленного на повышение эффективности управления образовательным процессом и оптимизацию контроля показателей дисциплины учащихся.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Архитектура локального мобильного приложения базируется на принципе разделения функций и уровней ответственности. Она состоит из нескольких взаимодополняющих компонентов, работающих совместно для обеспечения оптимального процесса учета посещаемости студентов при отсутствии интернет-соединения и последующей обработки данных.

Основной задачей приложения является сбор и фиксация данных о посещаемости студентами занятий и последующая передача этих данных при интеграции с электронной информационно-образовательной средой (ЭИОС) на платформе *Moodle*.

Преподаватель инициирует рабочий цикл, открывая приложение и выбирая соответствующую учебную группу и дисциплину. Далее он производит маркировку присутствующих студентов, при необходимости оставляя пояснительные комментарии. Весь процесс сопровождается удобной навигацией и простотой интерфейса, минимизируя время на занесение данных. По окончании учебной недели реализуется двухсторонняя интеграция с ЭИОС, во время которой происходит автоматическая операция выгрузки собранных данных и обновление интерфейса в приложении преподавателя. Это позволяет участникам образовательного процесса, преподавателям, кураторам и администрации получать доступ к актуальным сведениям о посещаемости любого студента. Важно подчеркнуть, что указанные операции выполняются прозрачно для пользователя и не требуют дополнительного внимания.

Особое внимание в приложении уделяется процессу обработки информации о пропусках занятий по уважительным причинам. Кураторам предоставлена возможность не только отслеживать статистику посещаемости отдельных студентов, но и вносить правки в реестр пропущенных занятий, прикрепляя оправдательные документы (медицинские справки, служебные записки и т. д.), подтверждающие законность пропуска занятий. Такие документы сохраняются в цифровом виде, автоматически привязываются к персональному профилю студента и становятся доступными для всех заинтересованных лиц, преподавателей и сотрудников учебного заведения, авторизованных в системе.

Процесс проектирования приложения включает проведение всестороннего анализа наиболее целесообразных технологических подходов с учетом специфики образовательной среды и характеристик мобильных устройств. Итоговым решением является следующий набор компонентов технологического стека:

- язык программирования *Python* с гибкой и богатой экосистемой, позволяющей выбирать подходящие библиотеки для быстрой и качественной разработки;
- библиотека *pandas* для эффективного анализа и обработки табличных данных формата *xlsx/xls*, содержащих списки студентов и истории посещений;
- библиотека *aiohhttp* для синхронизации запросов и реализации взаимодействия с ЭИОС;
- библиотека *loguru* для детального логирования событий и ошибок;
- модуль *sys* для интеграции с операционной системой мобильного устройства;
- библиотека *Qt6* совместно с фреймворком *PySide6* для создания качественного графического интерфейса.

Архитектура приложения построена по принципу *Local-First*, предполагающему первоначальное размещение данных на устройстве пользователя. Подобный подход поддерживает полную автономность и надежность работы приложения в любых условиях. Чтобы гарантировать максимальную доступность и переносимость готового продукта, применены специализированные инструменты для упаковки приложения в форматы, поддерживаемые разными платформами. *Buildozer* – для компиляции исходных файлов в исполняемый пакет формата *ark*, предназначенный для установки на устройства под управлением *Android*. *PyInstaller* – для подготовки исполняемых файлов формата *exe*, предназначенных для распространения на платформе *Windows*. Данная стратегия упаковочных решений помогает охватить максимальное количество потенциальных пользователей.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внешний вид разработанного приложения (рис.) играет ключевую роль в обеспечении комфортного и эффективного взаимодействия пользователей с системой. Особое внимание уделено созданию простого, интуитивно понятного и эргономичного интерфейса, способствующего быстрому освоению и снижению когнитивной нагрузки на преподавателя или куратора.



Рисунок – Интерфейс локального мобильного приложения для преподавателя и куратора

Важной характеристикой является способность интерфейса автоматически адаптироваться под экраны разного размера и разрешения. Названия кнопок и меню соответствуют общепринятым правилам именования и широко используются аналогами, известными широкой аудиторией. Например, кнопка добавления нового комментария обозначается пиктограммой «+», а кнопка удаления сопровождается символом корзины. Специальные окна подтверждения запрашиваются перед выполнением критичных операций, таких как удаление записей о посещаемости студента, предотвращая необратимую потерю важной информации.

Оценка успешности внедрения разработанного локального мобильного приложения проведена на основании совокупности модульных и приемочных тестов, эмпирических наблюдений, а также анкетирования пользователей. Эксперимент продолжительностью один семестр (17 недель) проводился с участием пяти преподавателей и трех кураторов академических групп первого и второго курсов кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Пензенского государственного университета. Общее количество студентов, занимающихся у выбранных педагогов, составило 384 человека. Для повышения точности результатов выполнен статистический расчет требуемого числа респондентов. Исходя из заданных критериев уровня значимости  $\alpha = 0,05$ , мощности  $(1 - \beta) = 0,80$  и ожидаемой величины эффекта  $d = 0,50$ , минимальное необходимое количество участников определено равным 122 студентам. Таким образом, общий объем выборочной совокупности существенно превосходит указанный порог, обеспечивая надежность выводов даже при учете вероятных выбывающих субъектов вследствие нарушения условий проведения эксперимента.

Модульные тесты представляют собой проверку отдельных фрагментов программного кода [17]. Целью тестирования является верификация каждой отдельной составляющей приложения, удостоверившись в точности и правильности выполнения заданных функций. Данный этап позволяет своевременно обнаруживать потенциальные ошибки и устранять дефекты, способные негативно повлиять на функционирование всего приложения. Ключевыми показателями качества, оцениваемыми в ходе модульных тестов, являются:

- точность обработки введенных данных;
- коррекция выполнения операций по передаче данных в ЭИОС;
- структурная целостность и совместимость компонентов друг с другом;
- надежность защиты персональных данных пользователей;
- стабильность работы приложения при повышенной нагрузке.

Итоги модульного тестирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты модульного тестирования

Критерий оценки	Методы измерения	Результат
Точность обработки введенных данных	Модуль аутентификации прошел серию из 816 проверок на ввод различных типов учетных данных, включая корректные и ошибочные варианты	Правильность идентификации 100 %
Коррекция выполнения операций по передаче данных в ЭИОС	Проверка функционала сохранения данных выполнялась на данных о 384 студентах. Процедура маркирования присутствия студентов проходила дважды в неделю, формируя общий массив данных размером 13056 записей	Совпадение внесенной и обработанной информации 100 %. Отсутствие потерь или искажений данных при больших нагрузках 100 %
Структурная целостность и совместимость компонентов друг с другом	Проверка общей структуры приложения выполнялась путем интегрального тестирования взаимосвязанности основных модулей на серии из 1536 симуляций нагрузок	Отсутствие конфликтов между элементами системы 100 %
Надежность защиты персональных данных пользователей	Проверка несанкционированного доступа выполнялась путем моделирования 100 ситуаций взлома системы	Уровень безопасности 99 %
Стабильность работы приложения при повышенной нагрузке	Проверка возможности одновременной активности большого числа пользователей выполнялась стресс-тестами, моделирующими 1000 одновременно работающих клиентов	Количество успешных транзакций в минуту $\approx$ 850, максимальная пропускная способность 1000 запросов/секунду (при пиковых нагрузках)

Приемочные тесты нацелены на оценку соответствия готового продукта заявленным требованиям и спецификациям, обозначенным на стадии планирования проекта [18]. Задача тестов состоит в определении того, насколько успешно мобильное приложение решает поставленные задачи и достигает ожидаемых результатов. Основной упор сделан на следующие критерии:

- соответствие функциональности ожидаемым результатам;
- удобство и эргономичность пользовательского интерфейса;
- скорость отклика приложения и его производительность.

Итоги приемочного тестирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты приемочного тестирования

Критерий оценки	Методы измерения	Результат
Соответствие функциональности ожидаемым результатам	Автоматическое тестирование в формате UI-теста, ручное тестирование сценариев использования	Покрытие требований автоматизированными тестами 95 %, доля исправленных критических дефектов 99 %, успешное выполнение сценария 100 %
Удобство и эргономичность пользовательского интерфейса	Юзабилити-тесты с привлечением преподавателей и кураторов	Ошибки, возникающие у пользователей при взаимодействии с интерфейсом, менее 5 %
Скорость отклика приложения и его производительность	Измерение времени выполнения запросов, профилирование производительности	Среднее время отклика 0,28 секунд, максимальная временная задержка при пиковых нагрузках до 1,2 секунды

Полученные данные (табл. 2) подтверждают соблюдение требуемого уровня работоспособности локального мобильного приложения в условиях значительного объема динамической нагрузки. Статистические показатели устойчивости (табл. 2) доказывают, что приложение может обеспечить преподавателям и кураторам непрерывную поддержку учебных процедур, повышая при этом оперативность выполняемых действий и снижая риск ошибок.

Для оценки эффективности внедрения локального мобильного приложения учета посещаемости студентов в условиях отсутствия интернет-соединения проанализированы конкретные показатели, полученные в ходе эмпирических наблюдений и измерений. Дополнительно к основной экспериментальной группе сформировано сопоставимое число участников контрольной группы, состоящей

из пяти преподавателей и трех кураторов кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Пензенского государственного университета. Во избежание смешивания факторов влияния и достижения максимальной чистоты эксперимента преподаватели контрольной группы осуществляли учет посещаемости также у 384 студентов исключительно традиционными методами – записью в бумажные журналы.

К основным показателям эффективности, измеряемым в ходе эксперимента, относятся:

- среднее время, затраченное преподавателем на фиксацию посещаемости студентов на одной паре;
- количество ошибочных записей на одну пару учебных занятий;
- средняя нагрузка преподавателя/куратора в конце семестра, связанная с подготовкой итоговых отчетов и ведомостей посещаемости;
- процент посещаемости занятий каждым учащимся за семестр.

Результаты расчета показателей эффективности представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели эффективности

Показатели	Результаты в контрольной группе	Результаты в экспериментальной группе
Среднее время, затраченное преподавателем на фиксацию посещаемости, мин.	4,3	2,15
Количество ошибочных записей	2	1
Средняя нагрузка преподавателя /куратора в конце семестра, ч	3,1/4,8	1,2/2,6
Процент посещаемости занятий, %	79	82

Значительное сокращение времени (на 50 %), необходимого преподавателям экспериментальной группы для фиксации посещаемости студентов, обусловлено рядом технологических особенностей применяемого мобильного приложения. Удобный интерфейс программы позволяет мгновенно регистрировать факт присутствия или отсутствия учащегося простым касанием экрана устройства. Автоматизация формирования статистической отчетности и ведомостей, предусмотренная мобильным приложением, дополнительно облегчает работу преподавателей и кураторов, позволяя избежать трудоемких операций обработки большого объема данных вручную. Что касается снижения числа пропусков занятий студентами у преподавателей экспериментальной группы, точные причины этого явления остаются неясными. Гипотеза заключается в повышении информированности кураторов о случаях пропусков занятий учащимися. База данных ЭИОС своевременно обновляется информацией о посещаемости, что позволяет куратору немедленно реагировать на факты отсутствия и предпринимать соответствующие профилактические меры. Такая оперативность реакции потенциально уменьшает риск дальнейших пропусков занятий студентами по неуважительным причинам, поскольку своевременное вмешательство создает условия для своевременного исправления ситуации. Однако данную гипотезу необходимо подтвердить дополнительными научными исследованиями. Вполне вероятно, что существуют иные факторы, влияющие на уровень посещаемости, такие как индивидуальные особенности мотивации студентов или организационные измерения внутри учебного заведения, которые требуют отдельного изучения.

Завершающим этапом оценивания выступает систематический мониторинг степени удовлетворенности пользователей локальным мобильным приложением. Для этого используются специально подготовленные анкеты, содержащие пункты в рамках шкалы Лайкерта, каждый из которых имеет четкую формулировку и однозначное понимание критериев оценки. Для минимизации влияния субъективизма экспертов, в лице преподавателей и кураторов экспериментальной группы, и сохранения четкости различий в оценках установлены три фиксированных уровня интерпретации ответов:

- 1 – низкий уровень удовлетворенности;
- 2 – умеренный уровень удовлетворенности;
- 3 – высокий уровень удовлетворенности.

Анкетирование охватывает ключевые критерии восприятия пользователями качества разработанного программного продукта, среди которых выделяются:

- общая удовлетворенность функциональностью локального мобильного приложения;
- простота и доступность понимания графического интерфейса приложения;
- доверие к обеспечению информационной безопасности хранимых персональных данных;
- качество реализации интеграции приложения с ЭИОС.

Надежность измерительной модели анкетирования обеспечена высокими показателями коэффициента внутренней структуры альфа Кронбаха ( $Cronbach's \alpha = 0,821$ ). Исследование базируется на обработке 54 анкет, заполненных преподавателями и кураторами экспериментальной группы,

а также сотрудниками Пензенского государственного университета, работающими в тестовом режиме в течение двух недель с локальным мобильным приложением. Результаты расчета средних значений удовлетворенности, представленные в таблице 4, демонстрируют высокое одобрение со стороны пользователей.

Таблица 4 – Результаты анкетирования

Критерий оценки	Результат
Общая удовлетворенность функциональностью локального мобильного приложения	Средний балл удовлетворенности 2,76
Простота и доступность понимания графического интерфейса приложения	Средний балл удовлетворенности 2,75
Доверие к обеспечению информационной безопасности хранимых персональных данных	Средний балл удовлетворенности 2,92
Качество реализации интеграции приложения с ЭИОС	Средний балл удовлетворенности 2,91

Большинство респондентов подчеркнули важность и пользу интеграции с ЭИОС. Небольшая доля опрошенных отметила некоторые затруднения при первом знакомстве с приложением, преимущественно связанные с настройками аккаунтов. Кроме этого, несколько преподавателей предложили добавить возможность персонализации настройки внешнего вида приложения для удобства пользователей.

Указанные замечания играют важную роль при дальнейшем совершенствовании локального мобильного приложения и представляют конструктивную основу для выявления потенциальных направлений оптимизации функциональных возможностей и улучшения пользовательского опыта.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно утверждать, что разработка и внедрение локального мобильного приложения для учета посещаемости студентов показало свою успешность и практическую пользу. Проведенные исследования продемонстрировали существенное снижение нагрузки на преподавателей и кураторов при использовании приложения. Кроме этого, экспериментальные результаты подтвердили высокую эффективность предложенных технических решений, основанных на архитектуре *Local-First*, что сделало приложение надежным инструментом в условиях ограниченной доступности интернета. Дальнейшие перспективы исследования связаны с созданием мощных аналитических инструментов для прогнозирования и предупреждения пропусков занятий по неубажительной причине.

#### Список источников

1. Пакулина, С. А. Классификация, содержание и специфика ситуаций адаптации студентов в процессе их обучения в вузе / С. А. Пакулина // *Инновации в образовании*. – 2011. – № 10. – С. 117–132.
2. Ansari, A. Absenteeism in the first decade of education forecasts civic engagement and educational and socioeconomic prospects in young adulthood / A. Ansari // *J. Youth Adolesc.* – 2020. – Vol. 49. – P. 1835–1848. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10964-020-01272-4>.
3. Saparkhojayev, N. Attendance Control System based on RFID-technology / N. Saparkhojayev // *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*. – 2012. – Vol. 9. – P. 227.
4. Ula, M. A new model of the student attendance monitoring system using rfid technology / M. Ula // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1807, № 1. – P. 12–26.
5. EL Fadel, N. Facial Recognition Algorithms: A Systematic Literature Review / N. EL Fadel // *J. Imaging*. – 2025. – Vol. 11. – P. 58. – URL: <https://doi.org/10.3390/jimaging11020058>.
6. Kommey, B. SwyftApp: An NFC based attendance system using fingerprint authentication / B. Kommey // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. – 2018. – Vol. 10. – P. 23–39. – URL: <https://doi.org/10.4314/ijest.v10i1.3>.
7. Talip, B. A. Mobile attendance system using QR codes technology / B. A. Talip // *Journal of Computing Technologies and Creative Content*. – 2018. – Vol. 3, № 1. – P. 1–3.
8. Perwitasari, I. D. QR Code Based Attendance System as an Innovation for High School Management / I. D. Perwitasari // *Journal of Informatics Management and Information Technology*. – 2024. – Vol. 4, № 4. – P. 158–163. – URL: <https://doi.org/10.47065/jimat.v4i4.417>.
9. Hartono, T. The importance increasing attendance efficiency accuracy with presence system in era industrial revolution 4.0 / T. Hartono // *International Journal of Cyber and IT Service Management*. – 2024. – Vol. 4, № 2. – P. 133–142. – URL: <https://doi.org/10.34306/ijcitsm.v4i2.168>.
10. Ali, N. S. Automated attendance management systems: systematic literature review / N. S. Ali // *International Journal of Technology Enhanced Learning*. – 2022. – Vol. 14. – P. 37–65.
11. Глуховский, К. С. Электронный журнал как элемент цифровой трансформации вуза / К. С. Глуховский // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 5 (77). С. 186–196.
12. Fan, J. A big data and neural networks driven approach to design students management system / J. Fan // *Soft Comput.* – 2024. – Vol. 28. – P. 1255–1276. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09524-8>.

13. Козловская, М. А. Разработка системы подсчета студентов в аудитории на основе сверточной нейронной сети / М. А. Козловская // Российская наука, инновации, образование-РОСНИО-2022. – 2022. – С. 125–130.
14. CaytairoSilva, N. E. Optimizing Attendance Management in Educational Institutions Through Mobile Technologies: A Machine Learning and Cloud Computing Approach / N. E. CaytairoSilva // International Journal of Interactive Mobile Technologies. – 2024. – Vol. 18, № 12. – URL: <https://doi.org/10.3991/ijim.v18i12.46917>.
15. Dedania, Y. Cloud-Powered Attendance Solutions: Streamlining Hourly Tracking with Facial Recognition on AWS / Y. Dedania // Communications in Computer and Information Science. – 2025. – Vol. 2073. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-84059-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-84059-3_18).
16. Бурукина, И. П. Комплексный подход к оценке эффективности онлайн-курсов для принятия решений по оптимизации образовательного процесса / И. П. Бурукина // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2025. – № 2. – С. 107–121. – URL: <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2025-2-9>.
17. Manish, S. A Multi-Faceted Approach to Measuring Engineering Productivity / S. Manish // International Journal of Trend in Scientific Research and Development. – 2024. – Vol. 8, № 5. – P. 516–521.
18. Wang, J. Software testing with large language models: Survey, landscape, and vision / J. Wang // IEEE Transactions on Software Engineering. – 2024. – Vol. 50, № 4. – P. 911–936. – URL: <https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3368208>.

#### References

1. Pakulina, S. A. Classification, content and specificity of student adaptation situations in the process of their studies at a university. *Innovations in education*, 2011, no. 10, pp. 117–132 (In Russ.).
2. Ansari, A., Hofkens, T. L., Pianta, R. C. Absenteeism in the first decade of education forecasts civic engagement and educational and socioeconomic prospects in young adulthood. *J. Youth Adolesc.*, 2020, vol. 49, pp. 1835–1848. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10964-020-01272-4>.
3. Saparkhojayev, N., Guvercin, S. Attendance Control System based on RFID-technology. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 2012, vol. 9, p. 227.
4. Ula, M. A new model of the student attendance monitoring system using rfid technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1807, no. 1, pp. 12–26.
5. EL Fadel N. Facial Recognition Algorithms: A Systematic Literature Review. *J. Imaging*, 2025, vol. 11, p. 58. Available at: <https://doi.org/10.3390/jimaging11020058>.
6. Kommey, B., Anyane-Lah, O., Amuzu, W. SwyftTapp: An NFC based attendance system using fingerprint authentication. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2018, vol. 10, pp. 23–39. Available at: <https://doi.org/10.4314/ijest.v10i1.3>.
7. Talip, B. A., Zulkifli, M. Z. Mobile attendance system using QR codes technology. *Journal of Computing Technologies and Creative Content*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 1–3.
8. Perwitasari, I. D. QR Code Based Attendance System as an Innovation for High School Management. *Journal of Informatics Management and Information Technology*, 2024, vol. 4, no. 4, pp. 158–163. Available at: <https://doi.org/10.47065/jimat.v4i4.417>.
9. Hartono, T. The importance increasing attendance efficiency accuracy with presence system in era industrial revolution 4.0. *International Journal of Cyber and IT Service Management*, 2024, vol. 4, no. 2, pp. 133–142. Available at: <https://doi.org/10.34306/ijcitsm.v4i2.168>.
10. Ali, N. S., Alhilali, A. H., Rjeib, H. D., Alsharqi, H., Al-Sadawi, B. Automated attendance management systems: systematic literature review. *International Journal of Technology Enhanced Learning*, 2022, vol. 14, pp. 37–65.
11. Glukhovskiy, K. S., Pirozhkov, R. V., Tselik, E. A. Electronic journal as an element of the digital transformation of a university. *Engineering Bulletin of the Don*, 2021, no. 5 (77), pp. 186–196 (In Russ.).
12. Fan, J. A big data and neural networks driven approach to design students management system. *Soft Comput.*, 2024, vol. 28, pp. 1255–1276. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09524-8>.
13. Kozlovskaya, M. A., Voloshchuk, V. I., Melnik, Ya. E. Development of a system for counting students in a classroom based on a convolutional neural network. *Russian Science, Innovation, Education-ROSNIO-2022*, 2022, pp. 125–130 (In Russ.).
14. CaytairoSilva, N. E. Optimizing Attendance Management in Educational Institutions Through Mobile Technologies: A Machine Learning and Cloud Computing Approach. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 2024, vol. 18, no. 12. Available at: <https://doi.org/10.3991/ijim.v18i12.46917>.
15. Dedania, Y., Karia, V., Bhatt, N., Prajapati, P. Cloud-Powered Attendance Solutions: Streamlining Hourly Tracking with Facial Recognition on AWS. *Communications in Computer and Information Science*, 2025, vol. 2073. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-84059-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-84059-3_18).
16. Burukina, I. P. A comprehensive approach to evaluating the effectiveness of online courses. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*, 2025, no. 2, pp. 107–121. Available at: <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2025-2-9> (In Russ.).
17. Manish, S. A., Ishan, D. A. Multi-Faceted Approach to Measuring Engineering Productivity. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2024, vol. 8, no. 5, pp. 516–521.
18. Wang, J. Software testing with large language models: Survey, landscape, and vision. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2024, vol. 50, no. 4, pp. 911–936. Available at: <https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3368208>.

Статья поступила в редакцию 14.11.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 04.02.2026.

The article was submitted 14.11.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 04.02.2026.

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.934

## ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ РЕЧИ ПРИ РЕАБИЛИТАЦИИ

**Новохрестова Дарья Игоревна**, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Российская Федерация, г. Томск, ул. Ленина, 40, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-4931-1681, e-mail: ndi@fb.tusur.ru

**Костюченко Евгений Юрьевич**, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Российская Федерация, г. Томск, ул. Ленина, 40, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-8000-2716, e-mail: key@fb.tusur.ru

**Томилина Светлана Дмитриевна**, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Российская Федерация, г. Томск, ул. Ленина, 40, аспирант, ORCID: 0009-0002-2526-6377, e-mail: tsd@fb.tusur.ru

**Красавина Елена Александровна**, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Российская Федерация, г. Томск, ул. Ленина, 40; Научно-исследовательский институт онкологии – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук», 634009, Российская Федерация, г. Томск, пер. Кооперативный, 5, кандидат биологических наук, ORCID: 0000-0002-8553-7039

**Чойнзонов Евгений Лхамациренович**, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Российская Федерация, г. Томск, ул. Ленина, 40; Научно-исследовательский институт онкологии – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук», 634009, Российская Федерация, г. Томск, пер. Кооперативный, 5, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, ORCID: 0000-0002-3651-0665

В настоящей статье представлена технология комплексного оценивания речи, разработанная для повышения объективности и эффективности речевой реабилитации у пациентов после хирургических вмешательств в органы речевого тракта (в частности при онкологических заболеваниях полости рта и ротоглотки). Предложенная технология позволяет преодолевать недостатки традиционных субъективных методов за счет стандартизированного набора речевых материалов (слоги, гласные, счет, короткие и длинные фразы), автоматизированного модульного анализа с использованием современных алгоритмов. В состав системы входят пять методов оценки различных речевых единиц: оценка слогов на основе метрик схожести и на основе нейронных сетей (ResNet), оценка речи путем автоматического распознавания (с использованием расстояния Левенштейна), а также анализ параметрических характеристик голоса и речи. Итоговая оценка формируется путем взвешенного комбинирования частных оценок с учетом клинического контекста и возможного отсутствия отдельных типов речевого материала. Технология частично реализована в виде двух программных модулей – для записи и анализа – с перспективой перехода к клиент-серверной архитектуре, что обеспечит ее большую применимость как в медицинских учреждениях, так и в условиях телемедицины.

**Ключевые слова:** анализ речи, речевая реабилитация, технология анализа, анализ речевых сигналов, комбинированная оценка

**Финансирование:** данная работа выполнялась в рамках Программы развития ТУСУР на 2025–2036 годы Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

## TECHNOLOGY FOR COMPREHENSIVE SPEECH ASSESSMENT IN REHABILITATION

**Novokhrestova Daria I.**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0002-4931-1681, e-mail: ndi@fb.tusur.ru

**Kostyuchenko Evgeniy Y.**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0001-8000-2716, e-mail: key@fb.tusur.ru

**Tomilina Svetlana D.**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russian Federation, graduate student, ORCID: 0009-0002-2526-6377, e-mail: tsd@fb.tusur.ru

*Krasavina Elena A.*, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russian Federation; Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, 5 Kooperativny Street, Tomsk, 634009, Russian Federation, Cand. Sci. (Biological), ORCID: 0000-0002-8553-7039

*Choynzonov Evgeny L.*, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russian Federation; Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, 5 Kooperativny Street, Tomsk, 634009, Russian Federation

Doct. Sci. (Medicine), Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences, ORCID: 0000-0002-8553-7039

This article presents a comprehensive speech assessment technology developed to improve the objectivity and effectiveness of speech rehabilitation in patients following vocal tract surgery (particularly for oncological diseases of the oral cavity and oropharynx). The proposed technology overcomes the shortcomings of traditional subjective methods by using a standardized set of speech data (syllables, vowels, counting, short and long phrases) and automated modular analysis using modern algorithms. The system includes five methods for assessing various speech units: syllable assessment based on similarity metrics and neural networks (ResNet), speech assessment through automatic recognition (using the Levenshtein distance), and analysis of parametric characteristics of voice and speech. The final assessment is formed by a weighted combination of individual assessments, taking into account the clinical context and the possible absence of certain types of speech data. The technology is partially implemented in the form of two software modules—for recording and analysis—with the potential to transition to a client-server architecture, which will ensure its greater applicability both in medical institutions and in telemedicine settings.

**Keywords:** speech analysis, speech rehabilitation, analysis technology, speech signal analysis, combined assessment

*Financial support:* this work was carried out within the framework of the TUSUR Development Program for 2025-2036 of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030”.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Речь – один из ключевых факторов, влияющих на качество жизни человека. Эта функция влияет как на возможность сохранять работоспособность в трудовом возрасте, так и на повседневную деятельность человека, включающую межличностное общение. Нарушения речевой функции существенно снижают качество жизни, поэтому повышение эффективности методов речевой и голосовой реабилитации являются актуальной междисциплинарной темой для исследования. Процесс речевой и голосовой реабилитации, в рамках которого требуется оценка качества речи, является необходимым и обязательным этапом процесса лечения различных заболеваний органов, прямо или косвенно связанных с речью, в частности онкологических заболеваний органов полости рта и ротоглотки, заболевания щитовидной железы, требующие хирургического вмешательства в органы речепроизводства и др. Развитие современных технологий привело к возможности создавать методы реабилитации, в частности методы оценки речи в реабилитации, которые позволяют минимизировать участие профильных специалистов – логопедов, фоноiatров и др., а также индивидуально донастраивать методы под особенности каждого пациента: его изначальные особенности речи, заболевания, характер и степень тяжести произошедших изменений речи.

Традиционные методы оценки речи (клинические шкалы, логопедические таблицы) построены на субъективной оценке специалиста по реабилитации, и зачастую оценка проводится путем оценивания непосредственно в момент произношения речевых единиц или в процессе прослушивания аудиозаписей. Повышение объективности такой оценки возможно только за счет привлечения большего количества специалистов, что в условиях большинства больниц или профильных центров не представляется возможным. Большинство шкал требуют значительных временных затрат на проведение оценки и интерпретацию результатов, что делает их непрактичными для частого мониторинга. Ранее применяемая методика экспертной оценки речи основана на модернизированной методике оценки разборчивости речи, описанной в ГОСТ Р 50840-95 Передача речи по трактам связи [1].

Также к недостаткам традиционных методов можно отнести малую шкалу оценки (чаще всего две или три оценки – хорошо/плохо, хорошо/средне/плохо), низкую воспроизводимость (особенно в ситуации с оцениванием в момент произношения) и ограниченную способность к фиксации динамики восстановления речи. На текущий момент исследования, которые предлагают сформулировать единый подход к набору речевых сигналов, который бы служил единым стандартом для анализа в процессе речевой реабилитации, находятся на начальных этапах. Специалисты-логопеды используют в своей работе наборы речевых материалов для записи из смежных областей, что ведет к низкой воспроизводимости анализа и вызывает вопросы по обоснованности использования тех или иных речевых структур.

Использование характеристик голоса и речи в медицине как для диагностики заболеваний, так и в процессе лечения получило распространение с развитием современных технологий.

Так, например, расчет мультипараметров голоса (оценка, содержащая в себе расчет и комбинацию нескольких классических параметров речевого сигнала) используется для распознавания нарушений речи [2]. Анализ речи применяется при диагностике ранних стадий заболеваний Паркинсона [3], дисфонии [4] или после тотальной или частичной тиреоидэктомии [5].

В данной статье предлагается концепция технологии комплексного оценивания речи при реабилитации, основанная на стандартизированном сборе речевых данных, модульной обработке с использованием современных алгоритмов и расчете комбинированной оценки с взвешиванием частных оценок с учётом клинического контекста. Эта технология предлагается для реализации в составе комплекса программ, которые будут служить поддержкой в принятии решений в процессе речевой реабилитации. Разрабатываемая технология позволит повысить эффективность процесса речевой и голосовой реабилитации за счет автоматизации процесса записи, анализа и оценки речи.

**Цель исследования** – разработка и начальная формализация технологии комплексного оценивания речи пациентов в процессе медицинской речевой реабилитации.

#### ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ РЕЧИ

В общем процесс оценивания речи можно описать последовательным выполнением следующих шагов:

1. Запись речевых сигналов.
2. Предварительная обработка речевых сигналов.
3. Оценка речевых сигналов по видам сигналов (для разных речевых единиц – разные алгоритмы).
4. Расчет комплексной оценки речи.

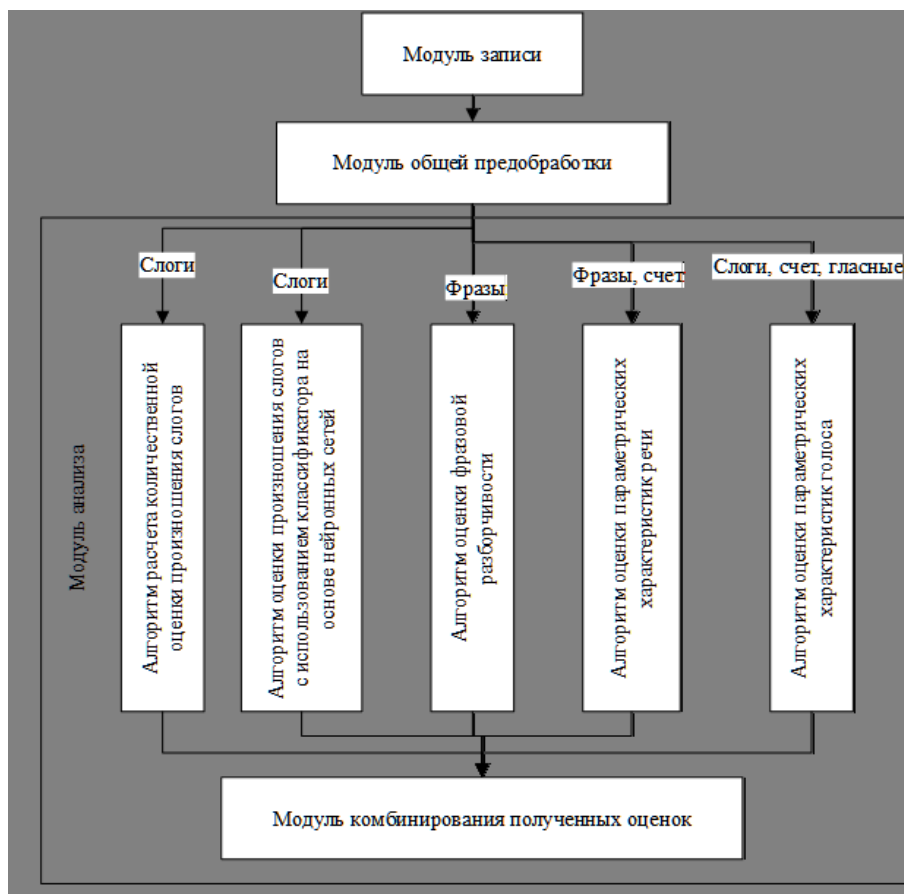


Рисунок – Общая структура технологии комплексного оценивания речи в медицинской речевой реабилитации

Рассмотрим структуру предлагаемой технологии в виде соотношения модулей, реализующих соответствующие шаги, и особенности реализации каждого из шагов в рамках разрабатываемой технологии. Общая структура технологии представлена на рисунке. Предполагается реализация технологии в виде комплекса из двух программ и базы данных для хранения аудиозаписей и сопутствующей информации (данные пациентов, данные сеансов записей, оценки аудиозаписей, информация о наборах речевых сигналов). Первая из разрабатываемых программ предназначена для записи аудиосигналов, вторая – для анализа аудиозаписей. Такое разделение вызвано различными

техническими возможностями в кабинетах медицинских учреждений, где происходит работа с пациентами, а именно программа для записи является максимально простой в плане требований к компьютерному оборудованию. В дальнейшем предполагается реализация представленной технологии в виде клиент-серверного приложения, которое также добавит возможность удаленной записи аудиосигналов пациентами без посещения кабинета логопеда или иного речевого специалиста.

### **ЗАПИСЬ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ**

Для того чтобы анализировать речевые сигналы, необходимо сформировать эти самые речевые сигналы. Запись речевых сигналов проводится в рамках сеансов работы с логопедом, фониатром или любым другим специалистом, занимающимся вопросами речевой реабилитации. В виду особенностей организации подобных сеансов работы, фактически представляющих собой прием у врача, запись большого количества речевого материала не представляется возможным из-за ограничений по времени. Поэтому поставлена задача формулирования универсального (с учетом текущих рассматриваемых речевых нарушений) набора речевых материалов, который, с одной стороны, позволит разносторонне оценивать параметры и характеристики голоса и речи, а с другой – не будет занимать большого количества времени для записи.

Совместно с медиками и специалистами по анализу речи был сформирован следующий набор речевых материалов для записи:

- 1) слоги – 90 слогов для записи с наиболее проблемными фонемами с учетом рассматриваемых заболеваний – оценка артикуляции, параметров голоса;
- 2) счет от 1 до 10 (от 1 до 25) – оценка параметров голоса и речи, артикуляции;
- 3) гласные (длительное произношение А, О, И) – оценка параметров голоса;
- 4) фразы (по 3 длинных и коротких фраз) – оценка разборчивости речи, параметров речи.

Пример короткой фразы: Как кот катит клубок.

Пример длинной фразы: Один, два, три. Эти жирные сазаны ушли под палубу.

Данный набор предназначен именно для ситуаций, когда к нарушениям речи приводят физические вмешательства в органы речевого тракта или сопутствующие органы, вариант неврологических причин нарушений речи в рамках данной технологии сейчас не рассматривается, однако планируется к рассмотрению на дальнейших этапах исследования. Записываемый речевой материал совпадает с материалом, работа с которым осуществляется в рамках приема, поэтому нет дополнительных затрат времени для знакомства с записываемым материалом. Общее время для записи составляет не более 5 минут (с учетом среднего состояния речи пациента и знанием особенностей записи каждого вида речевых единиц). Предполагается возможность записи речевого материала как через разрабатываемую программу для записи, так и добавление уже записанного ранее речевого материала.

### **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ**

Для возможности дальнейшего анализа речевых сигналов предусмотрен модуль предварительной предобработки. Причем есть как обязательные компоненты модуля, так и опциональные, в зависимости от анализируемых аудиозаписей.

Обязательные компоненты модуля:

- нормализация громкости;
- стандартизация параметров аудиосигнала (приведение к стандартной частоте и моноформату).

Данные преобразования не изменяют изначальную аудиозапись, а лишь создают «стандартизованную» копию. Из минусов такого подхода можно отметить увеличение требуемого места для хранения аудиосигналов. Однако плюсом является возможность изменения алгоритмов расчета без потери имеющего набора возможных для анализа данных. Так как вопрос о наборах данных для анализа в этой сфере исследования является очень болезненным, любая возможность сохранения пригодных для обработки данных является обязательной для реализации. Так, ранее для анализа применялся алгоритм, который работал только с частотой дискретизации 11кГц (что не является стандартной частотой). Запись аудиосигналов с частотой дискретизации 44кГц и дальнейшее их преобразование в нужную частоту с сохранением исходного сигнала позволило сравнить новый и старый алгоритмы между собой.

Опциональные компоненты модуля предобработки сигналов:

- сегментация сигнала – для случаев записи нескольких речевых единиц в один аудиофайл;
- добавление или удаление пауз или тишины в сигнале – некоторые алгоритмы требуют наличия обязательных периодов тишины в аудиозаписи, что не всегда возможно к реализации в момент записи;
- фильтрация шумов – данная опция является необязательной, так как ее необходимость зависит от условий записи, а также состояния речи пациента (чем хуже речь, тем сильнее ее можно исказить алгоритмами шумоочистки).

### АНАЛИЗ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

Для разных типов аудиосигналов, а точнее речевых единиц, содержащихся в аудиосигналах, разработаны разные алгоритмы анализа. На текущий момент внутри модуля анализа речевых сигналов реализовано 5 подходов/алгоритмов.

*Анализ произношения слогов на основе метрики схожести* – алгоритм расчета количественной оценки произношения слогов [6]. Данный алгоритм предназначен только для оценки слогов и основан на расчете метрики схожести эталонного произношения слогов с текущим произношением. При этом изначальная методика подразумевает возможность сравнения аудиозаписей, принадлежащих только одному и тому же пациенту. Было разработано расширение данной методики на случай невозможности записи эталонных записей пациента, а именно сравнение с группой здоровых пациентов и усреднение получаемых оценок. В случае сравнения аудиозаписей пациента с самим собой есть возможность учета индивидуальных особенностей речи этого пациента, однако обстоятельства реального применения методики привели к необходимости расширения подхода. На выходе данного алгоритма для каждой аудиозаписи, содержащей слог, формируется оценка от 0 до 1, где чем ближе к 1, тем более качественно (более схоже с эталоном) произнесен слог. Точность представленной методики составляет 83,3 % в сравнении с оценками, выставляемыми экспертами-логопедами. Дополнение методики применением расширенного набора метрик оценки и классификатора К-ближайших соседей позволило увеличить точность примерно до 90 % [7].

*Анализ произношения слогов на основе применения нейронных сетей.* Данный алгоритм представляет собой применение обученной нейросети архитектуры ResNet для анализа изображений аудиосигнала – спектрограмм сигнала. Нейросеть была обучена на имеющемся наборе данных аудиозаписей пациентов, проходящих речевую реабилитацию после гемоглосэктомии с реконструкцией и без реконструкции. Один из подходов заключался в обучении на 2 класса: класс 1 – записи до хирургического вмешательства – качественная речь; класс 0 – записи после хирургического вмешательства – некачественная речь. В этом случае итоговой оценкой аудиозаписи, подаваемой на вход нейросети в виде спектрограммы, является степень принадлежности классу 1, чем больше степень принадлежности, тем более качественная речь. Оценка также лежит в интервале от 0 до 1. Точность данного подхода составила 0,7 в сравнении с экспертными оценками. Такая невысокая точность для бинарной классификации обосновывается наличием в наборе данных аудиозаписей с разных этапов реабилитации (как с начальных этапов, когда речь малоразборчива, так и с промежуточных этапов, когда речь частично восстановлена).

Иной подход к формированию набора данных для обучения и, соответственно, классов заключался в формировании трех классов аудиосигналов: речь до операции, речь после операции, но до реабилитации, и речь после реабилитации. Самая худшая речь во втором случае, самая качественная речь в первом случае (на практике подтверждено, что невозможно при наличии хирургических вмешательств в органы речевого тракта вернуть речь на предоперационный уровень). Такой подход показал достаточную точность классификации на три класса, а именно 0,69 при условии использования мел-спектрограмм [8]. Однако в этом случае оценка представляет собой лишь одно из трех возможных значений: 0, если класс «речь после операции»; 0,5, если класс «речь после реабилитации»; 1, если класс «речь до операции». Это говорит о практически полной невозможности получения оценки 1 для речи в процессе реабилитации, и возникает вопрос об интерпретируемости ошибок. Данный подход планируется к доработке с учетом расширения наборов данных.

*Анализ фразовой разборчивости.* Для оценки разборчивости произношения фраз применяется система автоматического распознавания речи. Метрикой оценки разборчивости предлагается использование расстояния Левенштейна между распознанной строкой (фразой) и тем, что должно было быть произнесено. Но так как расстояние Левенштейна интерпретируется «чем меньше, тем лучше» и есть пожелание по единой интерпретации получаемых оценок во всех алгоритмах, то итоговая оценка разборчивости  $E_p$  может быть представлена как:

$$E_p = \frac{\max(m,n) - L(p_r, p_e)}{\max(m,n)}, \quad (1)$$

где  $p_r$  – распознанная строка длиной  $m$ ;

$p_e$  – строка, которая должна была быть произнесена длиной  $n$ ;

$L(p_r, p_e)$  – расстояние Левенштейна;

$\max(m, n)$  – максимальное значение из  $m$  и  $n$ .

Итоговая оценка лежит в интервале от 0 до 1, где 0 – фраза была распознана полностью неправильно, 1 – фраза была распознана полностью правильно. Применимость данного подхода к оценке разборчивости описана в [9], где сравниваются две системы распознавания речи на пищеводном голосе пост-онкологических больных. Также в качестве возможных оценок будут исследованы такие метрики, как Word Error Rate (WER), Character Error Rate (CER) и Sentence Error Rate (SER).

*Анализ параметрических характеристик голоса.* В то время как предыдущие модули уже имеют полную или частичную реализацию, оставшиеся два модуля на текущий момент находятся в процессе исследования. Работы других исследователей [10–12] подтверждают, что параметры голоса подвержены изменениям при различных заболеваниях, в том числе анализ параметров позволяет диагностировать неврологические, психические и иные болезни. Однако если говорить в контексте онкологических больных, то оценка изменчивости и возможности восстановления параметров голоса пациентов ранее не была исследована. Предполагается, что после проведения исследований получится сформировать список параметров речевого сигнала, который позволит оценивать голос в процессе речевой реабилитации после хирургического вмешательства в органы речевого тракта. Особенно это будет актуально в случае большого объема хирургического вмешательства или в ситуациях необходимости формирования альтернативного способа голосообразования (например, пищеводный голос). Реализация расчетов параметров голосового сигнала предполагается с использованием библиотеки Parselmouth [13] по аналогии с модулем программно-аппаратного комплекса анализа и коррекции речи [14].

*Анализ параметрических характеристик речи.* В ситуациях, когда пациенту приходится заново формировать свой голос, возникает необходимость оценки не только характеристик голоса, но и характеристик речи. Под характеристиками речи понимают естественность, ритмичность, выразительность речи. Данные характеристики не обязательны к расчетам и анализу, однако их оценка позволяет более комплексно подходить к речевой реабилитации и существенно улучшать речевую функцию пациентов. На текущий момент большинство исследований в области анализа естественности речи направлено на оценку систем синтеза речи для приближения качества синтезированной речи к человеческой, например [15], а ритмичность и выразительность оцениваются в задачах определения эмоциональной составляющей речевого сигнала [16, 17]. Эти подходы предлагается использовать для анализа речи пациентов. Предполагается наличие эталонных значений характеристик речи, и в рамках модуля будет оцениваться степень близости рассчитанных характеристик к эталону, учитывая контекст анализа.

#### **ПОЛУЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ**

После того как все алгоритмы завершили свою работу и рассчитали оценки отдельных характеристик речи пациента, эти оценки поступают на вход модуля комбинирования результатов. Здесь происходит интегрирование всех результатов. В текущей реализации модуль использует подход взвешенного среднего с учетом весового вектора, выстроенного с учетом особенностей того или иного заболевания, в рамках которого проводится речевая реабилитация.

Общий подход к комбинации оценок может быть описан следующей формулой (при условии нормализации оценок каждого из модулей в интервал от 0 до 1 с единой направленностью):

$$E = w_{syl} * E_{syl} + w_{nn} * E_{nn} + w_p * E_p + w_v * E_v + w_s * E_s, \quad (2)$$

$$w_{syl} + w_{nn} + w_p + w_v + w_s = 1,$$

где  $E$  – общая оценка речи пациента в интервале от 0 до 1;

$E_{syl}$  – оценка произношения слогов на основе метрики схожести;

$E_{nn}$  – оценка произношения слогов на основе применения нейронных сетей;

$E_p$  – оценка разборчивости речи;

$E_v$  – оценка параметров голоса;

$E_s$  – оценка параметров речи;

$w_{syl}, w_{nn}, w_p, w_v, w_s$  – веса соответствующих оценок.

Одновременно в рамках данного модуля предусматривается ситуация, когда у пациента нет некоторых типов записываемых речевых единиц. Например, когда пациент повторно проходит процедуру речевой реабилитации после повторного оперативного вмешательства (рецидив онкологического заболевания или из-за иных причин), у такого пациента может не быть записей фраз, счета или гласных с предыдущих сеансов. Также возможна ситуация, когда нет необходимости записывать некоторые речевые единицы, так как пациент физически не сможет произнести такую речевую единицу (например, при постановке пищеводного голоса на начальных этапах реабилитации у пациента нет возможности полноценного произношения длинных фраз). В этом случае у логопеда есть возможность настройки расчета комбинированной оценки, однако в качестве базового весового вектора берется вектор равнозначных весов. В качестве альтернативного подхода можно использовать бустинг или иные алгоритмы слияния, но это требует дополнительного исследования на применимость и адекватность получаемых результатов.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной статье представлена концепция технологии комплексного оценивания речи, разрабатываемой для повышения эффективности и объективности процесса речевой и голосовой реабилитации у пациентов после хирургических вмешательств в органы речевого тракта. Предложенная

технология позволяет устранить существенные недостатки традиционных методов оценки – субъективность, низкую воспроизводимость, ограниченную шкалу и высокие временные затраты – за счет стандартизации речевого материала, модульной архитектуры анализа и автоматизированного расчета количественных метрик.

Разработанная структура включает пять взаимодополняющих алгоритмов/подходов, каждый из которых ориентирован на оценку конкретного аспекта речевой функции: артикуляции (на основе слогов), разборчивости (через автоматическое распознавание фраз), параметров голоса и речи, а также применения нейросетевых подходов. Особое внимание уделено адаптивности системы: возможность взвешенного комбинирования оценок с учетом клинического контекста и гибкость при отсутствии отдельных типов речевого материала делают технологию применимой для реабилитации после различного рода нарушений речевой функции.

Реализация технологии в виде двух программных модулей – для записи и анализа – обеспечивает ее доступность в условиях медицинских учреждений с различным техническим оснащением, а перспектива перехода к клиент-серверной архитектуре открывает возможности для дистанционного мониторинга восстановления речи пациентов и увеличивает доступность реабилитации. Таким образом, предложенная технология не только способствует объективизации оценки речи, но и формирует основу для создания интеллектуальной поддержки принятия клинических решений, что в перспективе может значительно повысить качество жизни пациентов, сталкивающихся с речевыми нарушениями.

#### Список источников

1. ГОСТ Р 50840–95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200027288>.
2. Brockmann-Bauser, M. How well will AI Help Recognize Voice Disorders? A State-of-the-art Review of Current Acoustic Assessment Strategies and Future Applications / M. Brockmann-Bauser // *World Journal of Otorhinolaryngology – Head and Neck Surgery*. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.1002/wjo2.70015>.
3. Rachel, B. C. Analysis of Voice Changes in Early-Stage Parkinson’s Disease with AVQI and ABI: A Follow up Study / B. C. Rachel, Anne-Maria Laukkanen et al. // *Journal of Voice*. – URL: [https://www.jvoice.org/article/S0892-1997\(24\)00160-7/fulltext](https://www.jvoice.org/article/S0892-1997(24)00160-7/fulltext).
4. Elham, M. H. Assessment of dysphonia: cepstral analysis versus conventional acoustic analysis / M. H. Elham, F. A. Aisha et al. // *Logopedics Phoniatrics Vocology*. – 2020. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14015439.2020.1767202>.
5. Ivana, Š. P. Prospective Voice Assessment After Thyroidectomy Without Recurrent Laryngeal Nerve Injury / Š. P. Ivana, G. R. Ika et al. // *Brain Sciences*. – 2024. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4418/15/1/37>.
6. Новохрестова, Д. И. Методики и алгоритм анализа данных при оценке качества произношения слогов в процессе речевой реабилитации : специальность 05.13.17 «Теоретические основы информатики» : дис. ... канд. техн. наук / Д. И. Новохрестова. – 2022. – 171 с.
7. Novokhrestova, D. Classifier-Based Combined Measure of Syllable Pronunciation Similarity in Speech Rehabilitation / D. Novokhrestova, E. Kostyuchenko, A. Borovskoy // *Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’23), IITI 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. – Springer : Cham, 2023. – Vol. 777. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43792-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43792-2_13).
8. Novokhrestova, D. Classifier Based on Neural Networks to Determine the Patient’s Speech State / D. Novokhrestova, S. Tomilina, P. Laptev, E. Kostyuchenko // *Proceedings of the Eighth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’24), IITI 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*. – Springer : Cham, 2024. – Vol. 2. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-77411-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-77411-9_22).
9. Kostyuchenko, E. Automated Assessment of Phrase Intelligibility for Russian Speech Based on Esophageal Voice / E. Kostyuchenko // *Speech and Computer. SPECOM 2025. Lecture Notes in Computer Science*. – Springer : Cham, 2026. – Vol. 16187. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-032-07956-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-032-07956-5_16).
10. Вашкевич, М. И. Определение патологии голосового аппарата на основе анализа модуляционного спектра речи в критических полосах / М. И. Вашкевич, И. С. Азаров // *Труды СПИИРАН*. – 2020. – Вып. 19, т. 2. – С. 249–276.
11. Гагарин, А. А. Возможности акустического анализа голоса в диагностике хронических неинфекционных заболеваний: систематический обзор и метаанализ / А. А. Гагарин, О. Ю. Айдумова и др. // *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. – 2025.
12. Дудайты, Г. А. Динамика акустических параметров голоса у больных после антирефлюксных операций / Г. А. Дудайты, Л. В. Георгиева // *Российская оториноларингология*. – 2020. – С. 35–37.
13. Jadould, Yannick Parselmouth for bioacoustics: automated acoustic analysis in Python / Yannick Jadould et al. // *Bioacoustics*. – 2023. – P. 1–19.
14. Боровикова, Д. В. Разработка аппаратно-программного комплекса анализа и коррекции речи / Д. В. Боровикова, О. В. Гришин, А. В. Ненько, А. В. Юпашевский, А. С. Казьмина, А. В. Марков, К. А. Мецлер // *Системы анализа и обработки данных*. – 2021. – № 2 (82). – С. 135–145. – DOI 10.17212/2782-2001-2021-2-135-145.
15. Литовкин, С. А. Классификация голоса и речи с точки зрения естественности с помощью средств машинного обучения / С. А. Литовкин, П. Ю. Лаптев // *Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XXI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 23–26*

апреля 2024 года. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 88–90.

16. Щетинин, Е. Ю. Распознавание эмоций в речи человека с использованием глубоких нейронных сетей / Е. Ю. Щетинин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2021. – Т. 18, № 1 (199). – С. 44–51. – DOI 10.14489/vkit.2021.01.pp.044–051.

17. Balabanova, T. N. Using neural network technologies in determining the emotional state of a person in oral communication / T. N. Balabanova, D. I. Gaivoronskaya, A. N. Doborovich // Research Result. Theoretical and Applied Linguistics. – 2024. – Vol. 10, № 4. – P. 17–39.

#### References

1. *Standard GOST R 50840–95 Voice over paths of communication. Methods for assessing the quality, legibility and recognition*, 1995. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200027288> (In Russ.).

2. Brockmann-Bauser, M. How well will AI Help Recognize Voice Disorders? A State-of-the-art Review of Current Acoustic Assessment Strategies and Future Applications. *World Journal of Otorhinolaryngology – Head and Neck Surgery*, 2025. Available at: <https://doi.org/10.1002/wjo2.70015>.

3. Analysis of Voice Changes in Early-Stage Parkinson's Disease with AVQI and ABI: A Follow up Study. Rachel.B.C, Anne-Maria Laukkanen [and others]. *Journal of Voice*. Available at: [https://www.jvoice.org/article/S0892-1997\(24\)00160-7/fulltext](https://www.jvoice.org/article/S0892-1997(24)00160-7/fulltext) (accessed 11.09.2025).

4. Elham, M. H., Aisha, F. A. et al. Assessment of dysphonia: cepstral analysis versus conventional acoustic analysis / *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 2020. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14015439.2020.1767202>.

5. Ivana, Š. P., Ika, G. R. et al. Prospective Voice Assessment After Thyroidectomy Without Recurrent Laryngeal Nerve Injury. *Brain Sciences*, 2024. Available at: <https://www.mdpi.com/2075-4418/15/1/37>.

6. Novokhrestova, D. I. *Methods and algorithm for data analysis in assessing the quality of syllable pronunciation in the process of speech rehabilitation: specialty 05.13.17 "Theoretical Foundations of Computer Science": dissertation for the degree of candidate of technical sciences*, 2022. 171 p. (In Russ.).

7. Novokhrestova, D., Kostyuchenko, E., Borovskoy, A. Classifier-Based Combined Measure of Syllable Pronunciation Similarity in Speech Rehabilitation. *Proceedings of the Seventh International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'23). IITI 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham, 2023, vol. 777. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43792-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43792-2_13).

8. Novokhrestova, D., Tomilina, S., Laptev, P., Kostyuchenko, E. Classifier Based on Neural Networks to Determine the Patient's Speech State. In: Kovalev, S., Kotenko, I., Sukhanov, A., Li, Y., Li, Y. (eds) *Proceedings of the Eighth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'24), IITI 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham, 2024, vol. 2. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-77411-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-77411-9_22).

9. Kostyuchenko, E. Automated Assessment of Phrase Intelligibility for Russian Speech Based on Esophageal Voice. *Speech and Computer. SPECOM 2025. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, 2026, vol. 16187. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-07956-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-032-07956-5_16).

10. Vashkevich, M., & Azarov, I. Voice Pathology Detection based on Analysis of Modulation Spectrum in Critical Bands. *SPIRAS Proceedings*, 2020, issue 19, vol. 2, pp. 249–276. <https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.2.1>.

11. Garanin, A. A., Aidumova, O. Yu., Rubanenko, A. O., Khumorova, A. R., Kolsanov, A. V. Potential of acoustic voice analysis in diagnostics of noncommunicable diseases: a systematic review and meta-analysis. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 2025 (In Russ.).

12. Dudaity, G. A., Georgieva, L. V. Dynamics of acoustic voice parameters in patients after antireflux surgery. *Russian Otorhinolaryngology*, 2020, pp. 35–37 (In Russ.).

13. Jadould, Yannick et al. Parselmouth for bioacoustics: automated acoustic analysis in Python. *Bioacoustics*, 2023, pp. 1–19.

14. Borovikova, D. V., Grishin, O. V., Nenko, A. V., Yupashevsky, A., Kazmina, A. S., Markov, A. V., Metsler, K. A. Development of a hardware and software complex for speech analysis and correction. *Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 2 (82), pp. 135–145. DOI 10.17212/2782-2001-2021-2-135-145 (In Russ.).

15. Litovkin, S. A., Laptev, P. Yu. Classification of voice and speech from the point of view of naturalness using machine learning tools. *Prospects for the development of fundamental sciences: collection of scientific papers of the XXI International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*, Tomsk, April 23–26, 2024. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University, 2024, pp. 88–90 (In Russ.).

16. Shchetinin, E. Yu. Emotions recognition in human speech using deep neural networks. *Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2021, vol. 18, no. 1 (199). P. 44–51. DOI 10.14489/vkit.2021.01.pp.044-051.

17. Balabanova, T. N., Gaivoronskaya, D. I., Doborovich, A. N. Using neural network technologies in determining the emotional state of a person in oral communication. *Research Result. Theoretical and Applied Linguistics*, 2024, vol. 10, no. 4, pp. 17–39.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 25.11.2025; принята к публикации 04.01.2026.

The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 25.11.2025; accepted for publication 04.01.2026.

УДК 004.942:631.165.2

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ  
НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ**

*Кузнецов Михаил Андреевич*, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

кандидат технических наук, ORCID: 0000-0001-5044-1427, e-mail: mara122@mail.ru

*Земцов Андрей Николаевич*, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

кандидат технических наук, ORCID: 0000-0001-6430-3615, e-mail: azemtsow@mail.ru

*Ткаченко Роман Сергеевич*, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

магистрант, ORCID 0009-0004-6403-2041, e-mail: tcachenko2000@mail.ru

*Майданников Кирилл Антонович*, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

магистрант, ORCID 0009-0005-4888-5893, e-mail: maid11@mail.ru

*Пиеничный Дмитрий Сергеевич*, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

магистрант, ORCID: 0009-0009-7052-1534, e-mail: noizemc464@gmail.com

Статья посвящена исследованию регрессионных прогнозных моделей урожайности сельскохозяйственных культур, основанных на анализе спутниковых снимков. В статье также предлагается математическая модель, учитывающая колебания влажности почвы при росте и созревании растений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности агропрогнозов в условиях рискованного земледелия. Предложенная модель использует данные о влажности почвы и показатели вегетации растений, полученные с помощью спутникового мониторинга. В основе исследуемых моделей лежит установление зависимостей между влажностью, вегетативным состоянием культур и их конечной продуктивностью. Экспериментальная проверка проводилась на примере зерновой культуры в почвенно-климатической зоне Ольховского района Волгоградской области. Модель может быть интегрирована в системы точного земледелия, что способствует увеличению рентабельности сельхозпроизводства и минимизации экологических рисков.

**Ключевые слова:** машинное обучение, точное земледелие, прогнозная модель, регрессия, урожайность, влажность почвы, вегетативный индекс

**COMPARATIVE ANALYSIS OF YIELD FORECASTING MODELS  
BASED ON SATELLITE IMAGES**

*Kuznetsov Mikhail A.*, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0001-5044-1427, e-mail: mara122@mail.ru

*Zemtsov Andrey N.*, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0001-6430-3615, e-mail: azemtsow@mail.ru

*Tkachenko Roman S.*, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

master's student, ORCID 0009-0004-6403-2041, e-mail: tcachenko2000@mail.ru

*Maidannikov Kirill A.*, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

master's student, ORCID 0009-0005-4888-5893, e-mail: maid11@mail.ru

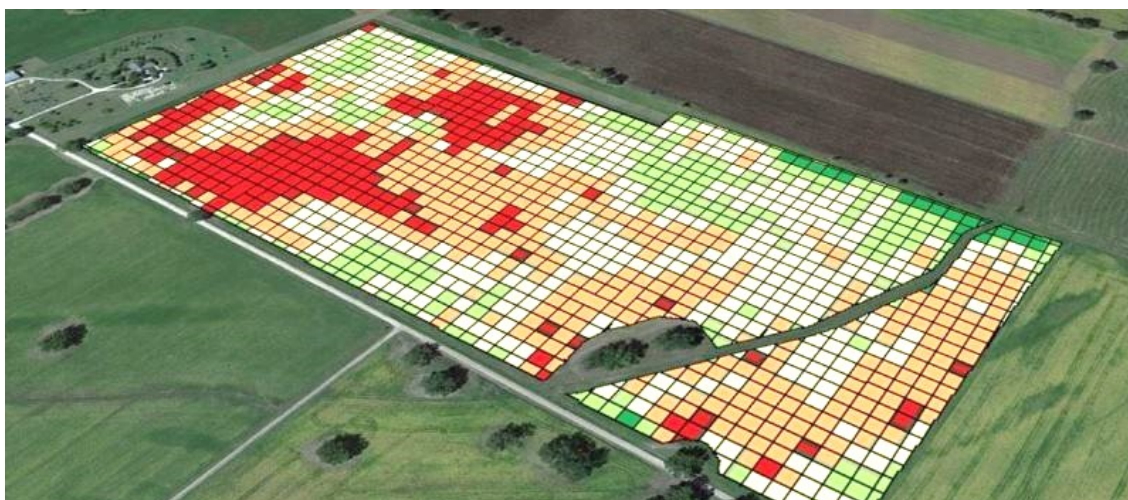
*Pshenichny Dmitry S.*, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

master's student, ORCID: 0009-0009-7052-1534, e-mail: noizemc464@gmail.com

The article is devoted to the study of regression predictive models of crop yields. The article also proposes a model that takes into account fluctuations in soil moisture during plant growth and maturation. The relevance of the study is due to the need to improve the accuracy of agricultural forecasts. The proposed model uses data on soil moisture and vegetation indicators obtained by satellite monitoring. The models studied are based on the establishment of relationships between humidity, the vegetative state of crops and their final productivity. The experimental verification was carried out using the example of grain crops in the soil and climatic zone of the Volgograd region. The model can be integrated into precision farming systems, which helps to increase the profitability of agricultural production and minimize environmental risks.

**Keywords:** machine learning, precision agriculture, predictive model, regression, yield, soil moisture, vegetative index

Graphical annotation (Графическая аннотация)



## ВВЕДЕНИЕ

Вопросы прогнозирования будущего урожая являются важными для планирования агротехнических работ. Прогноз ожидаемого урожая также актуален для финансовых структур при принятии решения об инвестициях в сельскохозяйственные предприятия. Возможности машинного обучения позволяют решить задачу прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе накопленного опыта сельскохозяйственной эксплуатации земельного фонда.

Ключевым вопросом прогнозирования урожая является разработка математической модели, с одной стороны, позволяющей учесть различные изменения окружающей среды, а с другой стороны – минимизирующей затраты на получение подобной информации. Дистанционное зондирование Земли обеспечивает относительно простой и экономичный способ сбора необходимой для прогноза информации.

## ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОГНОЗИРУЕМОЙ УРОЖАЙНОСТИ

Существуют разные подходы к прогнозированию урожайности [1]. Большинство представленных моделей строится на анализе биомассы агрокультур в период вегетации. Биомасса растений зависит от нескольких ключевых показателей, которые для лучшего урожая должны находиться в определенном диапазоне значений. Это качество почвы, метеорологические условия, ключевыми из которых являются влажность почвы, температура окружающей среды, количество солнечной энергии на единицу площади. Часть этих показателей неподвластны человеку и воздействие неблагоприятных условий не зависит от его деятельности. А некоторыми показателями при ведении хозяйственной деятельности человек может управлять. Например, мелиорация земли и внесение удобрений позволяет улучшить почву, что повышает эффективность ведения хозяйственной деятельности. Одним из важнейших агротехнических показателей является влажность почвы. Она зависит от грамотного проведения работ, позволяющих держать влажность почвы в наиболее выгодных для роста растений условиях. Особенно это эффективно при использовании прецизионного полива совместно с внесением удобрений [7]. Правильный выбор полей под конкретные агрокультуры также позволяет использовать имеющиеся ресурсы наиболее эффективно.

## МЕТОДИКА СБОРА ДАННЫХ

Оценка эффективности ведения деятельности для больших хозяйств со множеством полей, на которых выращиваются разные агрокультуры, является весьма нетривиальной задачей. Помимо сложности самой модели, требующей учитывать разные показатели, вопрос сбора многофакторных данных с большого количества полей представляет собой трудоемкую операцию.

Для сбора данных необходимо:

- измерить показатели в разных точках возделываемых полей;
- возможно интерполировать параметры для промежуточных точек;
- вычислить эффективность ведения хозяйственной деятельности для каждой анализируемой точки;
- выполнить интегрирование показателей по всей площади ведения хозяйственной деятельности.

Сбор данных наземными средствами довольно сложен и требует высоких трудозатрат. Поэтому для анализа показателей в агропромышленном комплексе (АПК) используется гиперспектральные оптические камеры со съемкой отраженного от поверхности Земли естественного излучения. Они получают

изображение поверхности не только в видимом диапазоне оптических волн, но захватывают также инфракрасные и ультрафиолетовые частоты. Такой сбор данных позволяет анализировать спектр отраженного излучения и таким образом учитывать особенности роста агрокультур.

### ОБЗОР ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ

На основе собранных данных можно рассчитать различные вегетационные индексы [2], которые отражают вегетационное состояние растительности на основе данных с инфракрасного, красного и синего канала, коэффициента коррекции почвы и других показателей. Существует несколько семейств вегетационных индексов, а именно обычные вегетационные индексы (RVI, NDVI, IPVI, DVI, PVI, WDI, TVI), индексы, устойчивые к влиянию почвы (SAVI, TSAVI, MSAVI, MSAVI2), и индексы, устойчивые к влиянию атмосферы (GEMI, ARVI, SARVI, EVI) [3]. С учетом поставленной задачи были выбраны несколько индексов из каждого семейства. Кроме того, в модели используется индекс влажности NDMI.

В таблице 1 в формулах используются следующие обозначения: NIR – инфракрасный канал, RED – красный канал, L – коэффициент коррекции почвы (обычно 0,5), BLUE – синий канал, SWIR – коротковолновый канал.

Таблица 1 – Вегетативные индексы

Индекс	Формула	Диапазон
NDVI	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$	[-1, 1]
SAVI	$((NIR - RED) / (NIR + RED + L)) * (1 + L)$	[-1, 1]
EVI	$2,5 * ((NIR - RED) / (NIR + 6 * RED - 7,5 * BLUE + 1))$	[-1, 1]
NDMI	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	[-1, 1]

Для анализа важно выбрать вегетационный индекс, который наиболее точно отражает разные стадии развития растений, чувствителен к изменениям в растительном покрове и минимально подвержен влиянию почвенного фона и атмосферных помех.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности – один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова. Индекс используется для оценки с покрытием растительностью 30 процентов площади и более, имеет самый широкий динамический диапазон из распространенных ВИ, но не учитывает влияние атмосферных и почвенных факторов. Индекс подходит для анализа уже сформировавшегося растительного покрова, но не подходит для анализа ранних стадий всхожести из-за малого покрытия (так как растительный покров еще разрежен). Чем выше значение индекса, тем здоровее растительность в этой местности, в то же время низкие значения индекса означают отсутствие растительности, голую почву или воду.

Индекс SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) используется в случае, когда имеем дело с разреженной активностью (меньше 15 процентов площади), и учитывает корректирующее влияние почвы. Однако из-за уменьшения почвенного шума уменьшается динамический диапазон (dynamic range) индекса, следовательно, SAVI менее чувствителен к изменению растительного покрова. И он также не учитывает влияние атмосферных факторов. Индекс можно использовать для анализа всхожести растений, так как на ранних стадиях всхожести растительный покров еще редкий. SAVI более чувствителен к шуму в данных, чем другие индексы растительности, такие как NDVI, из-за наличия в формуле коэффициента L. Зависимость SAVI от значения растительности нелинейна, что может затруднить интерпретацию его значений.

Недостатки предыдущих индексов учтены в индексе EVI (Enhanced Vegetation Index), который показывает насыщенность растениями оцениваемой поверхности с учетом фона почвы и атмосферных явлений. EVI очень похож на NDVI, однако в формуле для расчёта EVI так же используются данные из синего диапазона и коэффициенты коррекции для атмосферных эффектов и фона почвы, т. е. EVI менее чувствителен к атмосферным условиям и почвенному фону.

Индекс NDMI (Normalized Difference Moisture Index) отражает содержание влаги в растительности и почве. Низкие значения указывают на засуху, высокие – на достаточную увлажненность. Использует каналы NIR и SWIR для создания коэффициента, предназначенного для приглушения освещения и атмосферных эффектов.

### ВЫБОР СЕРВИСА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Существует два основных подхода дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это аэрофотосъемка и космическая съемка. В случае мониторинга посевов необходимо регулярно получать данные о конкретных территориях с момента посева и до момента всхода урожая. Аэрофотосъемка не всегда используется для мониторинга в силу сложности ее организации и дороговизны. Спутники

же имеют глобальное покрытие и четкий график съемки с определенного ракурса, поэтому в конечном итоге затраты на получение данных могут быть значительно меньше, чем при аэрофотосъемке. Рассмотрим сервисы для получения спутниковых данных для агропромышленного использования.

Основные требования к сервису следующие:

1. Покрытие территории Российской Федерации.
2. Разрешение снимков: необходимо обозреть динамику показателей на относительно небольших участках земли, поэтому снимки должны быть высокого разрешения (10–50 метров).
3. Спектральные каналы: наличие необходимых спектральных каналов (красный, ближний инфракрасный, синий).
4. Частота обновления снимков: регулярность обновления данных (хотя бы раз в неделю) важна для мониторинга динамики вегетации.
5. Исторические данные: в сервисе должны храниться данные о снимках в течении как минимум года для корректного анализа одного урожайного года. Для сравнения разных годов желательно глубина архива в несколько лет.

Дополнительные требования:

1. Использование предварительно обработанных данных, в которых устранены атмосферные искажения. Задействование индексов с атмосферной коррекцией позволяет минимизировать ошибки в прогнозе.
2. Наличие API позволяет оперативно получать данные от сервиса ДЗЗ, что способствует уменьшению времени расчета.
3. Поддержка расчетов индексов на платформе сервиса ДЗЗ позволяет снизить нагрузку на собственные аппаратные ресурсы.
4. Совместимость с ГИС обеспечивает возможность импорта данных на ГИС платформы, такие как QGIS или ArcGIS.

Сравнение наиболее распространенных сервисов ДЗЗ представлено в таблице 2.

Google Earth Engine (GEE) – это облачная платформа для анализа больших геопространственных данных в планетарных масштабах. Её ключевая особенность – это использование мощных вычислительных ресурсов компании Google, включая суперкомпьютеры, объединенные в кластеры серверов для высокопроизводительных параллельных вычислений, а также крупные дата-центры для хранения огромного массива разнообразных данных.

Основу каталога данных GEE составляют полные архивы изображений дистанционного зондирования Земли, полученные с помощью спутниковых миссий, таких как Landsat 1–8, Sentinel 1, 2, 3, 5P, с различными уровнями обработки [4]. Эти данные охватывают период с 1960-х гг. по настоящее время, новая информация поступает ежедневно.

Sentinel Hub – это облачный сервис для обработки, анализа и визуализации геопространственных данных, основанный на ДЗЗ. В отличие от Google Earth Engine (GEE), который ориентирован на масштабные вычисления и анализ больших данных с использованием мощных вычислительных ресурсов Google, Sentinel Hub делает акцент на гибкости, пользовательской настройке и удобстве визуализации данных.

EarthExplorer – это веб-платформа, разработанная Геологической службой США (USGS), которая предоставляет доступ к обширным архивам спутниковых данных, аэрофотоснимков и других геопространственных материалов. По сравнению с сервисами выше не предоставляет инструментов для анализа или обработки данных на платформе. Содержит только функции выгрузки данных.

Planet – это коммерческий сервис, предоставляющий доступ к спутниковым данным с ежедневным обновлением. В отличие от сервисов выше, Planet позволяет получить снимки сверхвысокого разрешения (до 3 метров), так как использует собственную группировку спутников (например, Dove и SkySat). Также сервис отличается тем, что доступ к снимкам представляется на платной основе, исключения только для студентов и исследователей (30 000 квадратных километров в месяц с задержкой получения снимка в 30 дней).

Таблица 2 – Сравнение сервисов ДЗЗ

Критерий /сервис	Google Earth Engine	Sentinel Hub	EarthExplorer	Planet
Пространственное разрешение	10–30 м (Landsat), 10–60 м (Sentinel-2), 10–60 м (Sentinel-1)	10–60 м (Sentinel-2), 10 м (Sentinel-1)	30 м (Landsat), 250 м (MODIS), 15 м (ASTER)	3–7 м (PlanetScope), 15 м (SkySat)
Спектральное разрешение	7 спектральных каналов (Landsat), 13 спектральных каналов (Sentinel-2), 2 спектральных канала (Sentinel-1)	13 спектральных каналов (Sentinel-2), 2 спектральных канала (Sentinel-1)	7 спектральных каналов (Landsat), 36 спектральных каналов (MODIS), 9 спектральных каналов (ASTER)	4 спектральных канала (PlanetScope), 8 спектральных каналов (SkySat)
Временное разрешение	16 дней (Landsat), 5 дней (Sentinel-2), 10 дней (Sentinel-1)	5 дней (Sentinel-2), 10 дней (Sentinel-1)	16 дней (Landsat), 1 день (MODIS), 16 дней (ASTER)	Ежедневное (PlanetScope), ежедневное (SkySat)
Уровень обработки	«Сырые» данные, радиометрически и геометрически скорректированные изображения, готовые продукты (например, карты вегетационных индексов)	«Сырые» данные, радиометрически и геометрически скорректированные изображения, готовые продукты (например, карты вегетационных индексов)	«Сырые» данные, радиометрически и геометрически скорректированные изображения	«Сырые» данные, радиометрически и геометрически скорректированные изображения
Возможности API	Экспорт данных (в том числе в форматах GIS-систем), расчёт вегетационных индексов, создание и анализ временных рядов	Экспорт данных (в том числе в форматах GIS-систем), расчёт вегетационных индексов, создание и анализ временных рядов	API отсутствует	Экспорт данных (в том числе в форматах GIS-систем), расчёт вегетационных индексов, создание и анализ временных рядов
Архив снимков	Архив данных за несколько лет	Архив данных за несколько десятилетий	Архив данных за несколько десятилетий (Landsat – с 1972 года)	PlanetScope доступен с 2009 года, RapidEye – с 2009 по 2020
Стоимость получения снимков	Бесплатно	Бесплатно	Бесплатно	От 6 долларов за квадратный километр
Атмосферная коррекция	Да (Level-2A, Surface Reflectance)	Да (Level-2A)	Да (Surface Reflectance)	Да (ограничено, только для Surface Reflectance)
Дополнительные возможности	Инструменты для анализа временных рядов, классификации изображений, расчета индексов и других операций	Инструменты для атмосферной коррекции, облачной маскировки, расчета индексов и других операций	Отсутствуют	Инструменты для анализа временных рядов, классификации изображений, расчета индексов и других операций

### ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ УРОЖАЙНОСТИ

Прогнозы урожайности строятся на основе получения максимума показателя вегетации [5]. Максимальный индекс вегетации пропорционален биомассе растений на этапе роста. Таким образом, при отслеживании спутниковых снимков ДЗЗ ищется максимальный показатель вегетации для исследуемой поверхности (части поля). На его основе делается прогноз урожая. Полученный прогноз опирается на усредненное значение за несколько лет соотношения максимального показателя вегетации и реальной урожайности.

Ниже приведены наиболее распространенные модели для оценки урожайности на основе вегетации.

Формула (1) полиномиальной регрессии заключается в построении параболический зависимости урожайности от показателя вегетации:

$$EH_1 = a * NDVI^2 + b * NDVI + c. \quad (1)$$

Другой вариант прогноза урожайности – линейная регрессия – представлен формулой (2). Это математически более простой подход, предлагающий линейную зависимость между урожаем и индексом.

$$EH_2 = a * NDVI + c. \quad (2)$$

Еще один вариант предполагает учитывать совместно с индексом NDVI дополнительно индекс EVI. Учет EVI позволяет сгладить отклонения NDVI при существенных влияниях атмосферных эффектов и фона почвы при разряженной растительности.

$$EH_3 = (a * NDVI + b * EVI + c). \quad (3)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  в моделях (1), (2) и (3) определяются экспериментальным путем с помощью регрессии для конкретного поля на основе анализа информации по предыдущим годам.

Недостатки этих и других подобных моделей заключаются в отсутствии учета некоторых важных показателей в процессе роста и созревания растений. Прогноз основывается на общей биомассе растений на основе вегетативных индексов. То есть данные модели можно эффективно использовать при «прочих равных условиях». Рискованное земледелие, характерное для юга России, требует при прогнозировании учета существенных колебаний других параметров. Соотношение веса урожая к общей биомассе у растений изменяется в зависимости от неучтенных в формулах (1), (2) и (3) показателей. Например, это может быть влажность почвы, использование удобрений, температура окружающей среды, количество солнечной энергии, получаемой растением в процессе роста и т. п. Отклонение таких показателей от допустимых значений влечет уменьшение урожая при тех же значениях вегетативных индексов. Кроме того, после получения на поле максимального вегетативного индекса рассмотренные прогнозные модели фиксируют прогнозную урожайность. В последующие периоды вплоть до уборки урожая отклонения важнейших показателей не учитываются. Однако воздействие окружающей среды на ожидаемый урожай не прекращается. Например, отклонение от требуемой влажности уже после получения максимального вегетативного индекса может существенно изменить итоговый урожай [6].

Добавим в расчет прогноза урожая учет влияния влажности. Для этого скорректируем прогноз урожая на основе формулы (3) в сторону уменьшения при отклонениях от допустимых условий влажности. Для этого введем корректирующий коэффициент Humidity Deviation Correction (HDC) – корректировочный параметр, учитывающий отклонение влажности. Коэффициент уменьшает ожидаемую урожайность в случае отклонения от допустимой влажности. Причем чем больше отклонение от необходимой влажности, тем сильнее оно сказывается на уменьшении урожая. Так как отклонение от допустимой влажности может происходить в отдельные периоды роста и созревания агрокультуры, общая корректировка производится на основе принципа пропорциональности времени воздействия неблагоприятного условия.

Рассуждения выше реализованы в формуле множественной линейной регрессией на основе формулы (4):

$$EH_4 = (a * NDVI + b * EVI + c) - d * HDC, \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  – коэффициенты регрессии для конкретного поля;

NDVI и EVI – максимальные вегетационные индексы по исследуемому полю;

HDC (Humidity Deviation Correction) – корректировочный параметр, учитывающий отклонение влажности.

HDC учитывается по формуле (5):

$$HDC = \sum_{i=1}^N \frac{\max(0, NDMI_i - NDMI_{max}) + \max(0, NDMI_{min} - NDMI_i)}{N}, \quad (5)$$

где  $N$  – количество периодов (количество спутниковых снимков за период роста и созревания растений);

$NDMI_i$  – средний индекс влажности по поверхности поля за  $i$ -й период;

$NDMI_{max}$  и  $NDMI_{min}$  – максимальный и минимальный допустимые индексы влажности для агрокультуры, при котором происходит нормальное развитие урожая.

Максимальное и минимальное допустимое значение индексов влажности  $NDMI_{max}$  и  $NDMI_{min}$  зависят от выращиваемой агрокультуры. Формула (4) позволяет корректировать прогноз по урожайности даже после получения максимума по вегетативным индексам.

Произведем сравнительный анализ математических моделей. Для этого используем статистику по реальной урожайности за несколько лет и спутниковые архивные данные, полученные от сервиса Sentinel Hub. Данные об урожае предоставлены для исследования хозяйством ООО «Урожай». Параметры исследуемого поля приведены ниже.

- расположение: село Рыбинка, Ольховский район, Волгоградская область.
- координаты: 50,005360, 44,702880.
- полигон: [44,695001, 50,003519], [44,716115, 50,009642], [44,728818, 50,002609], [44,708734, 49,995381], [44,695001, 50,003519].
- площадь: 207 гектаров.
- основной тип культуры: озимая пшеница, без искусственного орошения.

Для упрощения обработки данных используется специально разработанная программная система, позволяющая автоматизировать процессы получения информации от сервисов ДЗЗ, обеспечивающая хранение этих данных, а также расчет на основе разных математических моделей регрессий. Проведем ретроспективный анализ реального поля и сравним прогнозируемые данные на начало лета с данными о реальной урожайности.

Расчитанные показатели максимума NDVI за вегетативные периоды 2018–2024 и среднее значение NDMI для каждого года в период вегетации (4 апреля – 30 сентября), а также реальные показатели урожайности приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Обработанные спутниковые данные и урожайность

Год	Реальная урожайность	Показатели за весь период вегетации	
		максимальный NDVI	среднее значение NDMI
2018	7,1	0,55	-0,084
2019	6,4	0,35	-0,246
2020	9	0,63	-0,041
2021	5	0,4	-0,235
2022	11	0,70	-0,07
2023	11	0,66	-0,058
2024	6	0,38	-0,297

Сравнительный анализ результатов прогноза разных моделей приведен в таблице 4. Используется формула (1) для полиномиальной регрессии, (2) – для линейной регрессии по NDVI, (3) – для линейной регрессии на основе NDVI и EVI и (4) – для учета отклонений от требуемой влажности.

Таблица 4 – Ожидаемая урожайность для разных регрессий

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Полиномиальная регрессия	6,25	6,19	8,82	6,76	12,90	9,71	4,83
Линейная регрессия (NDVI)	8,13	4,43	9,68	5,76	10,36	9,57	4,38
Линейная регрессия (NDVI, EVI)	7,35	5,30	9,57	6,00	9,88	11,15	4,55
Линейная регрессия (NDVI, EVI, NDMI)	7,17	5,15	9,40	5,66	9,69	10,99	4,16
Урожайность по факту*	7,1	6,4	9	5	11	11	6

Примечание. \*Урожайность измеряется в ц/га.

Расчитаем отклонение от фактической урожайности за каждый год и среднее отклонение. Результаты представлены в таблице 5. Наглядно отклонение показано на рисунке.

Таблица 5 – Отклонение от фактической урожайности

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Среднее отклонение за весь период, в %
Полиномиальная регрессия	8,5	3,3	2,0	35,2	17,3	11,7	19,5	13,93
Линейная регрессия (NDVI)	14,5	30,8	7,6	15,2	5,8	13,0	27,0	16,27
Линейная регрессия (NDVI, EVI)	3,5	17,2	6,3	20,0	10,2	1,4	23,2	11,69
Линейная регрессия (NDVI, EVI, NDMI)	1,0	19,5	4,4	13,2	11,9	0,1	30,7	11,54

Примечание. Отклонение измеряется в % от реального урожая.

Разные модели регрессий обеспечивают приемлемый тренд прогноза ожидаемого урожая, но разнятся по самим показателям. Предложенная модель прогноза на основе учета индекса влажности статистически дает один из лучших результатов по всему периоду. Хотя для отдельных годов данный показатель имеет отклонение около 30 %. Однако это не худший показатель по сравнению с другими моделями.

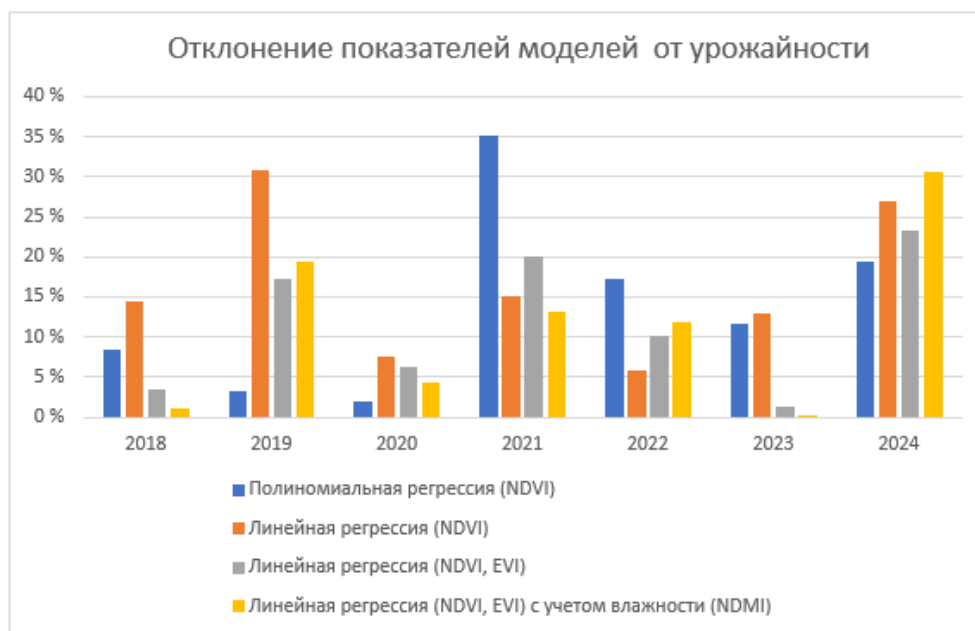


Рисунок – Линейная регрессия (NDVI, EVI) с учетом влажности (NDMI)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило сравнить различные регрессионные модели, которые используются в АПК при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых снимков. Предложенная модель с учетом индекса NDMI статистически дает меньшие отклонения на опытных данных по сравнению с другими регрессионными моделями. Однако такое улучшение не позволяет гарантировать более точного прогноза для конкретного года. Для получения более точной модели требуется использование дополнительной информации об окружающей среде. Например, данные о приходящейся на единицу площади поля солнечной энергии и температуре. Такие дополнительные данные для прогноза возможно получить от метеорологических сервисов.

### Список источников

1. Асалханов, П. Г. Модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в задачах параметрического программирования / П. Г. Асалханов, Я. М. Ивань, М. Н. Полковская // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 2. – С. 57–66. – DOI 10.21285/1814-3520-2017-2-57-66.
2. Шинкаренко, С. С. Технологии спутникового мониторинга состояния посевов / С. С. Шинкаренко, Е. А. Малышко // Научно-агрономический журнал. – 2019. – № 1 (104). – С. 17–20.
3. Дубинин, М. Вегетационные индексы / М. Дубинин // Географические информационные системы и дистанционное зондирование. – 2006. – URL: <http://gis-lab.info/qa/vi.html> (дата обращения: 20.01.2025).
4. Чульдум, А. Ф. Получение вегетационных индексов Тувы на платформе Google Earth Engine / А. Ф. Чульдум // Природные ресурсы, среда и общество. – 2021. – С. 51–58.
5. Шурлаева, Е. А. Прогнозирование вегетационного индекса растительности сельскохозяйственных угодий Волгоградской области с помощью нейросетевых методов / Е. А. Шурлаева, Д. А. Барышев, А. С. Зубанков, В. Л. Розалиев // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5. – С. 13.
6. Лукьянов, В. А. Оценка степени влияния гидротермических условий на урожайность озимой пшеницы при разных агротехнологиях в зернопаропропашном севообороте / В. А. Лукьянов, И. А. Прущик // Аграрная наука. – 2021. – № 10 (353). – С. 99–104.
7. Васильев, С. М. Продуктивность озимой пшеницы в зависимости от доз минеральных удобрений при различных технологиях орошения в условиях юга России / С. М. Васильев, В. И. Ольгаренко, А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2020. – № 3. – С. 241–253.

### References

1. Asalkhanov, P. G., Ivano, Ya. M., Polkovskaya, M. N. Models of crop yield forecasting in parametric programming problems. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 57–66. DOI 10.21285/1814-3520-2017-2-57-66 (In Russ.).

2. Shinkarenko, S. S., Malyshko, E. A. Technologies of satellite monitoring of crops. *Scientific and Agricultural Journal*, 2019, no. 1 (104), pp. 17–20 (In Russ.).
3. Dubinin, M. Vegetation indexes. *Geographical information systems and remote sensing*, 2006. Available at: <http://gis-lab.info/qa/vi.html> (accessed 20.01.2025) (In Russ.).
4. Chuldum, A. F. Obtaining vegetation indexes of Tuva on the Google Earth Engine platform. *Natural Resources, Environment and Society*, 2021, pp. 51–58 (In Russ.).
5. Shurlaeva, E. A., Baryshev, D. A., Zubankov, A. S., Rozaliev, V. L. Forecasting the vegetation index of agricultural land in the Volgograd region using neural network methods. *Engineering Bulletin of the Don*, 2022, no. 5. 13 p. (In Russ.).
6. Lukyanov, V. A., Pruschchik, I. A. Assessment of the degree of influence of hydrothermal conditions on the yield of winter wheat under various agricultural technologies in grain-and-crop rotation. *Agricultural Science*, 2021, no. 10 (353), pp. 99–104 (In Russ.).
7. Vasiliev, S. M., Olgarenko, V. I., Babichev, A. N., Monastyrsky, V. A. Productivity of winter wheat depending on doses of mineral fertilizers with various irrigation technologies in the conditions of southern Russia. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*, 2020, no. 3, pp. 241–253 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 19.05.2025; одобрена после рецензирования 25.07.2025; принята к публикации 23.01.2026.

The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 25.07.2025; accepted for publication 23.01.2026.

УДК 004.021

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОСНОВНОГО ТЕКСТОВОГО КОНТЕНТА ВЕБ-СТРАНИЦ**

*Косюра Надежда Александровна*, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

магистрант, ORCID: 0009-0005-7853-8649, e-mail: nadejdakna2002@gmail.com

*Елисеева Виктория Денисовна*, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

магистрант, ORCID: 0009-0006-3137-9078, e-mail: viktoriya.eliseeva.2002@mail.ru

*Шкарупа Алексей Эдуардович*, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

старший преподаватель кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, ORCID: 0009-0005-9776-9063, e-mail: shkarupa.alex@gmail.com

Целью исследования является проведение сравнительного анализа и систематизация существующих методов автоматического извлечения основного текстового содержимого веб-страниц. В рамках литературного обзора проанализированы работы, посвященные задачам извлечения контента, обработке веб-данных и машинному обучению. Особое внимание уделено методам, классифицированным по единой методологии: эвристическим, машинно-обучаемым и гибридным подходам. Проведена экспериментальная оценка 15 современных экстракторов на 10 различных датасетах с использованием метрик BLEU, ROUGE-LSum и нормализованного расстояния Левенштейна. По результатам исследования сделаны выводы о наиболее эффективных методах и инструментах: установлено, что эвристические методы Trafilatura и Readability демонстрируют наилучшую устойчивость и эффективность на разнообразных корпусах, превосходя по совокупным показателям более сложные нейросетевые модели. Выявлено, что сложные и ресурсоемкие нейросетевые модели не всегда оправдывают высокие вычислительные затраты, в то время как хорошо сконструированные эвристические и гибридные подходы оказываются более экономичными и конкурентоспособными. Результаты исследования представляют практическую ценность для разработчиков систем веб-аналитики, информационного поиска и обработки естественного языка. Исходный код всех экспериментов опубликован в открытом репозитории: <https://github.com/Saelaress/web-content-extraction-benchmark-extended>.

**Ключевые слова:** извлечение основного контента, удаление шаблонного контента, DOM-структура, эвристические алгоритмы, машинное обучение, гибридные методы

## **COMPARATIVE EVALUATION OF METHODS FOR AUTOMATIC EXTRACTION OF MAIN TEXTUAL CONTENT FROM WEB PAGES**

*Kosyura Nadezhda A.*, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave, Volgograd, 400005, Russian Federation,

master's student, ORCID: 0009-0005-7853-8649, e-mail: nadejdakna2002@gmail.com

*Eliseeva Viktoriya D.*, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave, Volgograd, 400005, Russian Federation,

master's student, ORCID: 0009-0006-3137-9078, e-mail: viktoriya.eliseeva.2002@mail.ru

*Shkarupa Aleksei E.*, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave, Volgograd, 400005, Russian Federation,

Senior Lecturer, Department of Software for Automated Systems, scientific supervisor, ORCID: 0009-0005-9776-9063, e-mail: shkarupa.alex@gmail.com

This study conducts a comparative analysis and systematic review of existing methods for automatically extracting the main textual content from web pages. It examines research on content extraction, web data processing, and machine learning, and organizes current approaches within a unified framework that includes heuristic, machine-learning, and hybrid methods. Moreover, the study evaluates 15 state-of-the-art extractors across 10 heterogeneous datasets and employs BLEU, ROUGE-LSum, and normalized Levenshtein distance to measure their performance. As a result, the analysis identifies the most effective techniques and tools: for example, the heuristic methods Trafilatura and Readability demonstrate the highest stability and accuracy on diverse corpora, consequently outperforming more complex neural models on aggregate metrics. The findings also show that computationally intensive neural architectures do not always justify their substantial resource demands, whereas well-designed heuristic and hybrid solutions provide more efficient and competitive alternatives. The results offer practical value for developers of web-analytics systems, information-retrieval pipelines, and natural-language-processing applications. All experimental code is publicly available in an open repository: <https://github.com/Saelaress/web-content-extraction-benchmark-extended>.

**Keywords:** main content extraction, boilerplate removal, DOM structure, heuristic algorithms, machine learning, hybrid methods

## ВВЕДЕНИЕ

Объем информации в интернете непрерывно растет, и современная веб-страница содержит помимо основного текста большое количество шаблонных элементов – меню, футеры, рекламные блоки, повторяющиеся фрагменты, которые, по данным Gibson [2], составляют почти половину всех данных в интернете. Наличие такого «шума» осложняет автоматическое выделение информативной части страницы и приводит к избыточным затратам вычислительных ресурсов при обработке веб-данных.

Задача извлечения основного текстового содержимого является ключевой для поисковых систем, рекомендательных сервисов и моделей обработки естественного языка. Качество выделенного текста напрямую влияет на эффективность этих систем, что делает проблему корректной фильтрации шаблонного контента особенно актуальной.

Автоматическая обработка веб-страниц осложняется множеством факторов. В компьютерном представлении страница представляется в виде DOM-дерева, где каждый узел соответствует отдельному элементу HTML-структуры. Современные сайты сильно различаются по структуре: от статических HTML-документов до динамических SPA-приложений. Основной контент может быть представлен как единым блоком (новостные статьи), так и набором разрозненных фрагментов (блоги, страницы с комментариями) или сложными структурированными элементами с высокой плотностью разметки (каталоги товаров). В ряде случаев доля основного контента составляет менее 20 % HTML-кода страницы. Дополнительные трудности создают многоязычность веб-контента и субъективность определения границ основного контента: аннотации разных экспертов зачастую расходятся (как показано на примере датасета Canola [16]). Неоднозначность статуса элементов, таких как комментарии, также препятствует формированию единого эталона.

Несмотря на наличие большого числа решений, лишь немногие системы доступны открыто, при этом часть из них устарела, часть предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам, и многие инструменты показывают хорошие результаты только на узкоспециализированных типах страниц, что снижает их универсальность. Хотя предпринимаются усилия по созданию тестовых наборов и методик оценки, обеспечивающих сопоставимость и воспроизводимость результатов, существующие исследования нуждаются в обновлении с учетом появления новых моделей, датасетов и подходов к сравнению.

Цель данного исследования – провести всесторонний сравнительный анализ современных алгоритмов извлечения основного текстового контента веб-страниц, охватывающий эвристические, машинно-обучаемые и гибридные методы, а также оценить их поведение на разнородных датасетах. Полученные результаты позволяют объективно сравнить существующие решения, выявить их сильные и слабые стороны и определить наиболее эффективные подходы для реальных условий веб-аналитики, информационного поиска и NLP. Полученные выводы могут послужить основой для совершенствования существующих подходов и разработки новых методов, способных справляться с постоянно растущими объемами и разнообразием веб-контента.

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ИЗВЛЕЧЕНИЮ ОСНОВНОГО ТЕКСТОВОГО КОНТЕНТА

Ранние методы очистки веб-контента от шаблонных элементов преимущественно опирались на эвристические алгоритмы и системы правил. Эвристические подходы реализуют набор правил для детекции одного или нескольких блоков основного контента, нередко предполагая известность шаблона сайта или непрерывность основного текста. Такие методы работают по принципу применения заранее заданных правил (часто организованных в древовидную структуру) для определения основного контента, опираясь на структурно-текстовые индикаторы: отношения тегов и текста (SETR) [3], плотность текста с учетом иерархии DOM-дерева (SETD) [7], распределение заголовков и долю ссылок (Readability), сегментацию страницы на регионы с классификацией по эвристическим правилам (jusText), использование высокоточных XPath-шаблонов с резервными эвристическими механизмами (Trafilatura), а также анализ плотности текста относительно HTML-тегов и встречаемость классов шаблонных элементов (VTE [1], GoldMiner [6]). Кроме того, существуют мета-экстракторы, такие как news-please, которые объединяют результаты нескольких эвристических методов (Readability и Newspaper3k) с применением правил фильтрации и разрешения конфликтов между результатами для повышения надежности извлечения [8]. Достоинства эвристического метода заключаются в прозрачности и малых вычислительных затратах; но они имеют и ограничения: чувствительность к вариативным макетам и динамически генерируемому контенту, а также необходимость предварительного знания структуры страницы или следования определенным требованиям формата, что создает проблемы при работе с современными динамически генерируемыми веб-страницами. По масштабу анализа большинство методов работают на уровне отдельной страницы, анализируя ее структуру и содержимое; существуют также методы, работающие на уровне всего сайта, которые используют информацию о шаблонах и повторяющихся элементах для более точной идентификации основного контента. Одним из таких подходов является Template

Extraction Based on Hyperlink Analysis, который выявляет общие элементы сайта путем анализа взаимосвязанных страниц и выделения повторяющихся структур шаблона во всем домене [18].

Методы машинного обучения, в свою очередь, позволяют автоматически выявлять признаки основного контента и шаблонного, обучаясь на размеченных данных для классификации элементов веб-страницы. Классические модели применяют SVM и линейные/логистические модели (Dragnet, Boilerpipe, FIASCO), основанные на признаках DOM-блоков (плотность текста, доля ссылок, глубина узла, позиция, визуальные атрибуты) [9–11]. Более современные подходы используют последовательную разметку и глубокие архитектуры: комбинирование HMM с CNN (Web2Text) для учета локального контекста и последовательной согласованности [12], а также рекуррентные сети (LSTM) для моделирования длинных зависимостей (BoilerNet, SemText) [13, 14]. Для интеграции визуальных подсказок применяют рендеринг страницы и извлечение размерно-пространственных признаков, что повышает точность на сложных макетах, но увеличивает вычислительные затраты [15]. Тем не менее, качество таких моделей зачастую зависит от объема и качества размеченных данных, а также доступных ресурсов для их обучения и инференса.

Гибридные решения стремятся объединить лучшее из обеих парадигм, сочетая эвристические правила с машинным обучением для повышения надежности и адаптивности. Такие подходы реализуют различные стратегии комбинирования: комбинирование анализа DOM-структуры с моделями машинного обучения для финальной классификации кандидатов (Go-DomDistiller, crawl4ai, ExtractNet) [20]. Однако для успешного применения гибридных методов требуется тщательная настройка баланса между жесткими правилами и обучаемыми моделями, а также регулярное обновление эвристик с учетом эволюции веб-данных.

### **РАССМАТРИВАЕМЫЕ ЭКСТРАКТОРЫ ОСНОВНОГО ВЕБ-КОНТЕНТА**

В рамках экспериментального исследования была сформирована выборка современных систем для извлечения основного текстового контента, охватывающая как эвристические решения, так и методы, основанные на машинном обучении. В выборку вошли активно поддерживаемые библиотеки, исследовательские разработки и открытые реализации промышленных экстракторов. В данном разделе приведено краткое описание используемых инструментов, их ключевых принципов работы и особенностей, которые имеют значение для дальнейшего сравнительного анализа.

Newspaper3k – эвристический экстрактор, ориентированный на страницы новостных сайтов [21]. Алгоритм использует набор правил, ориентированных на типичную структуру статейных страниц: анализ расположения текстовых блоков, идентификацию заголовков и метаданных, а также фильтрацию навигационных элементов. Поддерживает извлечение не только основного текста, но и изображений, авторов, дат публикации. Особенностью подхода является поддержка множества языков и возможность параллельной обработки документов, что делает его пригодным для сбора большого объема новостного контента.

jusText – двухэтапный эвристический алгоритм [16]. Сначала HTML-документ сегментируется на блоки, которые классифицируются по размеру, плотности ссылок и частоте стоп-слов. Блоки, неотнесенные к контенту или boilerplate, анализируются с учётом контекста соседних элементов, что позволяет отделять основной текст от меню, рекламы и других служебных блоков.

Goose3 – Python-реализация оригинального Goose [22]. Использует набор правил для определения основного текста, заголовков, изображений и метаданных, анализируя структуру DOM и распределение текстовых элементов. Подходит для статейных страниц, где основной контент представлен в виде непрерывного текстового блока.

Readability представляет собой эвристический алгоритм, изначально разработанный для сервиса закладок и впоследствии интегрированный в браузер Firefox для реализации режима чтения [23]. Оценивает HTML-блоки по тегам, плотности текста, ссылок и заранее заданным паттернам популярных сайтов. Эффективен для большинства страниц и обеспечивает простой способ выделения основного контента.

Trafilatura – каскадный метод с применением XPath-запросов для поиска ключевых текстовых блоков [19]. Процесс включает два этапа: сначала исключаются нежелательные части HTML-кода, затем фокусируется внимание на желаемых контентных областях. В случае неудачной экстракции переключается на резервные алгоритмы (jusText, Readability), что повышает надежность извлечения.

Resiliparse – эвристический экстрактор, ориентированный на устойчивость к ошибкам разметки и производительность [24]. Алгоритм базируется на правилах, основанных на анализе HTML-тегов и регулярных выражений, что позволяет эффективно обрабатывать даже некорректно сформированные HTML-документы.

news-please – мета-экстрактор, объединяющий результаты нескольких эвристических методов [8]. По умолчанию использует Readability и Newspaper3k для извлечения контента с новостных сайтов, а затем применяет правила фильтрации и разрешения конфликтов между результатами. Работает как на уровне отдельной страницы, так и на уровне всего сайта.

Go-DomDistiller представляет собой гибридный метод, реализующий алгоритм DOM Distiller, встроенный в браузеры на базе Chromium для режима «Reader View», предназначенного для выделения основного текста страницы [25]. Метод сочетает эвристические правила и машинное обучение для классификации DOM-блоков, учитывая размер блока, плотность текста и ссылок, а также структурные признаки HTML. Алгоритм эффективно фильтрует навигацию, рекламу и другие шаблонные элементы, предоставляя пользователю чистый основной контент.

crawl4ai представляет собой гибридный фреймворк для извлечения веб-контента с применением методов искусственного интеллекта [26]. Система сочетает анализ DOM-структуры с моделями машинного обучения для классификации блоков текста как основного контента или boilerplate. Фреймворк поддерживает настройку процессов краулинга и парсинга под специфику конкретных сайтов, а также интеграцию внешних ML-моделей для повышения точности извлечения. Такой подход делает Crawl4ai пригодным для масштабного сбора и структурирования информации с веб-ресурсов различного типа.

ExtractNet базируется на архитектуре Dragnet, но использует модели, обученные на других данных, и расширяет функциональность извлечением структурированной информации со страниц [27]. Помимо основного текста, алгоритм извлекает метаданные статьи: заголовок, автора и дату публикации. Метод сочетает машинное обучение для классификации текстовых узлов с эвристической постобработкой для повышения точности. Такой гибридный подход позволяет адаптироваться к разнообразным типам веб-страниц.

Dragnet применяет машинное обучение для классификации блоков текста на основной контент и boilerplate, сочетая подходы Boilerpipe и CETR [9]. Алгоритм использует признаки плотности текста и частоты слов, извлекаемые из атрибутов class и id HTML-элементов. Последние версии также включают признаки из алгоритма Readability, расширяя набор характеристик. Модель обучается на размеченных данных для разделения элементов страницы на контентные и шаблонные, используя классификацию текстовых узлов на основе комбинации структурных и семантических признаков.

Web2Text формулирует задачу извлечения контента как проблему последовательной разметки, где все текстовые блоки страницы классифицируются совместно [12]. Метод использует скрытую марковскую модель поверх представлений блоков, полученных с помощью сверточных нейронных сетей. Для каждого блока учитываются структурные признаки и контекст соседних элементов, что повышает точность классификации. Оптимальная последовательность блоков определяется алгоритмом Витерби, обеспечивая согласованность разметки.

BoilerNet моделирует задачу удаления boilerplate как проблему последовательной разметки, применяя архитектуру на основе двунаправленных LSTM [13]. Веб-страница представляется в виде последовательности текстовых блоков, каждый из которых кодируется разреженным вектором, включающим HTML-теги из пути от корня DOM-дерева до блока и слова, присутствующие в тексте блока. Элементы входной последовательности проецируются в плотные векторы через полносвязный слой, после чего обрабатываются несколькими слоями двунаправленных LSTM. BoilerNet показывает высокую точность и хорошую обобщаемость, при этом не требует большого количества размеченных данных.

Boilerpipe – это классический ML-экстрактор для удаления boilerplate, основанный на правилах и “shallow-feature” классификации блоков DOM, таких как плотность ссылок и число слов [10]. Он сочетает фильтры и классификаторы, включая правило NumWordsRulesClassifier, которое учитывает соседние блоки для принятия решений. В современных реализациях, а также в нашем исследовании используется Python-порт BoilerPy3 [28], который обеспечивает удобные интерфейсы для извлечения основного текста с HTML-страниц.

### **ОЦЕНКА ЭКСТРАКТОРОВ**

Мы оценили производительность 15 специализированных систем извлечения основного контента из литературы и сообщества разработчиков с открытым исходным кодом. Оценка и сравнение алгоритмов автоматического извлечения основного текстового контента потребовало наличия стандартизированных наборов данных с «золотым стандартом» разметки. Ниже представлены ключевые датасеты, используемые в данной области исследований.

Canola – корпус из 219 веб-страниц, где каждая страница аннотирована минимум пятью независимыми экспертами [16].

SETD – 700 пар HTML и текстов. Датасет структурирован по шести основным тематическим категориям, что позволяет проводить оценку методов на разнородных типах веб-страниц [7].

CleanEval – эталонный набор для стандартизации оценки экстракторов [17]. Состоит из 738 пар HTML и эталонных текстов.

CleanPortalEval – расширение CleanEval (70 страниц с 4 новостными порталами) для тестирования методов на специализированных сайтах.

Dragnet Dataset – 1,381 пара файлов, разработан для обучения ML-модели классификации DOM-блоков на контент и шаблон [9].

GoogleTrends-2017 – 180 HTML-страниц из результатов поиска для всех трендовых запросов Google 2017 г., обеспечивающих актуальность, разнообразие и реалистичность данных [13].

L3S-GN1 – 621 HTML-страница с аннотацией блоков по значимости контента – от основных заголовков до пользовательских комментариев, а также отдельный отрицательный класс для блоков boilerplate.

Newspaper3k Test Data – набор тестовых файлов, входящий в репозиторий библиотеки Newspaper3k [29]. Содержит 110 страниц и предназначен для проверки работы функций извлечения текста и метаданных. Данные не имеют экспертной аннотации и не предназначены для обучения моделей, но могут использоваться для тестирования и сравнения алгоритмов извлечения контента.

Readability – тестовая коллекция из 115 страниц для валидации экстрактора Readability.js, интегрированного в браузер Firefox для реализации режима чтения [30].

Scrapinghub – набор данных, содержащий 181 HTML-страницу в сжатом виде и соответствующие им эталонные тексты, разработанный компанией Zyte для сравнительного тестирования коммерческого экстрактора и открытых решений [4].

Следует отметить, что часть используемых в работе датасетов была предварительно нормализована в соответствии с методологией, предложенной в [5]. В частности, исходные HTML-страницы были приведены к единому формату, устранены ошибки кодировок и дублирования текста, а эталонные данные приведены к чистому тексту. Такая унификация позволила обеспечить сопоставимость корпусов и корректность последующего сравнения алгоритмов извлечения контента.

### **МЕТРИКИ ОЦЕНКИ**

В научной литературе предложен широкий спектр метрик для оценки качества извлечения основного веб-контента, среди которых доминируют классические показатели precision, recall и F1-мера, а также структурные и позиционные показатели, такие как text density и tag ratio. Более современные системы ориентируются на текстовые метрики уровня последовательностей – например, LCS-F1, word-overlap и близкие к ним показатели, часто применяемые при оценке полнотекстового извлечения в наборах данных Dragnet и Web2Text. Однако большинство перечисленных подходов либо требуют предварительной блочной разметки HTML-документов, которой не располагает наш экспериментальный корпус, либо излишне чувствительны к особенностям конкретной DOM-структуры и не отражают качество итогового текста. Поэтому в данном исследовании мы используем метрики, оценивающие конечный текст как последовательность – BLEU, нормализованное расстояние Левенштейна и ROUGE-LSum, позволяющие сравнивать тексты разной длины и фиксировать структурные и лексические расхождения без разметки HTML.

BLEU (Bilingual Evaluation Understudy) измеряет совпадение n-грамм между извлеченным текстом и эталонным. Эта метрика дает оценку того, насколько выдача экстрактора «близка» к реальному тексту в терминах фразовой структуры. Мы используем BLEU как промежуточную, «жесткую» метрику, чувствительную к точному порядку слов и фраз.

Нормализованное расстояние Левенштейна (Normalized Levenshtein Distance) вычисляет минимальное количество операций вставки, удаления или замены символов, необходимых для превращения предсказанного текста в эталонный, и нормализует результат, разделяя на длину более длинной строки. Данная метрика эффективна для выявления расхождений, связанных с форматированием, пунктуацией и орфографическими ошибками.

ROUGE-LSum оценивает наибольшую общую подпоследовательность на уровне предложений, учитывая структуру и распределение фраз, что важно, когда извлеченный контент может быть «рассредоточен» и представляет собой не один большой абзац, а несколько разрозненных предложений. Метрика фиксирует полноту и сохранение смысловой структуры без строгого соблюдения порядка слов.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Таблица 1 обобщает результаты метрик в виде средних рангов моделей и служит сводной характеристикой их устойчивости и качества. Ниже кратко описана методика составления этой таблицы.

Для каждой метрики (BLEU, ROUGE-LSum F1, нормализованный коэффициент Левенштейна) по каждому датасету мы независимо ранжировали модели по значению метрики (ранг = 1 – лучшее значение). В случаях точного совпадения значений между несколькими моделями использовался средний ранг (например, две модели, разделяющие 3-е и 4-е место, получают ранг 3,5). Далее для каждой модели рассчитывался ее средний ранг по данной метрике как арифметическое среднее рангов по всем датасетам по формуле (1):

$$r_m^{(metric)} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N r_{m,d}^{(metric)}, \quad (1)$$

где  $r_{m,d}^{(metric)}$  – ранг модели  $m$  на датасете  $d$  по выбранной метрике;

$N$  – число датасетов (в наших экспериментах  $N = 10$ ).

Чтобы получить итоговый ранг модели  $r_m^{(overall)}$ , мы усредняли ее три метрик-ранга по формуле (2):

$$r_m^{(overall)} = \frac{r_m^{(BLEU)} + r_m^{(ROUGE)} + r_m^{(Levenshtein)}}{3}, \quad (2)$$

где  $r_m^{(BLEU)}$ ,  $r_m^{(ROUGE)}$ ,  $r_m^{(Levenshtein)}$  – соответствующие средние ранги модели  $m$ , полученные для каждой метрики.

Именно этот итоговый средний ранг приведен в последнем столбце таблицы и служит основой для общего сравнения моделей. В таблице меньшие значения ранга означают лучшую позицию (чем меньше – тем лучше).

Итоговое усреднение рангов дает более «метрико-нейтральную» оценку устойчивости модели.

Таблица 1 – Сводная оценка эффективности экстракторов основного контента

Модель	BLEU	ROUGE-LSum	Левенштейн	Итоговый средний ранг
trafilatura	3,950	3,850	3,700	3,833
readability	3,700	4,300	3,950	3,983
web2text	6,450	5,750	5,800	6,000
resiliparse	6,700	6,250	6,150	6,367
bte	6,850	7,150	7,500	7,167
news_please	8,400	8,300	8,050	8,250
boilerpipe	9,000	7,950	8,000	8,317
dragnet	8,450	8,600	8,350	8,467
go_domdistiller	6,650	8,800	10,700	8,717
newspaper3k	8,650	9,100	8,950	8,900
goose3	9,550	9,100	8,600	9,083
crawl4ai	9,650	9,350	9,450	9,483
justext	9,500	9,600	9,400	9,500
boilernet	10,700	10,450	10,350	10,500
extractnet	11,800	11,450	11,050	11,433

По итоговому среднему рангу лидерами оказались Trafilatura и Readability, стабильно показывающие низкие ранги по всем метрикам, что указывает на их устойчивость при работе с разнообразными корпусами. Однако детальный анализ метрик, приведенный в таблицах 2, 3 и 4, показывает, что абсолютного лидера не существует: разные модели оказываются сильнее на разных датасетах, и ни одна не превосходит остальных во всех случаях. Практически все экстракторы хорошо работают на страницах низкой сложности с минимальным количеством boilerplate, где основной контент занимает большую часть текста. На таких страницах даже базовые эвристические методы показывают высокие показатели, иногда превосходя более сложные ML-модели, особенно в плане полноты извлечения.

На сложных страницах с большим количеством boilerplate, динамическим контентом и разнообразной разметкой (Dragnet, Google-Trends-2017, Scrapinghub, CETD) эффективность эвристических экстракторов падает, однако крупные нейросетевые модели также не демонстрируют ожидаемого преимущества. Web2Text показывает высокую точность, в частности на «простых» страницах, однако часть ее преимущества может быть связана с обучением на фрагментах тестового датасета CleanEval. В целом эвристические экстракторы остаются более устойчивыми, тогда как крупные нейросети плохо справляются со сложными страницами и их высокая вычислительная стоимость зачастую не оправдана.

Таблица 2 – Значения BLEU на тестовых датасетах для всех моделей

Модель / датасет	canola	ctcd	cleaneval	cleanportaleval	dragnet	google-trends-2017	l3s-gn1	newspaper3k	readability	scrapinghub
boilernet	0,688	0,698	0,794	0,673	0,588	<b>0,724</b>	0,698	0,599	0,728	0,763
boilerpipe	0,601	0,741	0,706	0,863	0,674	0,595	<b>0,918</b>	0,712	0,742	0,779
bte	0,749	0,832	0,831	0,655	0,709	0,597	0,808	0,634	0,771	0,755
crawl4ai	0,765	0,790	0,782	0,708	0,678	0,582	0,701	0,564	0,758	0,733
dragnet	0,632	0,792	0,685	0,890	0,706	0,562	0,833	0,701	0,689	0,836
extractnet	0,701	0,724	0,746	0,766	0,577	0,521	0,804	0,543	0,715	0,764
go_domdistiller	0,725	0,795	0,810	0,867	0,696	0,648	0,819	0,701	0,000	0,872
goose3	0,671	0,694	0,708	0,877	0,657	0,599	0,806	0,731	0,673	0,829
justext	<b>0,816</b>	0,771	0,826	0,750	0,695	0,567	0,762	0,600	0,481	0,667
news_please	0,662	0,761	0,727	0,882	0,653	0,547	0,832	0,841	0,726	0,861
newspaper3k	0,657	0,761	0,726	0,882	0,653	0,547	0,808	<b>0,855</b>	0,727	0,862
readability	0,719	0,818	0,812	<b>0,901</b>	0,719	0,600	0,880	0,749	0,813	0,878
resiliparse	0,718	0,807	0,821	0,848	0,641	0,716	0,756	0,671	0,881	0,901
trafilatura	0,721	0,831	0,789	0,877	0,751	0,711	0,825	0,721	<b>0,895</b>	<b>0,907</b>
web2text	0,746	<b>0,864</b>	<b>0,865</b>	0,705	<b>0,753</b>	0,606	0,800	0,613	0,808	0,733

Таблица 3 – Значения ROUGE-LSum на тестовых датасетах для всех моделей

Модель / датасет	canola	ctcd	cleaneval	cleanportaleval	dragnet	google-trends-2017	l3s-gn1	newspaper3k	readability	scrapinghub
boilernet	0,765	0,817	0,868	0,751	0,708	<b>0,800</b>	0,794	0,654	0,805	0,844
boilerpipe	0,699	0,850	0,808	0,909	0,773	0,704	<b>0,951</b>	0,755	0,826	0,855
bte	0,803	<b>0,920</b>	0,884	0,773	0,798	0,674	0,864	0,686	0,827	0,822
crawl4ai	0,814	0,864	0,870	0,802	0,772	0,680	0,767	0,640	0,826	0,815
dragnet	0,699	0,881	0,764	0,924	0,801	0,660	0,877	0,738	0,782	0,895
extractnet	0,765	0,842	0,808	0,855	0,692	0,624	0,867	0,608	0,794	0,846
go_domdistiller	0,780	0,885	0,860	0,028	0,000	0,006	0,859	0,740	0,914	0,918
goose3	0,737	0,799	0,791	0,929	0,763	0,701	0,861	0,772	0,761	0,878
justext	<b>0,861</b>	0,862	0,881	0,823	0,785	0,649	0,813	0,642	0,534	0,726
news_please	0,730	0,855	0,811	0,923	0,746	0,644	0,880	0,845	0,794	0,904
newspaper3k	0,726	0,857	0,802	0,923	0,745	0,644	0,856	<b>0,859</b>	0,795	0,905
readability	0,779	0,903	0,869	<b>0,931</b>	0,806	0,685	0,918	0,779	0,863	0,917
resiliparse	0,786	0,881	0,877	0,904	0,724	0,785	0,839	0,719	<b>0,919</b>	<b>0,942</b>
trafilatura	0,781	0,906	0,857	0,920	<b>0,839</b>	0,790	0,880	0,758	0,934	0,941
web2text	0,812	0,918	<b>0,912</b>	0,809	0,829	0,696	0,871	0,686	0,868	0,823

Таблица 4 – Значения нормализованного расстояния Левенштейна на тестовых датасетах для всех моделей

Модель /датасет	canola	cted	cleaneval	cleanportaleval	dragnet	google-trends-2017	l3s-gn1	newspaper3k	readability	scrapinghub
boilernet	0,761	0,814	0,865	0,743	0,703	<b>0,793</b>	0,778	0,652	0,800	0,841
boilerpipe	0,692	0,846	0,804	0,908	0,769	0,692	<b>0,928</b>	0,753	0,821	0,848
bte	0,800	0,894	0,882	0,770	0,794	0,667	0,848	0,685	0,824	0,820
crawl4ai	0,808	0,854	0,866	0,797	0,763	0,669	0,756	0,634	0,822	0,810
dragnet	0,694	0,879	0,762	0,923	0,798	0,651	0,865	0,737	0,780	0,894
extractnet	0,761	0,838	0,806	0,853	0,689	0,615	0,858	0,607	0,791	0,842
go_domdistiller	0,775	0,000	0,010	0,028	0,000	0,006	0,843	0,738	0,911	0,917
goose3	0,732	0,793	0,784	<b>0,928</b>	0,758	0,694	0,856	0,770	0,757	0,877
justext	<b>0,855</b>	0,859	0,881	0,816	0,781	0,638	0,803	0,638	0,533	0,722
news_please	0,726	0,851	0,804	0,922	0,739	0,636	0,867	0,845	0,793	0,902
newspaper3k	0,722	0,851	0,795	0,922	0,738	0,636	0,843	<b>0,859</b>	0,794	0,902
readability	0,776	0,896	0,868	0,931	0,804	0,678	0,905	0,779	0,862	0,917
resiliparse	0,785	0,879	0,876	0,904	0,720	0,780	0,818	0,717	0,918	<b>0,941</b>
trafilatura	0,778	0,905	0,851	0,919	<b>0,837</b>	0,786	0,866	0,756	<b>0,932</b>	0,940
web2text	0,808	<b>0,914</b>	<b>0,910</b>	0,809	0,827	0,692	0,850	0,684	0,866	0,822

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование систем автоматического извлечения основного содержимого веб-страниц позволило оценить 15 современных экстракторов на 10 ключевых датасетах. Методы классифицированы как эвристические, машинно-обучаемые и гибридные, их эффективность оценена с использованием метрик BLEU, ROUGE-LSum и нормализованного коэффициента Левенштейна.

Эксперименты подтверждают, что универсального экстрактора, способного надежно работать во всех сценариях и на всех типах страниц, на сегодняшний день не существует. Результаты ставят под сомнение распространенное предположение о том, что более сложные и ресурсоемкие нейросетевые модели всегда точнее: в ряде случаев простые эвристики и грамотно построенные гибриды оказываются конкурентоспособными и более экономичными.

Дальнейший прогресс в области извлечения основного веб-контента потребует сочетания продвинутых и экономичных методов, ансамблей, а также появления качественных современных датасетов и механизмов автоматического подбора или адаптации экстрактора под конкретную страницу или домен. Мы отмечаем, что количество методов, специально ориентированных на работу на уровне сайта, остается небольшим. Разработка алгоритмов, способных эффективно работать при ограниченной информации о домене и одновременно адаптироваться к разнообразным сайтам, представляется перспективным направлением исследований.

### Список источников

1. Finn, A. Fact or Fiction: Content Classification for Digital Libraries / A. Finn, N. Kushmerick, B. Smyth // Proceedings of the Second DELOS Network of Excellence Workshop on Personalisation and Recommender Systems in Digital Libraries. – Dublin : ERCIM, 2001. – 6 p.
2. Gibson, D. The volume and evolution of web page templates / D. Gibson, K. Punera, A. Tomkins // Proceedings of the 14th International Conference on World Wide Web (WWW'05). – 2005. – P. 830–839.
3. Weninger, T. CETR: Content extraction via tag ratios / T. Weninger, W. H. Hsu, J. Han // Proceedings of the 19th International Conference on World Wide Web (WWW'10). – New York : Association for Computing Machinery, 2010. – P. 971–980.
4. Lopukhin, K. In-depth analysis and evaluation on the quality of article body extraction : technical report / K. Lopukhin. – Zyte, 2021. – 20 p.
5. Bevendorff, J. An Empirical Comparison of Web Content Extraction Algorithms / J. Bevendorff, S. Gupta, J. Kiesel, B. Stein // Proceedings of the 46th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR'23). – New York : Association for Computing Machinery, 2023. – 10 p.
6. Endr dy, I. More Effective Boilerplate Removal – the GoldMiner Algorithm / I. Endr dy, A. Nov k // Polibits. – 2013. – Vol. 48. – P. 79–83.

7. Sun, F. DOM based content extraction via text density / F. Sun, D. Song, L. Liao // Proceedings of the 34th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR'11). – Beijing : ACM, 2011. – P. 245–254.
8. Hamborg, F. News-please: A Generic News Crawler and Extractor / F. Hamborg, N. Meuschke, C. Breiting, B. Gipp // Proceedings of the 15th International Symposium of Information Science (ISI 2017). – Berlin : Verlag Werner Hülsbusch, 2017. – P. 218–223.
9. Peters, M. E. Content extraction using diverse feature sets / M. E. Peters, D. Lecocq // 22nd International World Wide Web Conference, Companion Volume (WWW'13). – Rio de Janeiro : IW3C2 / ACM, 2013. – P. 89–90.
10. Kohlschütter, C. Boilerplate detection using shallow text features / C. Kohlschütter, P. Fankhauser, W. Nejdl // Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM'10). – New York : ACM, 2010. – P. 441–450.
11. Bauer, D. FIASCO: Filtering the Internet by Automatic Subtree Classification / D. Bauer, J. Degen, X. Deng et al. – Osnabrück : University of Osnabrück, 2007. – 11 p.
12. Vogels, T. Web2Text: Deep structured boilerplate removal / T. Vogels, O.-E. Ganea, C. Eickhoff // Advances in Information Retrieval – 40th European Conference on IR Research, ECIR 2018. – Grenoble : Springer, 2018. – P. 167–179.
13. Leonhardt, J. Boilerplate removal using a neural sequence labeling model / J. Leonhardt, A. Anand, M. Khosla // Companion Proceedings of the Web Conference 2020 (WWW'20). – New York : ACM, 2020. – P. 226–229.
14. Zhang, H. Boilerplate detection via semantic classification of text blocks / H. Zhang, J. Wang // International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'21). – IEEE, 2021. – P. 1–8.
15. Jung, G. Don't read, just look: Main content extraction from web pages using visual features / G. Jung, S. Han, H. Kim, K. Kim, J. Cha // Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2021). – 2021. – P. 1–10.
16. Pomikálek J. Removing boilerplate and duplicate content from web corpora : PhD thesis / J. Pomikálek. – Brno : Masaryk University, 2011. – 108 p.
17. Baroni, M. Cleaneval: a Competition for Cleaning Web Pages / M. Baroni, F. Chantree, A. Kilgarriff, S. Sharoff // Proceedings of the Sixth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'08). – Marrakech : ELRA, 2008. – P. 638–643.
18. Alarte, J. Web Template Extraction Based on Hyperlink Analysis / J. Alarte, D. Insa, J. Silva, S. Tamarit // Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science (PROLE 2014). – 2015. – P. 16–26.
19. Barbaresi, A. Trafilatura: A Web Scraping Library and Command-Line Tool for Text Discovery and Extraction / A. Barbaresi // Proceedings of the Joint Conference of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing (ACL/IJCNLP 2021): System Demonstrations. – Association for Computational Linguistics, 2021. – P. 122–131.
21. Newspaper3k: Article scraping & curation. – URL: <https://newspaper.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 05.11.2025).
22. jusText: Heuristic based boilerplate removal tool. – URL: <https://pypi.org/project/jusText/> (дата обращения: 07.11.2025).
23. python-readability: Fast Python port of Arc90's readability tool. – URL: <https://github.com/buriy/python-readability> (дата обращения: 09.11.2025).
24. Resiliparse. html2text: HTML text extraction module. – URL: <https://resiliparse.chatnoir.eu/en/stable/api/extract/html2text.html> (дата обращения: 11.11.2025).
25. go-domdistiller: Go port of DOM Distiller. – URL: <https://github.com/markusmobius/go-domdistiller> (дата обращения: 13.11.2025).
26. Crawl4AI: Open-source LLM Friendly Web Crawler & Scraper. – URL: <https://github.com/un-clecode/crawl4ai> (дата обращения: 15.11.2025).
27. ExtractNet: Neural Web Page Extraction. – URL: <https://github.com/currentslab/extractnet> (дата обращения: 17.11.2025).
28. boilerpy3: Python 3 wrapper for Boilerpipe. – URL: <https://pypi.org/project/boilerpy3/> (дата обращения: 19.11.2025).
29. Newspaper3k Test Data. – URL: <https://github.com/codelucas/newspaper/tree/master/tests/data> (дата обращения: 23.11.2025).
30. Readability: A standalone version of the readability library. – URL: <https://github.com/mozilla/readability> (дата обращения: 25.11.2025).

#### References

1. Finn, A., Kushmerick, N., Smyth, B. Fact or Fiction: Content Classification for Digital Libraries. *Proceedings of the Second DELOS Network of Excellence Workshop on Personalisation and Recommender Systems in Digital Libraries*. Dublin, ERCIM, 2001. 6 p.
2. Gibson, D., Punera, K., Tomkins, A. The volume and evolution of web page templates. *Proceedings of the 14th International Conference on World Wide Web (WWW'05)*, 2005, pp. 830–839.
3. Weninger, T., Hsu, W. H., Han, J. CETR: Content extraction via tag ratios. *Proceedings of the 19th International Conference on World Wide Web (WWW'10)*. New York, Association for Computing Machinery, 2010, pp. 971–980.
4. Lopukhin, K. *In-depth analysis and evaluation on the quality of article body extraction : technical report*. Zyte, 2021. 20 p.

5. Bevendorff, J., Gupta, S., Kiesel, J., Stein, B. An Empirical Comparison of Web Content Extraction Algorithms. *Proceedings of the 46th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR'23)*. New York, Association for Computing Machinery, 2023. 10 p.
6. Endrédi, I., Novák, A. More Effective Boilerplate Removal – the GoldMiner Algorithm. *Polibits*, 2013, vol. 48, pp. 79–83.
7. Sun, F., Song, D., Liao, L. DOM based content extraction via text density. *Proceedings of the 34th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR'11)*. Beijing, ACM, 2011, pp. 245–254.
8. Hamborg, F., Meuschke, N., Breiting, C., Gipp, B. news-please: A Generic News Crawler and Extractor. *Proceedings of the 15th International Symposium of Information Science (ISI 2017)*. Berlin, Verlag Werner Hülsbusch, 2017, pp. 218–223.
9. Peters, M. E., Lecocq, D. Content extraction using diverse feature sets. *22nd International World Wide Web Conference, Companion Volume (WWW'13)*. Rio de Janeiro, IW3C2 / ACM, 2013, pp. 89–90.
10. Kohlschütter, C., Fankhauser, P., Nejdl, W. Boilerplate detection using shallow text features. *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM'10)*. New York, ACM, 2010, pp. 441–450.
11. Bauer, D., Degen, J., Deng, X. et al. *FIASCO: Filtering the Internet by Automatic Subtree Classification*. Osnabrück, University of Osnabrück, 2007. 11 p.
12. Vogels, T., Ganea, O.-E., Eickhoff, C. Web2Text: Deep structured boilerplate removal. *Advances in Information Retrieval – 40th European Conference on IR Research, ECIR 2018*. Grenoble, Springer, 2018, pp. 167–179.
13. Leonhardt, J., Anand, A., Khosla, M. Boilerplate removal using a neural sequence labeling model. *Companion Proceedings of the Web Conference 2020 (WWW'20)*. New York, ACM, 2020, pp. 226–229.
14. Zhang, H., Wang, J. Boilerplate detection via semantic classification of text blocks. *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'21)*. IEEE, 2021, pp. 1–8.
15. Jung, G., Han, S., Kim, H., Kim, K., Cha, J. Don't read, just look: Main content extraction from web pages using visual features. *Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2021)*, 2021, pp. 1–10.
16. Pomikálek, J. Removing boilerplate and duplicate content from web corpora : PhD thesis. Brno, Masaryk University, 2011. 108 p.
17. Baroni, M., Chantree, F., Kilgarriff, A., Sharoff, S. Cleaneval: a Competition for Cleaning Web Pages. *Proceedings of the Sixth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'08)*. Marrakech, ELRA, 2008, pp. 638–643.
18. Alarte, J., Insa, D., Silva, J., Tamarit, S. Web Template Extraction Based on Hyperlink Analysis. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science (PROLE 2014)*, 2015, pp. 16–26.
19. Barbaresi, A. Trafilatura: A Web Scraping Library and Command-Line Tool for Text Discovery and Extraction. *Proceedings of the Joint Conference of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing (ACL/IJCNLP 2021): System Demonstrations*. Association for Computational Linguistics, 2021, pp. 122–131.
20. Song, D., Sun, F., Liao, L. A hybrid approach for content extraction with text density and visual importance of DOM nodes. *Knowledge and Information Systems*, 2015, vol. 42, pp. 75–96.
21. *Newspaper3k: Article scraping & curation*. Available at: <https://newspaper.readthedocs.io/en/latest/> (accessed 05.11.2025).
22. *jusText: Heuristic based boilerplate removal tool*. Available at: <https://pypi.org/project/jusText/> (accessed 07.11.2025).
23. *python-readability: Fast Python port of Arc90's readability tool*. Available at: <https://github.com/buriy/python-readability> (accessed 09.11.2025).
24. Resiliparse. html2text: HTML text extraction module. Available at: <https://resiliparse.chatnoir.eu/en/stable/api/extract/html2text.html> (accessed 11.11.2025).
25. go-domdistiller: Go port of DOM Distiller. Available at: <https://github.com/markusmobius/go-domdistiller> (accessed 13.11.2025).
26. Crawl4AI: Open-source LLM Friendly Web Crawler & Scraper. Available at: <https://github.com/unclecode/crawl4ai> (accessed 15.11.2025).
27. ExtractNet: Neural Web Page Extraction. Available at: <https://github.com/currentslab/extractnet> (accessed 17.11.2025).
28. boilerpy3: Python 3 wrapper for Boilerpipe. Available at: <https://pypi.org/project/boilerpy3/> (accessed 19.11.2025).
29. Newspaper3k Test Data. Available at: <https://github.com/codelucas/newspaper/tree/master/tests/data> (accessed 23.11.2025).
30. Readability: A standalone version of the readability library. Available at: <https://github.com/mozilla/readability> (accessed 25.11.2025).

Статья поступила в редакцию 04.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 04.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 10.02.2026.

УДК 004.9:656.01:656.076.2

**ОЦЕНКА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕННОСТИ МАРШРУТОВ ЭЛЕКТРОБУСОВ  
С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ МАРШРУТА И ИНДИВИДУАЛЬНЫХ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОБУСОВ**

*Данилов Иван Андреевич*, Волгоградский государственный технический университет, 400074, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, аспирант, ORCID 0009-0003-5718-674X, e-mail: danilov\_ivan98@bk.ru

*Садовникова Наталья Петровна*, Волгоградский государственный технический университет, 400074, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0002-7214-9432, e-mail: npsn1@ya.ru

*Парыгин Данила Сергеевич*, Волгоградский государственный технический университет, 400074, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0001-8834-5748, e-mail: dparygin@gmail.com

*Срыбный Владислав Дмитриевич*, Волгоградский государственный технический университет, 400074, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, студент, e-mail: vladsrybny@gmail.com

*Иванова Екатерина Андреевна*, Волгоградский государственный технический университет, 400074, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, студент, e-mail: ekaiva27@yandex.ru

В последнее время во многих городах складывается тенденция к переходу городского общественного транспорта от дизельных и бензиновых двигателей к двигателям, использующим электроэнергию. Известно, что электробусы нуждаются в дополнительной инфраструктуре, что увеличивает общую стоимость внедрения данного типа транспорта в системы городского общественного транспорта. Многие авторы подходят к вопросу размещения электрических зарядных станций электробусов с экономической стороны, зачастую не учитывая тот факт, что аккумуляторы электробусов подвержены деградации, постепенно снижающей максимальную емкость аккумулятора, а следовательно, и запас хода электробуса. Это упущение может потенциально привести к необходимости чаще производить дорогостоящее обслуживание электробусов, что нивелирует всю экономическую выгоду от корректного размещения электрических зарядных станций. Метод, представленный в данной работе, нацелен на определение зоны досягаемости электробусов на маршруте с учетом индивидуальных эксплуатационных характеристик электробусов, таких как объем аккумулятора, степень деградации и др., а также с учетом особенностей маршрута. Представленный метод позволяет моделировать различные сценарии эксплуатации маршрута, что может быть полезно при выборе вариантов размещения электрических зарядных станций электробусов с точки зрения долгосрочности этих вариантов. Работоспособность метода протестирована на примере маршрута электробуса № 15 в г. Волгограде.

**Ключевые слова:** электробус, зарядные станции, энергообеспеченность маршрутов, оптимизация, оценка, городской транспорт, экологический транспорт, коэффициент сложности маршрута, зона досягаемости, пассажиропоток, трафик, городская среда

*Благодарности:* исследование выполнено при поддержке «Центра цифровых научно-образовательных проектов и разработок в сфере промышленного искусственного интеллекта» Ц2RED-III ВолгГТУ, созданного в рамках реализации образовательных программ топ-уровня в сфере искусственного интеллекта (Соглашение № 70-2025-000756). Авторы выражают благодарность коллегам по кафедре цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве ИАиС ВолгГТУ, принимавшим участие в разработке проекта.

**EVALUATION OF THE ENERGY SUPPLY OF ELECTRIC BUS ROUTES  
TAKING INTO ACCOUNT THE ROUTE FEATURES AND INDIVIDUAL  
OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC BUSES**

*Danilov Ivan A.*, Volgograd State Technical University, 1 Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, graduate student, ORCID 0009-0003-5718-674X, e-mail: danilov\_ivan98@bk.ru

*Sadovnikova Natalia P.*, Volgograd State Technical University, 1 Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID 0000-0002-7214-9432, e-mail: npsn1@ya.ru

*Parygin Danila S.*, Volgograd State Technical University, 1 Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID 0000-0001-8834-5748, e-mail: dparygin@gmail.com

*Srybny Vladislav D.*, Volgograd State Technical University, 1 Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, student, e-mail: vladsrybny@gmail.com

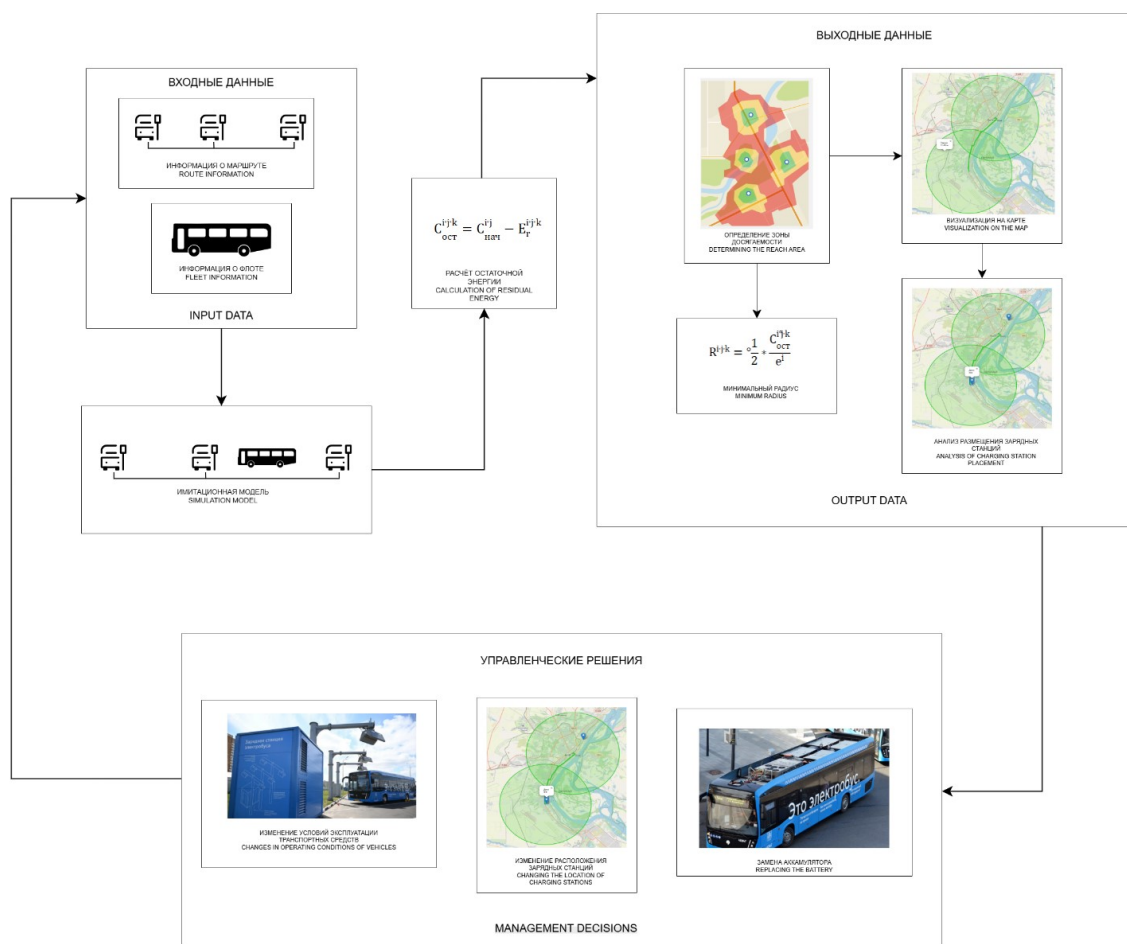
*Ivanova Ekaterina A.*, Volgograd State Technical University, 1 Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, student, e-mail: ekaiva27@yandex.ru

Recently, there has been a trend in many cities towards the transition of urban public transport from diesel and gasoline engines to electric-powered engines. It is known that electric buses need additional infrastructure, which increases the total cost of introducing this type of transport into urban public transport systems. Many authors approach the issue of placing electric bus charging stations from the economic side, often not taking into account the fact that electric bus batteries are subject to degradation, which gradually reduces the maximum battery capacity, and, consequently, the power reserve of the electric bus. This omission may potentially lead to the need to perform expensive maintenance of electric buses more often, which negates all the economic benefits from the correct placement of charging stations. The method presented in this paper is aimed at determining the range of electric buses on the route, taking into account the individual performance characteristics of electric buses, such as battery capacity, degree of degradation, etc., as well as taking into account the specifics of the route. The presented method makes it possible to simulate various scenarios of route operation, which may be useful when choosing options for the placement of electric bus charging stations in terms of the long-term viability of these options. The efficiency of the method was tested using the example of the route of the electric bus no. 15 in Volgograd.

**Keywords:** electric bus, charging stations, route energy supply, optimization, evaluation, urban transport, environmental transport, route complexity factor, reach area, passenger traffic, traffic, urban environment.

**Acknowledgments:** the study was carried out with the support of the Center for Digital Scientific and Educational Projects and Developments in the Field of Industrial Artificial Intelligence (Ц2RED-AI) of Volgograd State Technical University, created as part of the implementation of top-level educational programs in the field of artificial intelligence (Agreement 70-2025-000756). The authors express gratitude to colleagues from the Department of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering, VSTU involved in the development of the project.

### Graphical annotation (Графическая аннотация)



### ВВЕДЕНИЕ

Современные города обязаны удовлетворять требования и потребности их жителей и гостей. Комфорт, доступность, экологичность, устойчивость – все эти требования стали неотъемлемыми критериями, учитывающимися при развитии городской среды любого города на планете. Экологическая сторона города является наиболее актуальной темой для исследований и развития в последнее время. Многие страны направляют свои ресурсы на снижение своего экологического следа и агитируют другие страны последовать их примеру [1, 2].

К примеру, согласно Парижскому соглашению (2015 г.), каждая страна-подписант соглашения обязуется сократить количество выбросов углекислых газов в атмосферу для достижения общей цели – удержание роста глобальной средней температуры до 2 °С. Россия входит в число стран – участниц данного соглашения, соответственно, задача снижения выбросов углекислого газа является актуальной для местных властей любого города Российской Федерации.

В городах существует множество источников выбросов углекислого газа. Но основным источником выбросов углекислого газа в городской среде является транспорт (по разным отчетам, 72 % и более) [3, 4]. Такой высокий процент выбросов связан с растущими темпами урбанизации и ростом количества транспортных средств в городах (как личных, так и общественных/коммерческих). Согласно исследованиям, спрос на транспортные средства с двигателями на электродвижущей силе (ЭДС) ежегодно растет, и такие транспортные средства имеют потенциал заменить транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в обозримом будущем [5].

Помимо личного транспорта, «вклад» в проблему выбросов вносит и общественный транспорт в городах. Бензиновые и дизельные автобусы также производят значительную долю выбросов углекислого газа в атмосферу. Логичным решением было бы заменить эти транспортные средства на тех маршрутах, где это возможно, на более технологичный и экологичный транспорт. В России, по подсчетам правительства, в 2021 г. около 75 % общественного транспорта [6] имело срок службы более 15 лет. Согласно распоряжению правительства, устаревающие транспортные средства следует заменить на более современные – отвечающие новым требованиям комфорта, технологичности и экологичности. Так происходит постепенная эволюция городского наземного общественного транспорта – от троллейбусов к электробусам.

Несмотря на многие явные преимущества ЭДС перед ДВС, на текущий момент у них есть один весомый недостаток, не позволяющий совершить полноценный технологический переход от бензина к электричеству. Объем современных аккумуляторных литиевых батарей ограничен, что отражается на запасе хода электробуса до подзарядки. Подзарядка же таких батарей требует на порядок больше времени, чем заправка топливного бака для транспортного средства на ДВС. В связи с этим растет исследовательский интерес к эффективности зарядки электробусов [7]. Кроме того, литиевые аккумуляторы чувствительны к воздействию различных внешних факторов. В случае батарей, установленных в электрическом общественном транспорте, к подобным факторам можно отнести: перепады температур, длина маршрута, его рельеф, трафик на маршруте, а также пассажиропоток (точнее, пиковая загруженность транспортного средства). Этот недостаток объясняет актуальность исследований в области повышения срока службы и энергоэффективности аккумуляторов электробусов при их ежедневной эксплуатации.

Помимо этого, размещение зарядных станций (ЗС) электробусов также является предметом активных исследований на сегодняшний день. Поскольку размещение ЗС электробусов напрямую влияет на общую стоимость внедрения электротранспорта в систему городского наземного транспорта, целесообразно продумывать их размещение с учетом текущих и потенциальных потребностей городской транспортной сети. Некорректное размещение ЗС электробусов может не только отразиться на стоимости внедрения электротранспорта в систему городского общественного транспорта, но и оказать негативное влияние на общий срок эксплуатации аккумуляторных батарей электробусов, а также на их запас хода на маршруте.

В этой работе представлен метод поддержки принятия решений для оценки энергообеспеченности маршрутов электробусов, учитывающий как индивидуальное состояние каждого из транспортных средств, входящих в состав «флота» маршрута, так и характеристики маршрута: его длину, расстояние от конечных станций до ближайших ЗС, рельеф, трафик и пассажиропоток. Представленный метод разработан для поддержки принятия решений при решении задач оценки или составления маршрутов электротранспорта. Алгоритм учитывает особенности маршрута, а также состояние «флота» данного маршрута. Данная особенность позволяет спрогнозировать работу флота электробусов маршрута для различных конфигураций этого флота путем моделирования различных сценариев.

Основная цель оценки – оценка и оптимизация энергообеспеченности маршрутов электробусов с учетом состояния флота электробусов, характеристик маршрута, а также зарядной инфраструктуры. Эта задача является критически важной и имеет влияние сразу на несколько аспектов городского хозяйства:

1. Экономический аспект – увеличение срока службы электробусов позволяет максимально отдалить наиболее «чувствительный» для бюджета момент замены аккумулятора (так как аккумулятор – самая дорогая часть электробуса).
2. Экологический аспект – отработанные аккумуляторы необходимо утилизировать, как и другие крупные литиевые аккумуляторы. Это имеет определенный эффект на экологический фон.

Пусть  $x$  – вектор решений:

$$x = (x_e, x_b, x_{pd}),$$

где  $x_e$  – общее число электробусов, задействованных на маршруте;

$x_b$  – ёмкость аккумулятора каждого электробуса на маршруте;

$x_{pd}$  – расстояние до зарядной станции.

Каждая переменная из вектора решений имеет ограничения:

– число электробусов на маршруте должно быть положительным натуральным числом:  $x_e \in \mathbb{N}$ ;

– ёмкость аккумулятора электробуса должна находиться в допустимых пределах:  $x_b \in [C_{\min}, C_{\max}]$ ;

– расстояние от конечной точки до ближайшей зарядной станции, привязанной к этой конечной точке, должно быть в пределах от 0 до максимального допустимого расстояния до конечной станции:  $x_{pd} \in [0, L_{\max}]$  (где  $L_{\max}$  – максимальное допустимое расстояние между конечной точкой маршрута и местом ближайшего расположения ЭЗС).

Таким образом, множество допустимых решений с учетом ограничений записывается как:

$$X = \{x \mid x_e \in \mathbb{N}, x_b \in [C_{\min}, C_{\max}], x_{pd} \in [0, L_{\max}]\}.$$

Также пусть  $\theta$  – множество параметров модели. В таком случае  $\theta$  примет вид:

$$\theta = (L, R, T, P, TR),$$

где  $L$  – длина маршрута;

$R$  – рельеф маршрута (наличие подъемов/уклонов и т. д.);

$T$  – средняя температура наружного воздуха в области расположения маршрута;

$P$  – пассажиропоток на маршруте;

$TR$  – трафик на пути следования маршрута.

В таком случае задача будет иметь следующий вид следующий вид (1):

$$\min_{x \in X} f(x; \theta), \quad (1)$$

где  $f$  – эксплуатационные расходы для флота электробусов.

### СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ И РАЗМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОБУСОВ

Существует множество работ, посвященных размещению ЗС электробусов в городе. Каждый автор предлагает различные методы решения задачи размещения ЗС с учетом одного или нескольких критериев: стоимости размещения, стоимости подключения к энергосети города, удаленности от конечных точек маршрута, охвата зарядной станции (количество потенциальных маршрутов, которые может обслуживать ЗС). Тем не менее все эти подходы направлены на решение задачи размещения и зачастую предлагают практически безальтернативный «единственно верный» вариант (в некоторых работах все же предлагается выборка из нескольких точек). Этот подход может быть актуален в отдельных случаях, однако в реальности решение следует принимать, беря во внимание совокупность множества вышеперечисленных факторов. Некоторые исследователи [8–10] применяют различные методы для минимизации затрат (к примеру, количества циклов восстановления заряда аккумуляторов электробусов и общее количество необходимых транспортных средств).

В работе [11] авторы применяют алгоритмы кластеризации для решения задачи размещения зарядных станций электробусов. Алгоритм разбивает карту местности «сеткой» и определяет оптимальное место расположения ЗС среди ячеек этой сетки. Такой подход позволяет визуализировать процесс подбора оптимального местоположения ЗС для пользователя, что является существенным преимуществом перед другими алгоритмами, предоставляющим пользователям готовые безальтернативные решения. Однако, как утверждают сами авторы, алгоритм не учитывает некоторые внешние факторы, такие как соображения безопасности или планы урбанизации.

Работа [12] отличается использованием очередей для оптимизации размещения ЗС электробусов. Авторы представляют новую модель оптимизации размещения быстрых зарядных станций. В работе также производится анализ соотношения потребности электробусов в дополнительном восполнении заряда на маршруте с изменением его объема аккумулятора. Известно, что литиевые аккумуляторы теряют свой объем во время эксплуатации и с течением времени. Принятая допустимая степень деградации аккумулятора электробуса – 20 %. На примере изысканий авторов можно сделать вывод, что при отсутствии должного технического обслуживания транспортных средств (своевременной замены батарей), учащение необходимости в восстановлении заряда электробуса негативно отразится на комфорте пассажиров (появится необходимость в подзарядках во время рейса), стоимости его эксплуатации (частые подзарядки также негативно отражаются на состоянии аккумулятора), а также на стоимости эксплуатации – электробус будет потреблять больше электроэнергии, соответственно, увеличится общая стоимость эксплуатации.

Также существуют работы, не относящиеся к электробусам напрямую, но также решающие проблему размещения ЗС. Так, к примеру, в работе [13] авторы предлагают использовать алгоритмы машинного обучения для решения задачи размещения зарядных станций для электромобилей. Данная работа также отличается визуализацией результатов, полученных в ходе исследования. Тем не менее, несмотря на то, что процессы выбора точки размещения зарядной станции электромобилей и электробуса учитывают практически одни и те же факторы и переменные, влияющие на итоговый результат, планирование размещения зарядных станций электробусов все же требует более индивидуальный подход. К примеру, при размещении ЗС электробуса, помимо прочих переменных, следует учитывать удаленность этой зарядной станции от конечной станции маршрутов, которые она обслуживает.

Таким образом, можно сделать вывод, что процесс размещения ЗС электробусов пользуется исследовательским интересом. Однако многие исследователи стремятся решить проблему путем использования одного (пусть и гибкого, в некоторых случаях), унифицированного решения. Этот подход может предоставить идеальное решение для одних случаев (в лучшем случае) и не очень оптимальное – для других (или не предоставить его вовсе). Это обстоятельство и тот факт, что конечное решение о размещении ЗС электробусов принимает лицо, принимающее решения, т. е. человек, способствовали разработке метода поддержки принятия решений при оценке энергообеспеченности маршрутов электробусов.

### **МЕТОД ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕННОСТИ МАРШРУТОВ ЭЛЕКТРОБУСОВ**

Метод, представленный в данной работе, учитывает такие особенности маршрута, как: состояние флота, рельеф, трафик и пассажиропоток, а также непосредственные геопространственные характеристики маршрута: длину, расположение конечных станций, а также вариабельность маршрута (направления движения).

Часть данных, учитываемых в предложенном методе, вычисляется в ходе работы (к примеру, для каждого направления выбранного маршрута рассчитывается длина маршрута), однако другая часть данных (связанная с флотом и практическими знаниями о маршруте, например рельефе или пассажиропотоке), должна быть предоставлена извне. В контексте данной работы данные о флоте и некоторых особенностях маршрута симулируются для демонстрации работы метода. В будущих работах будет представлен вспомогательный программный метод сбора и анализа практических данных.

В качестве входных данных метод будет использовать:

1. Данные о флоте маршрута: его состав, индивидуальные характеристики каждого транспортного средства – его номинальный объем аккумулятора, степень деградации аккумулятора, потребление энергии на 1 км хода.
2. Практические характеристики маршрута: пассажиропоток в «часы пик», транспортный трафик на пути следования маршрута в «часы пик», а также погодные условия (в зависимости от которых, согласно правилам провоза пассажиров, включается система климат-контроля).
3. Геоданные маршрута: его длина, расположение конечных станций, а также вариабельность направлений маршрута.

Таким образом, можно гарантировать достоверность моделирования движения флота по маршруту. Важно отметить, что в модели имитируется поведение флота в «час пик». Это связано с тем фактом, что потребление электроэнергии электробусов в эти часы можно считать максимальным, что позволяет симулировать наихудший сценарий ежедневной эксплуатации. Если один или несколько экземпляров электробусов не будут иметь достаточного количества энергии на конечной станции для продолжения движения по маршруту, то этим экземплярам необходимо отправиться на восстановление заряда. Если же остаточной энергии не хватит на движение до точки восстановления заряда, значит маршрут расходует слишком много энергии и необходимо принять меры для оптимизации маршрута или флота, привязанного к этому маршруту.

Алгоритм анализа маршрута состоит из следующих основных шагов:

1. Ввод данных о маршруте.
2. Сформировать по координатам остановок прямой и обратный маршрут.
3. Создать схему области и нанести маршрут на схему.
4. Вычислить длину маршрута (для обоих направлений).
5. Для каждого электробуса симулировать цикл движения по маршруту без подзарядки, пока остаточный объем энергии электробуса позволяет продолжать движение по маршруту:
  - а) если объем энергии на конечной точке меньше минимального объема, необходимого для движения по маршруту и меньше минимального допустимого объема энергии, вернуться к предыдущему состоянию – предыдущей конечной точке – и принять соответствующий данной точке объем энергии за остаточный объем;

б) если объем энергии на конечной точке меньше минимального объема, необходимого для движения по маршруту и больше или равен минимальному допустимому объему энергии, принять соответствующий данной точке объем энергии за остаточный объем.

6. Для каждого электробуса рассчитать запас хода, который будет соответствовать радиусу зоны досягаемости, в каждой конечной точке.

7. Найти наименьшие радиусы зоны досягаемости для каждой конечной точки.

8. Нанести на схему зоны досягаемости для каждой конечной точки.

9. Вывести схему.

Подробная блок-схема алгоритма продемонстрирована на рисунке 1.

Симуляция движения производится для каждого транспортного средства, привязанного к данному маршруту. Это необходимо для определения «наихудшего» транспортного средства по соотношению остаточной энергии к энергопотреблению на 1 км. Эти данные, в свою очередь, необходимы для построения зоны досягаемости электробуса на маршруте.

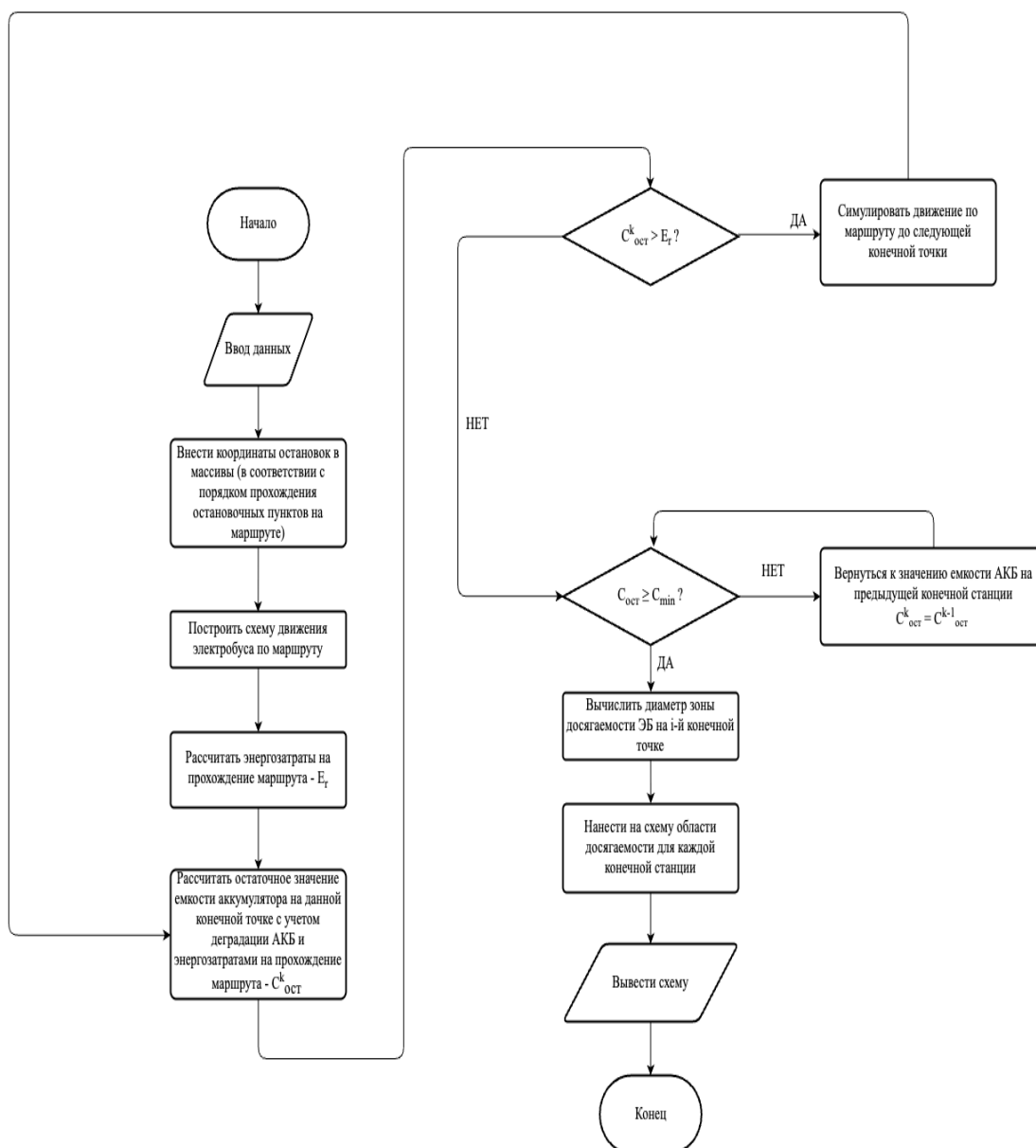


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма определения зоны досягаемости

Зона досягаемости представляет собой зону, центром которой является конечная станция маршрута, от которой произведен последний расчет остаточной энергии с радиусом, равным отношению объема остаточной энергии электробуса в этой конечной точке маршрута к его энергопотреблению на 1 км пути:

$$R^{ijk} = \frac{1}{2} * \frac{C_{ост}^{ijk}}{e^i}, \quad (2)$$

где  $R^{ijk}$  – радиус зоны досягаемости для  $i$ -го электробуса на  $j$ -м маршруте на  $k$ -м конечном пункте, км;  
 $C_{ост}^{ijk}$  – остаточное значение объема аккумулятора  $i$ -го электробуса на  $j$ -м маршруте в  $k$ -м направлении, кВт\*ч;

$e^i$  – энергозатраты  $i$ -го электробуса на прохождение 1 км пути, кВт\*ч/км.

Для точного определения «наихудшего» экземпляра электробуса на маршруте следует вычислить радиус зоны досягаемости каждого экземпляра электробуса на маршруте, а затем определить наименьший из них. Плюсом такого подхода будет то, что после вычислений будут известны зоны досягаемости каждого электробуса на маршруте. Это может быть полезно для анализа общего состояния маршрута (к примеру, определения тех экземпляров, которые не смогут добраться до ЗС с конечной точки маршрута).

Пусть  $X$  – множество электробусов на заданном маршруте. В таком случае функция определения наилучшего экземпляра электробуса на маршруте примет вид:

$$\min_{R \in X} f(R), \quad (3)$$

где  $R$  – радиус зоны досягаемости электробуса, км;

Допустимым остаточным (или начальным) объемом энергии на конечной станции считается такой объем, который удовлетворяет условию:

$$C_{max} \geq C \geq C_{min}, \quad (4)$$

Где  $C_{min}$  – минимальный допустимый уровень энергии, кВт\*ч;

$C_{max}$  – максимальный допустимый уровень энергии, кВт\*ч.

Установка допустимых объемов энергии необходима по нескольким причинам. Установленные границы объемов энергии должны гарантировать, что электробус сможет добраться от конечной станции до ЗС, а также добраться от ЗС до конечной станции, сохранив при этом достаточное количество энергии для выполнения нового цикла движения по маршруту. Помимо этого, установление ограничения по уровню заряда (то же самое, что и границ допустимого объема аккумулятора) позволит свести влияние такого фактора деградации, как глубина разряда (англ. Depth of Discharge, DoD), который проявляется при восстановлении заряда с малых значений к максимальным, а также при длительном подключении к ЗС после полного восстановления заряда АКБ (до 100 %), к минимуму. Этот шаг позволит повысить срок службы работы аккумуляторов электробусов.

Для идеальных аккумуляторов рекомендуется не опускать уровень заряда аккумулятора ниже 20 %, а также не заряжать аккумулятор до 100 % без острой необходимости (во избежание образования литиевой пленки на электрической паре). Реальная эксплуатация подразумевает варьирование минимальной и максимальной емкости аккумулятора в зависимости от их общего рабочего состояния (англ. State of Health, SOH) [14].

В общем виде функция вычисления минимальной допустимой энергии электробуса будет выглядеть следующим образом:

$$C_{ост}^{ijk} = f(C_{нач}^{ijk}, e^i, L^{jk}), \quad (5)$$

где  $C_{нач}^{ijk}$  – объем энергии  $i$ -го электробуса  $j$ -го маршрута в  $k$ -й начальной точке движения по маршруту, кВт\*ч;

$L^{jk}$  – длина  $j$ -го маршрута в  $k$ -м направлении, км.

Длина маршрута определяется по формуле:

$$L^{jk} = \sum_m^{n-1} \sqrt{(x_{m+1} - x_m)^2 + (y_{m+1} - y_m)^2}, \quad (6)$$

где  $L^{jk}$  – длина  $j$ -го маршрута в  $k$ -ом направлении, км;

$x_m, y_m$  – пара координат  $x$  и  $y$  точки  $m$ -й точки в массиве;

$n$  – длина массива координат остановочных пунктов.

В данной формуле, а также всех последующих, значение  $k$  будет обозначать порядковый номер одной из двух конечных пунктов маршрута  $j$ :

$$k \in [0, 1].$$

Значение остаточного заряда АКБ определяется по формуле:

$$C_{ост}^{ijk} = C_{нач}^{ij} - E_r^{ijk}, \quad (7)$$

где  $C_{ост}^{ijk}$  – остаточное значение объема аккумулятора  $i$ -го электробуса на  $j$ -м маршруте в  $k$ -м направлении, кВт\*ч;

$E_r^j$  – энергозатраты  $i$ -го электробуса на прохождение  $j$ -го маршрута в  $k$ -м направлении, кВт\*ч.

Для точного определения остаточного объема энергии в конечной точке необходимо также знать уровень деградации аккумулятора и рассчитывать объемы аккумулятора с учетом коэффициента деградации. Помимо этого, в реальной эксплуатации также изменяется энергопотребление в зависимости от различных внешних условий (таких как погода, пассажиропоток, трафик и т. д.).

Совокупность внешних условий, влияющих на энергопотребление электробуса, называется коэффициентом сложности маршрута. Энергопотребление маршрута с учетом коэффициента сложности маршрута будет иметь вид:

$$E_r^{ijk} = e^i * L_j^k * K_{CM}^{jk}, \quad (8)$$

где  $E_r^{ijk}$  – энергозатраты  $i$ -го электробуса на прохождение  $j$ -го маршрута в  $k$ -м направлении, кВт\*ч;

$e^i$  – энергозатраты  $i$ -го электробуса на прохождение 1 км пути, кВт\*ч/км;

$K_{CM}^{jk}$  – коэффициент сложности  $j$ -го маршрута в  $k$ -м направлении (рекомендуется для обоих направлений принимать наибольший коэффициент).

Коэффициент деградации представляет собой аккумулярованную за время эксплуатации совокупность различных факторов деградации, таких как циклическая деградация, календарная деградация, деградация от глубины разряда аккумулятора и т. п. В соответствии с этим, а также учетом максимального допустимого объема заряда аккумулятора (который можно выразить в процентном отношении к максимальному объему аккумулятора и получить значение уровня заряда – State of Charge, SOC), начальное значение объема аккумулятора будет определяться по следующей формуле:

$$C_{нач}^{ij} = SoC^{ij} * C_{номинал}^{ij} * (1 - D^{ij}), \quad (9)$$

где  $C_{нач}^{ij}$  – начальный объем аккумулятора  $i$ -го электробуса на  $j$ -м маршруте, кВт\*ч;

$SoC^{ij}$  – состояние заряда  $i$ -го электробуса на  $j$ -м маршруте в процентах;

$C_{номинал}^{ij}$  – номинальный объем аккумулятора  $i$ -го электробуса на  $j$ -м маршруте, кВт\*ч;

$D^{ij}$  – коэффициент деградации  $i$ -го электробуса на  $j$ -м маршруте для  $j$ -го маршрута.

Эти коэффициенты являются обязательным требованием метода для предоставления достоверных эксплуатационных данных о маршруте и его флоте. В рамках данной работы будет продемонстрирована работа с этими данными. Их вычисление будет подробно рассматриваться в следующих работах.

#### ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Для демонстрации работы алгоритма был выбран маршрут электробуса № 15 в г. Волгограде. Из открытых источников в сети Интернет известно, что длина маршрута составляет около 19 км, а также, что флот маршрута состоит из 16 электробусов модели «КамАЗ-6282» [15].

Для начала алгоритм формирует маршрут и наносит его на схему. На рисунке 2 отображен пример сформированного маршрута.

Также для повышения информативности к каждому направлению маршрута добавлен лейбл, на котором отражены его характеристики (как заданные, так и вычисленные): название, включающее в себя также направление маршрута, длина маршрута, а также приблизительное среднее время прохождения маршрута с постоянной скоростью, без остановок (идеальное время).

Из данных на изображении видно, что расчет длины маршрута имеет погрешность, равную приблизительно 3 %. Эта особенность обусловлена методами расчета и не будет иметь весомое влияние на результаты вычислений.

После формирования маршрута производится симуляция движения каждого электробуса с каждой конечной точки маршрута. Таким образом, для флота маршрута, состоящего из 16 электробусов, будет произведено 32 симуляции (движение с каждой конечной точки).

В ходе симуляции вычисляется не только остаточная емкость аккумулятора электробуса, но и соответствующий ему радиус зоны досягаемости. После окончания цикла симуляций определяются минимальные радиусы для каждой конечной точки маршрута. На основе этих радиусов формируется зона досягаемости маршрута на конечных точках. После этого сформированная зона досягаемости наносится на схему. Пример схемы с нанесенными зонами досягаемости отражен на рисунке 3.

Зоны досягаемости, изображенные на примере, отображают ту область, в пределах которой худший электробус из выборки с заданными параметрами (в том числе и объемом аккумулятора с учетом коэффициента деградации) может передвигаться без учета ситуации на дороге и т. п. Для того чтобы расположение ЭЗС считалось корректным, согласно данному методу, расстояние до ЭЗС должно быть меньше, чем радиус зоны досягаемости (или быть в пределах зоны досягаемости).

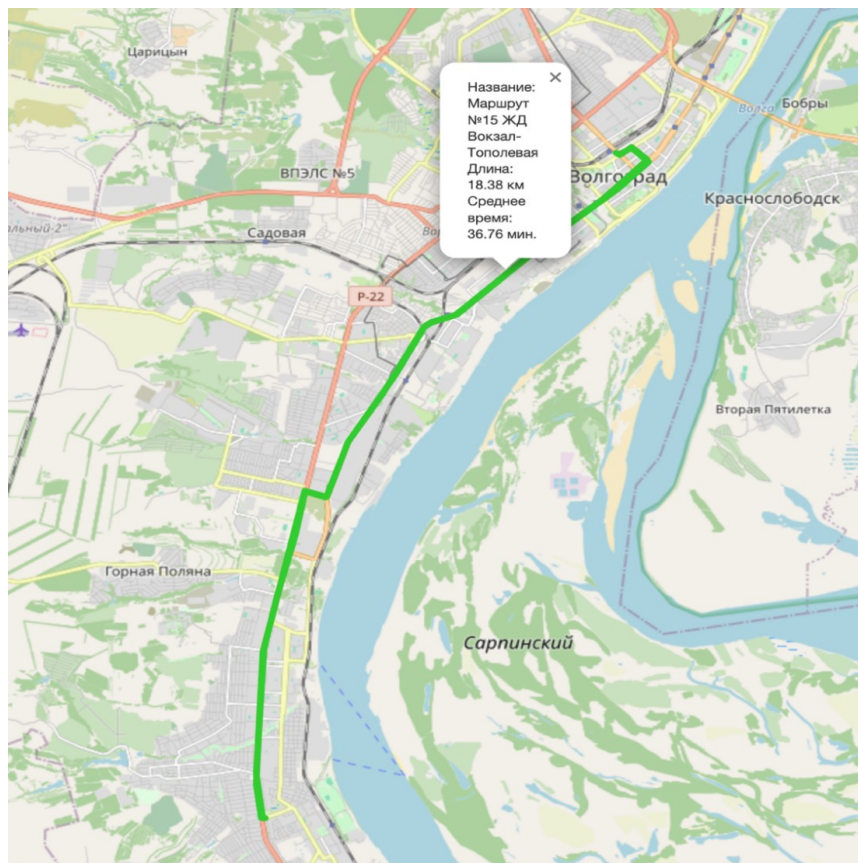


Рисунок 2 – Пример сформированного маршрута электробуса № 15 в г. Волгограде

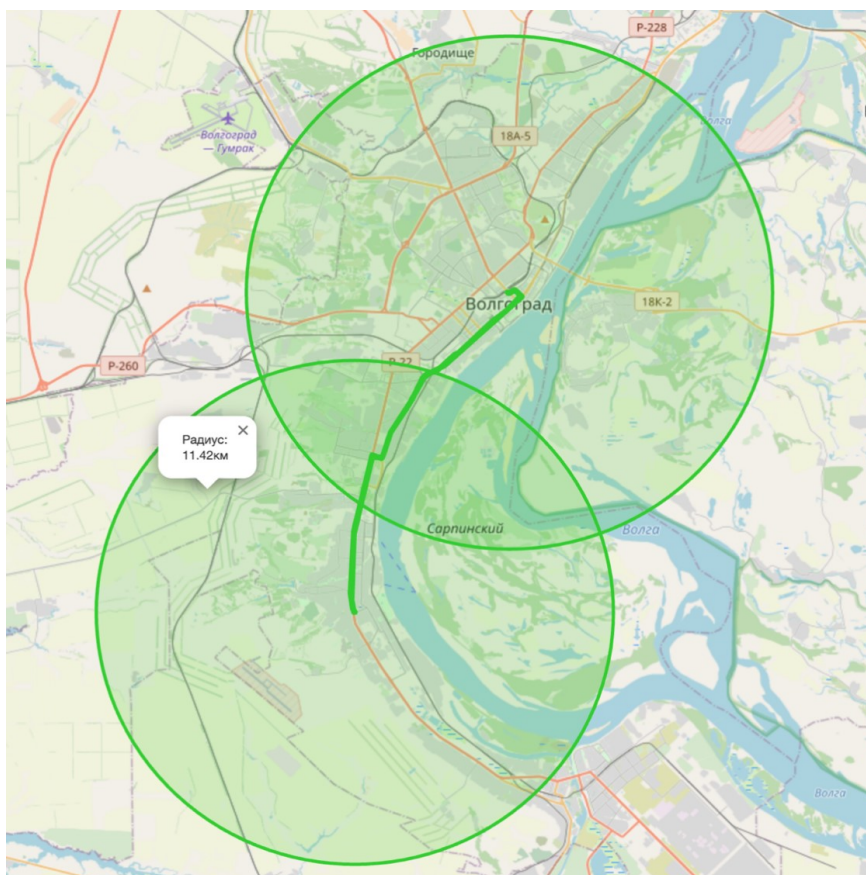


Рисунок 1 – Пример нанесенных зон досягаемости маршрута электробуса № 15 в г. Волгограде

Также, как видно на примере, к зонам досягаемости также добавлены лейблы с рассчитанным радиусом соответствующей зоны. Это позволяет лицу, принимающему решения, получить больше информации о маршруте и принимать более осознанные управленческие решения.

Один из вариантов использования данного метода – оценка размещения ЭЗС, обслуживающих маршруты. Для этого достаточно либо нанести визуальные отметки на схему, либо сравнить расстояние от конечной точки до ЭЗС с минимальным радиусом зоны досягаемости этой конечной точки. На рисунке 4 изображен пример визуального анализа размещения ЭЗС, обслуживающих маршрут электробуса № 15 в г. Волгограде.

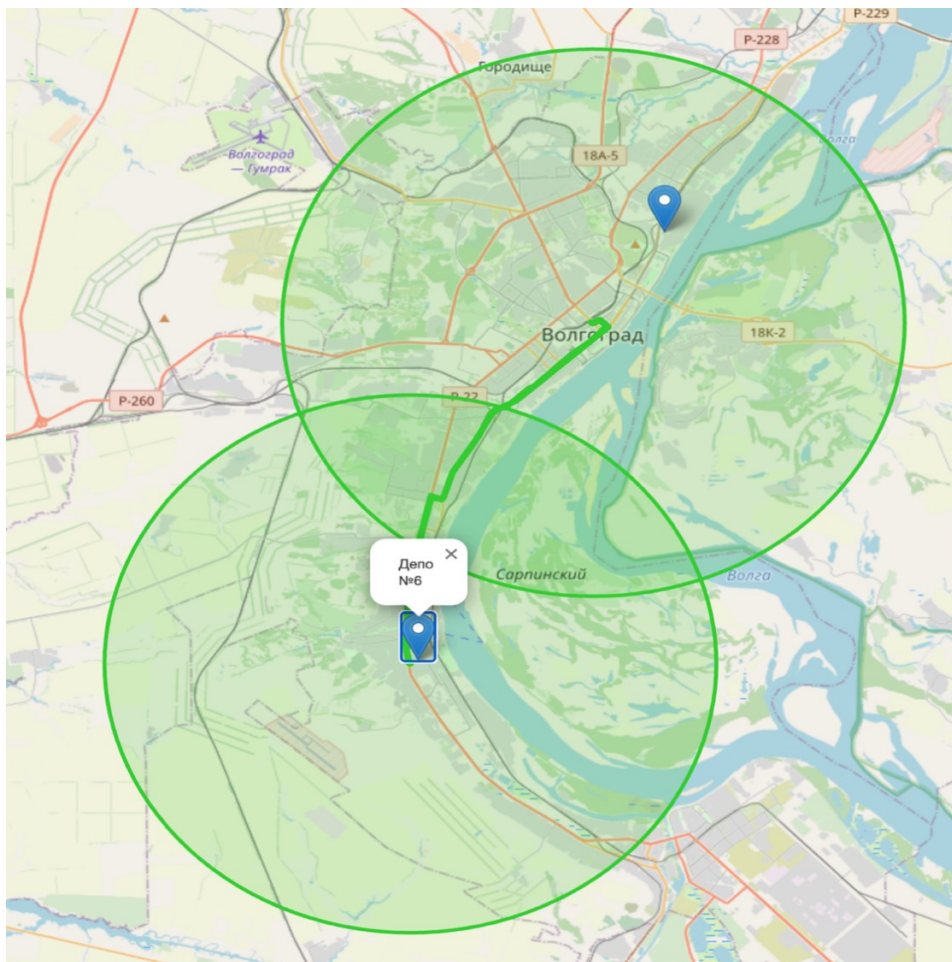


Рисунок 2 – Анализ размещения ЭЗС, обслуживающих маршрут электробуса № 15 в г. Волгограде

Маркеры точек расположения ЭЗС также можно подписать и установить соответствующий лейбл для удобства работы при одновременной оценке нескольких маршрутов.

Как видно из примера, текущее расположение ЭЗС, обслуживающих маршрут электробуса № 15 в г. Волгограде, удовлетворяет требованию по энергообеспеченности маршрута, однако в будущем, при дальнейшей деградации аккумуляторов, а также изменении условий эксплуатации транспортных средств (к примеру, при увеличении пассажиропотока/ухудшении ситуации на дорогах и т. п.). Эта ситуация может измениться и потребуются дополнительный комплекс мер (замена аккумуляторов, перенос ЭЗС), что существенно отразится на бюджете.

Представленные в работе вычисления производились на «Вычислительном комплексе высокой производительности», внедренном на кафедре «Цифровые технологии в урбанистике, архитектуре и строительстве» ВолГТУ в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Сложившаяся за долгие годы ситуация с системами городского общественного транспорта в России требует обновления инфраструктуры этих систем и их компонентов. Современные транспортные средства имеют ряд неоспоримых преимуществ перед своими предшественниками – технологических, экологических и эстетических. Тем не менее они имеют и ряд недостатков, которые

следует учитывать при внедрении новых видов общественного транспорта в городскую среду. Очевидно, что электробусы со временем заменят классические автобусы на ДВС, но то, как скоро это произойдет, зависит от мер, принимаемых городскими властями (или лицами, принимающими решения) при внедрении этих транспортных средств в городскую транспортную систему. При принятии правильных управленческих решений можно добиться достаточной свободы для длительной эксплуатации электробусов, а также обеспечить надежную основу для дальнейшего масштабирования транспортной системы.

Метод поддержки принятия решений при анализе энергообеспеченности маршрутов позволяет упростить процесс оценки энергообеспеченности маршрута при его разработке или анализе (с целью дальнейшей оптимизации, к примеру). Особенность метода заключается в возможности моделирования различных сценариев эксплуатации, что позволяет прогнозировать изменение ситуации с течением времени или при изменении параметров (например, изменении моделей электробусов или изменении характеристик маршрута). Кроме того, метод учитывает степень деградации аккумуляторов, а также ситуацию на маршруте.

Предложенный метод существенно отличается от других концептуально схожих методов подходом к анализу эффективности размещения ЭЭС электробусов. Приведенные в данном исследовании работы, представляющие методы выбора места расположения ЭЭС, опираются преимущественно на экономическую сторону задачи (и это верный подход при подборе места расположения ЭЭС). Представленный же метод рассматривает задачу поиска оптимального места расположения ЭЭС с точки зрения пользователей этой инфраструктуры – электробусов. Предложенный метод рассчитывает зону досягаемости, исчисляемую максимальным расстоянием, которое сможет пройти самый «худший» экземпляр электробуса после цикла движения по маршруту, отталкиваясь от расположения конечной точки маршрута. Кроме того, метод учитывает такие ограничения, как рельеф, климат, пассажиропоток и трафик на пути следования маршрута для каждого маршрута, а также разнородность флота и индивидуальные характеристики каждого электробуса на маршруте. Представленный метод может быть использован в совокупности с другими схожими (в том числе представленными в данной работе) методами для достижения наиболее объективной и всеобъемлющей рекомендации по размещению ЭЭС для электробусов.

Работоспособность метода продемонстрирована на примере маршрута электробуса № 15 в г. Волгограде. Проведен краткий анализ энергообеспеченности маршрута на тестовых данных. На основе визуального анализа можно сделать вывод, что на текущий момент маршрут № 15 обеспечен энергией и может свободно эксплуатироваться, однако в будущем эта ситуация может измениться.

В данной работе используются некоторые симулированные данные. Это такие данные, как коэффициент сложности маршрута, коэффициент деградации аккумулятора. Поскольку эти данные индивидуальны для каждого электробуса и каждого маршрута, соответственно, и зависят от различных внешних факторов (например, таких как местоположение маршрута, от которого зависят температурные показания в зимнее и летнее время), принято решение о разработке базы знаний для поддержки управления эксплуатацией электробусов, которая будет подробно разбираться в следующих работах.

#### Список источников

1. Назаров, К. Р. Методология формирования акустической среды при проектировании городских территорий / К. Р. Назаров, А. В. Игнатьев, Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 11 (803). – С. 109–120. – DOI 10.32683/0536-1052-2025-803-11-109-120.
2. Зуев, А. Ю. Исследование влияния морфотипа застройки города на температуру поверхности Земли (на примере Волгограда) / А. Ю. Зуев, Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин // Устойчивое развитие территорий : сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, Москва, 14–16 мая 2025 г. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2025. – С. 48–52.
3. Давыдова, И. С. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в городах / И. С. Давыдова, А. В. Гапоненко // Sciences of Europe. – 2017. – № 14–2 (14). – С. 3–5.
4. Старков, В. С. Оценка влияния выбросов автомобильного транспорта на состояние окружающей среды / В. С. Старков // Автомобильный транспорт Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 245–247.
5. Данилов, И. А. Тенденции развития электротранспорта в умных городах / И. А. Данилов, М. М. Петрянкина, И. В. Бганцева, Н. П. Садовникова // Социология города. – 2024. – № 3. – С. 77–90. – DOI 10.35211/19943520\_2024\_3\_77.
6. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2021. – № 0001202112030006. – С изм. и допол. в ред. от 06.11.2024.
7. Жевак, А. С. Сравнительный анализ энергетической эффективности различных способов зарядки электробусов / А. С. Жевак, Х. Х. Курбанов, С. В. Жевак // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2023. – № 4 (14). – С. 6–11.
8. Liu, T. Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers / T. Liu, A. A. Ceder // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2020. – Vol. 114. – С. 118–139.

9. Гушинский, Н. Н. Оптимизация неоднородной зарядной инфраструктуры и расписания зарядки электробусов для городских маршрутов / Н. Н. Гушинский, М. Я. Ковалев, Б. М. Розин // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2025. – Т. 61. – № 1. – С. 74–88.

10. Rinaldi, M. Mixed-fleet single-terminal bus scheduling problem: Modelling, solution scheme and potential applications / M. Rinaldi // *Omega*. – 2020. – Vol. 96. – Art. № 102070.

11. Zhang, Y. Location and expansion of electric bus charging stations based on gridded affinity propagation clustering and a sequential expansion rule / Y. Zhang // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13, 16. – Art. № 8957.

12. Tzamakos, D. Electric bus charging station location optimization considering queues / D. Tzamakos, C. Iliopoulou, K. Kepaptsoglou // *International Journal of Transportation Science and Technology*. – 2023. – Vol. 12, № 1. – P. 291–300.

13. Мишкина, А. А. Решение задачи размещения-распределения зарядных станций для электромобилей на картах с помощью машинного обучения / А. А. Мишкина, И. И. Егоров, А. Г. Анюхин // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 114–121.

14. Park, S. J. Depth of discharge characteristics and control strategy to optimize electric vehicle battery life / S. J. Park // *Journal of Energy Storage*. – 2023. – Vol. 59. – Art. № 106477.

15. Программное приложение для анализа и выявления зависимостей в формировании пассажиропотока общественного транспорта по транспортным районам : свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2024685048 / К. В. Егоров, Д. С. Парыгин, Ю. Ю. Толочек, В. В. Тищенко, М. В. Сулицкий ; правообладатели К. В. Егоров, Д. С. Парыгин, Ю. Ю. Толочек, В. В. Тищенко, М. В. Сулицкий. – № 2024684321 ; поступ. 15.10.24 ; зарег. 23.10.24.

### References

1. Nazarov, K. R., Ignatiev, A. V., Sadovnikova, N. P., Parygin, D. S. Methodology for Forming the Acoustic Environment in the Design of Urban Areas. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*, 2025, no. 11 (803), pp. 109–120 (In Russ.).

2. Zuev, A. Yu. Study of the Influence of the City's Development Morphotype on Land Surface Temperature (Case Study of Volgograd). *Sustainable Development of Territories: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference*. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2025, pp. 48–52 (In Russ.).

3. Davydova, I. S., Gaponenko, A. V. The Problem of Atmospheric Air Pollution in Cities. *Sciences of Europe*. 2017, no. 14–2 (14), pp. 3–5 (In Russ.).

4. Starkov, V. S. Assessment of the Impact of Vehicle Emissions on the State of the Environment. *Automotive Transport of the Far East*, 2013, no. 1, pp. 245–247 (In Russ.).

5. Danilov, I. A., Petryankina, M. M., Bgantseva, I. V., Sadovnikova, N. P. Trends in the Development of Electric Transport in Smart Cities. *Sociology of the City*, 2024, no. 3, pp. 77–90 (In Russ.).

6. Decree of the Government of the Russian Federation dated 27/11/2021 No. 3363-r «On Approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast for the Period until 2035». *Official Internet Portal of Legal Information*, 2021, no. 0001202112030006 (In Russ.).

7. Zhevak, A. S., Kurbanov Kh. Kh., Zhevak S. V. Comparative Analysis of the Energy Efficiency of Different Methods of Charging Electric Buses. *Current Problems of Modern Transport*. 6 p. (In Russ.).

8. Liu, T., Ceder, A. A. Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020, no. 114, pp. 118–139.

9. Gushchinsky, N. N., Kovalev, M. Ya., Rozin, B. M. Optimization of Heterogeneous Charging Infrastructure and Electric Bus Charging Schedule for Urban Routes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Mathematical Sciences*, 2025, vol. 61, no. 1, pp. 74–88 (In Russ.).

10. Rinaldi, M. Mixed-fleet single-terminal bus scheduling problem: Modelling, solution scheme and potential applications. *Omega*, 2020, no. 96, art. no. 102070.

11. Zhang, Y. Location and expansion of electric bus charging stations based on gridded affinity propagation clustering and a sequential expansion rule. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 16, art. no. 8957.

12. Tzamakos, D., Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K. Electric bus charging station location optimization considering queues. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2023, vol. 12, no. 1, pp. 291–300.

13. Mishkina, A. A., Egorov, I. I., Anyukhin, A. G. Solving the Location-Distribution Problem for Electric Vehicle Charging Stations on Maps Using Machine Learning. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 114–121 (In Russ.).

14. Park, S. J. Depth of discharge characteristics and control strategy to optimize electric vehicle battery life. *Journal of Energy Storage*, 2023, no. 59, art. no. 106477.

15. Egorov, K. V., Parygin, D. S., Tolocheck, Yu. Yu., Tishchenko, V. V., Sulitsky, M. V. *Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2024685048 Russian Federation. Software Application for Analysis and Identification of Dependencies in the Formation of Public Transport Passenger Flows by Transport Districts*, no. 2024684321, filed 15.10.2024, publ. 23.10.2024.

Статья поступила в редакцию 08.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 12.02.2026.

The article was submitted 08.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 12.02.2026.

УДК 004:9

**ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННЫХ МАССИВОВ  
В ОБЛАЧНЫХ ХРАНИЛИЩАХ И ЦЕНТРАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

*Паращук Игорь Борисович*, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8793-7768, e-mail: shchuk@rambler.ru  
*Сабиров Денис Эдуардович*, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, помощник начальника учебно-методического отдела, e-mail: sabirov1234@mail.ru

Рассмотрены некоторые аспекты применения и особенности формулировки и решения частных задач, нацеленных на приложение известных методов теории вероятности с учетом постулатов теорем функциональной и параметрической декомпозиции, в интересах процедуры синтеза (формирования объема и номенклатуры) множества локальных показателей качества и эффективности, а также интегрального показателя эффективности реализации процесса интеллектуального анализа больших информационных массивов в современных облачных хранилищах данных и центрах обработки данных. Предложенный подход опирается на представление локальных и интегральных показателей эффективности реализации процесса интеллектуального анализа данных как совместной относительной (условной) вероятности не превышения допустимых границ (выполнения требований) значениями локальных показателей качества данного процесса на каждом контролируемом временном интервале этого интеллектуального анализа. При этом учитываются особенности и сущность интеллектуального анализа как совокупности процедур (и результатов) оперативного поиска и достоверного исследования всех значимых закономерностей и тенденций в подобных больших объемах информации, что, в свою очередь, позволяет осуществить сравнительное интервально-стохастическое (вероятностно-временное) оценивание данного процесса в целом. Практическое применение предложенного подхода позволит повысить адекватность текущего контроля, с точки зрения учета всего многообразия свойств современного процесса анализа больших информационных массивов, что в конечном итоге будет способствовать повышению достоверности оценивания и прогнозирования качества и эффективности интеллектуальных процессов такого класса.

**Ключевые слова:** интеллектуальный анализ данных, центр обработки данных, облачное хранилище данных, показатель, качество, эффективность, большой информационный массив, совместная относительная вероятность

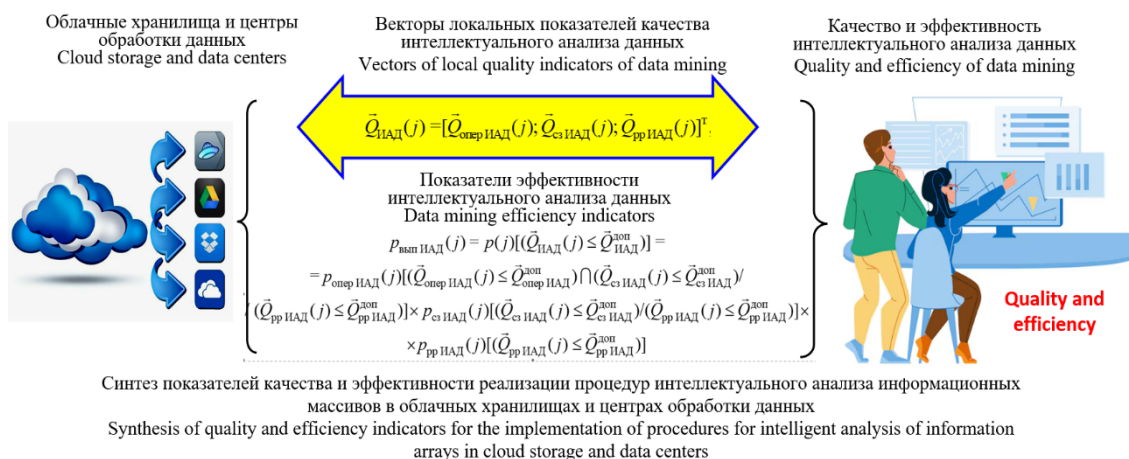
**QUALITY INDICATORS FOR THE IMPLEMENTATION OF PROCEDURES  
FOR INTELLIGENT ANALYSIS OF INFORMATION ARRAYS  
IN CLOUD STORAGE AND DATA PROCESSING CENTERS**

*Parashchuk Igor B.*, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-8793-7768, e-mail: shchuk@rambler.ru  
*Sabirov Denis E.*, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, Assistant to the Head of the Educational and Methodological Department, e-mail: sabirov1234@mail.ru

The article considers some aspects of the application and features of the formulation and solution of particular problems aimed at the application of well-known methods of probability theory, taking into account the postulates of the theorems of functional and parametric decomposition, in the interests of the procedure of synthesis (formation of the volume and nomenclature) of a set of local quality and efficiency indicators, as well as an integral indicator of the efficiency of the implementation of the process of intellectual analysis of large information arrays in modern cloud data warehouses and data centers. The proposed approach is based on the representation of local and integral indicators of the efficiency of the data mining process as a joint relative (conditional) probability of not exceeding the permissible limits (fulfilling the requirements) by the values of local quality indicators of a given process at each controlled time interval of this intellectual analysis. At the same time, the features and essence of intellectual analysis are taken into account as a set of procedures (and results) of operational search and reliable study of all significant patterns and trends in such large volumes of information, which, in turn, allows for comparative interval-stochastic (probabilistic-temporal) assessment of this process as a whole. The practical application of the proposed approach will improve the adequacy of current control, from the point of view of taking into account the entire diversity of properties of the modern process of analyzing large information arrays, which, ultimately, will contribute to increasing the reliability of assessing and predicting the quality and effectiveness of intellectual processes of this class.

**Keywords:** data mining, data center, cloud data storage, metric, quality, efficiency, big data, joint relative probability

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



## ВВЕДЕНИЕ

Существующие и перспективные распределенные центры обработки данных (ЦОД) и построенные в большинстве случаев на базе программно-определяемых ЦОД современные облачные хранилища данных (ОХД) играют все более весомую роль в инфраструктуре единого информационного пространства России и крупных, технологически развитых иностранных государств [1–3].

Одними из важнейших задач, решаемых на программно-аппаратных платформах современных ЦОД и ОХД, являются задачи интеллектуального анализа больших объемов таких данных, задачи оценки, предобработки (сепарации, классификации) и поиска закономерностей в крупных и очень крупных массивах информации, хранимой на серверных ресурсах объектов такого класса [4–6].

При этом проблема интеллектуального анализа больших информационных массивов приобретает тревожные «болезненные симптомы» именно сейчас, на очередном этапе «цифровой трансформации» страны, когда сбор и когнитивная («умная») обработка больших данных (гетерогенных, зачастую слабо формализуемых) играет, пожалуй, ключевую роль.

Основой этой проблемы, ее ключевым, сложным для классической алгоритмической и математической интерпретации, формализации и практической реализации, фактором, служат объективные трудности обработки именно больших данных (Big Data), поскольку информационные массивы крупного объема, которые необходимо собирать, систематизировать, хранить и обрабатывать, обладают не только многообразием (типовой и информационной разнородностью, приоритетностью, информационной значимостью и т. д.) и многомодальностью, но и мультимедийностью (гетерогенностью), слабой структурированностью и трудной семантической, синтаксической и прагматической формализуемостью [7–10].

В этой связи актуальным, на наш взгляд, научным и практическим направлением исследований может и должно стать изучение теоретических и методологических особенностей реализации процедур интеллектуального анализа крупных информационных массивов в ОХД и ЦОД, поиск и применение эффективных методов их аналитической обработки и извлечения из них ценной информации с использованием современных алгоритмов и средств на основе искусственного интеллекта (например, Deep Learning).

Более того, существенную помощь в рамках реализации процедур интеллектуального анализа информационных массивов в облачных хранилищах и центрах обработки данных, по нашему мнению, могут оказать подходы, использующие имитационное моделирование для поиска закономерностей и выявления аномалий в данных, а также подходы, применяющие современные инструменты визуализации, технологии компьютерного зрения и искусственные нейронные сети [11–15].

При этом важным аспектом, ключевым критерием сопоставления методов поиска и алгоритмов применения современных практических инструментов на основе искусственного интеллекта для анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД является сравнительное (чаще всего стохастическое, вероятностное на временном интервале, во временной области) оценивание качества и эффективности реализации процедур такого анализа с использованием локальных и интегральных (комплексных) показателей, характеризующих их базовые свойства.

Именно поэтому к задаче синтеза (формулировки объема и формирования номенклатуры) множества таких показателей качества и эффективности реализации подобных процедур продолжает сохраняться устойчивый интерес среди исследователей.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ И НОМЕНКЛАТУРЫ МНОЖЕСТВА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННЫХ МАССИВОВ В ОБЛАЧНЫХ ХРАНИЛИЩАХ И ЦЕНТРАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

С учетом того факта, что интеллектуальный анализ данных в ОХД и ЦОД представляет собой, по сути, очистку, сепарацию и детальное изучение («скрининг», «пропуск через фильтр», «отсев через сито») больших массивов информации, имея целью извлечение из них полезных данных для реального конкретного использования, главная трудность сравнительного оценивания качества и эффективности процедур интеллектуального анализа крупных информационных массивов напрямую, по локальным показателям качества и эффективности их реализации состоит не столько в вычислительной «тернистости» этого процесса, сколько зачастую в неоднозначности (контрадикторности) его результатов.

Это связано с тем, что реализуемые в рамках интеллектуального анализа крупных информационных массивов процессы поиска закономерностей и извлечения знаний могут быть оценены, с точки зрения контроля их качества и эффективности, по-разному (по одним локальным показателям они качественны, по иным – нет), с некоторым оттенком субъективизма. Это привносит некоторую неоднозначность в ход и итоги решения задачи оценивания как на уровне формулировки локальных показателей качества (ЛПК), на стадии формирования локальных показателей эффективности реализации (ЛПЭР) и интегрального показателя эффективности реализации (ИПЭР) процесса интеллектуального анализа данных в ОХД и ЦОД, так и на уровне восприятия результатов подобного оценивания.

Ввиду этого, и, принимая во внимание тот факт, что общая цель реализации процесса анализа данных в ОХД и ЦОД заключается в оперативном поиске и достоверном (точном) исследовании всех значимых закономерностей и тенденций в больших объемах информации, целесообразным можно считать, на наш взгляд, формирование и последующее сравнительное интервально-стохастическое (иногда говорят, вероятностно-временное) оценивание ИПЭР процесса интеллектуального анализа данных в ОХД и ЦОД. Новизна такого подхода, по нашему мнению, заключается в том, что этот вероятностный (стохастический) оцениваемый ИПЭР может и должен математически и функционально «связывать» (объединять) все множество разнообразных ЛПК и разноплановых ЛПЭР данного процесса, а также требований к ним, включая требования по защищенности [16].

В подобной ситуации на помощь могут прийти апробированные постулаты метода вероятностной скаляризации, которые позволяют найти естественное решение проблем нормализации и свертки как отдельных ЛПЭР, так и множеств ЛПК, целых подсистем разнообразных, разноплановых ЛПЭР процесса интеллектуального анализа крупных информационных массивов, позволяют синтезировать такой ИПЭР, который обеспечит наиболее полный учет особенностей решения задачи оценивания.

При этом множество ЛПК, лежащих в основе синтеза ЛПЭР и ИПЭР процесса интеллектуального анализа данных (ИАД) в ОХД и ЦОД (Analysis Quality), численно характеризуют и позволяют количественно оценить корректность методов работы с данными и ценность полученных по результатам анализа выводов. Это множество представляет собой систему параметров, количественно определяющих различные аспекты качества данного процесса, например, к вектору локальных показателей качества интеллектуального анализа крупных информационных массивов можно отнести:

Вектор локальных показателей оперативности интеллектуального анализа данных

$$\vec{Q}_{\text{опер ИАД}}(j) = [v_{\text{пра}}(j); \bar{t}_{\text{пра}}(j); v_{\text{сзд}}(j); K_{\text{па}}(j); \bar{t}_{\text{дост}}(j)]^T, \quad (1)$$

где  $\{v_{\text{пра}}(j)\}$  – скорость (объем анализируемых данных за определенное время) получения результатов анализа на каждом  $j$ -м временном интервале (шаге) анализа;

$\{\bar{t}_{\text{пра}}(j)\}$  – оперативность (среднее время) анализа данных на  $j$ -м интервале, характеризующая способность системы обрабатывать крупные информационные массивы и предоставлять результаты в сроки (за время), позволяющие своевременно принять управленческое решение (не дать результатам анализа «устаревать»);

$\{v_{\text{сзд}}(j)\}$  – скорость сбора данных (Data Ingestion) на  $j$ -м интервале анализа, характеризующая минимизацию задержки между появлением события (фиксации и идентификации данных) и его попаданием в аналитическую систему для интеллектуального анализа;

$\{K_{\text{па}}(j)\}$  – коэффициент использования потоковой аналитики на  $j$ -м интервале анализа, характеризующий качество интеллектуального анализа в реальном времени (Real-time Processing): соотношение используемых алгоритмов потоковой аналитики (например, Apache Kafka, Flink)

к общему количеству задействованных средств и методов обработки и интеллектуального анализа данных, например, к числу применяемых моделей и алгоритмов пакетной обработки (Batch Processing);

$\{\bar{t}_{\text{дост}}(j)\}$  – доступность (Data Availability) результатов анализа – среднее время, за которое «сырые» данные превращаются в структурированные отчеты (итоги, результативные данные и/или ключевые показатели результатов интеллектуального анализа в реальном времени) либо осуществляется наглядная визуализация этих результатов на интерактивной приборной панели («дашборде») пользователя.

Вектор локальных показателей статистической значимости, который характеризует и количественно предопределяет тот аспект качества (или его отсутствие), что результаты интеллектуального анализа не являются случайными (ошибкой, выбросом):

$$\vec{Q}_{\text{сз ИАД}}(j) = [p_{\text{крит}}(j); \alpha_{\text{знач}}(j); n_{\text{выб}}(j); \chi_{\text{эфф}}(j); \beta_{\text{тест}}(j); \delta_{\text{инт}}(j)]^T, \quad (2)$$

где  $\{p_{\text{крит}}(j)\}$  – вероятность случайного появления «нулевого» результата (ошибки, выброса), иногда называемая  $p$ -критерием ( $p$ -value), позволяющая с высокой уверенностью (вероятностью) отвергнуть «нулевую» гипотезу (предположение об отсутствии закономерности, эффекта), количественная (вероятностная) мера, показывающая, что полученные при интеллектуальном анализе крупных информационных массивов результаты (закономерности, различия, эффекты) реальны, истинны, а не возникли случайно из-за фонового шума или ошибок выборки;

$\{\alpha_{\text{знач}}(j)\}$  – коэффициент (уровень) значимости, заранее установленный порог для «грубой», но оперативной оценки качества интеллектуального анализа данных (зачастую 0,05 или 5 %), с которым сравнивается  $\{p_{\text{крит}}(j)\}$ . Если  $\{p_{\text{крит}}(j)\} \leq \{\alpha_{\text{знач}}(j)\}$ , результат интеллектуального анализа считается статистически значимым;

$\{n_{\text{выб}}(j)\}$  – объем (размер, Sample Size) подмножества выборки анализируемых данных из их генеральной совокупности, из крупного информационного массива  $N_{\text{инф масс}}$ , где  $\{n_{\text{выб}}(j) \in N_{\text{инф масс}}\}$  и  $N_{\text{инф масс}}$  – размер генеральной совокупности (Population Size), количественно характеризует способность системы анализа: чем больше данных (объем выборки), тем легче обнаружить статистически значимые зависимости и различия, даже если они минимальны;

$\{\chi_{\text{эфф}}(j)\}$  – коэффициент (уровень, величина) эффекта (Effect Size), показатель, не зависящий от объема выборки и количественно (зачастую в процентах) определяющий практическую важность результата интеллектуального анализа данных;

$\{\beta_{\text{тест}}(j)\}$  – коэффициент (уровень, величина) статистической мощности теста, применяемого при интеллектуальном анализе данных и позволяющего отклонить «нулевую» гипотезу, которая действительно является ложной, этот ЛПК иногда записывают как  $(1 - \beta_{\text{тест}}(j))$  и имеют ввиду вероятность обнаружения в исследуемых данных реального эффекта, если он существует;

$\{\delta_{\text{инт}}(j)\}$  – доверительный интервал (CI, Confidence Interval), диапазон значений, в котором с определенной вероятностью в рамках интеллектуального анализа данных находится истинный эффект (результат, закономерность).

Вектор локальных показателей релевантности результатов интеллектуального анализа данных, который характеризует и количественно определяет степень соответствия итогов анализа конкретному запросу, поставленной аналитической задаче или потребностям пользователя, а также практическую применимость (полезность) этих результатов:

$$\vec{Q}_{\text{рр ИАД}}(j) = [K_{\text{впр}}(j); K_{\text{точ}}(j); K_{\text{рп}}(j); K_{\text{интерп}}(j)]^T, \quad (3)$$

где  $\{K_{\text{впр}}(j)\}$  – коэффициент воспроизводимости результата, численно определяет вероятность (количественное соотношение) получения другим аналитиком либо другой моделью анализа, того же результата на тех же данных;

$\{K_{\text{точ}}(j)\}$  – коэффициент точности (Assigasy) результатов интеллектуального анализа данных (иногда говорят, «прогностическая сила»), который показывает, сколько правильных предсказаний сделала модель анализа относительно общего числа предсказаний, насколько точно применяемая модель интеллектуального анализа предсказывает будущее и находит закономерности в данных;

$\{K_{\text{рп}}(j)\}$  – коэффициент релевантности-пертинентности результатов интеллектуального анализа данных, который показывает, сколько предсказаний, соответствующих первоначально сформулированной задаче аналитики и удовлетворяющих конкретной задаче пользователя, сделала

модель анализа, относительно общего числа предсказаний, например, отвечает ли анализ на поставленный бизнес-вопрос;

$\{K_{\text{интерп}}(j)\}$  – коэффициент интерпретируемости результатов интеллектуального анализа данных, который показывает, сколько предсказаний, имеющих понятный для пользователя (физический, семантический и синтаксический) смысл, сделала модель анализа, относительно общего числа предсказаний, с точки зрения качества анализа, отвечает на вопрос – понятны ли выводы и можно ли их реально применить на практике.

Таким образом, общий вектор (множество) показателей качества процесса интеллектуального анализа данных в ОХД и ЦОД, номенклатуру множества показателей качества можно представить в виде совокупности векторов (множеств) ЛПК на  $j$ -м интервале:

$$\vec{Q}_{\text{ИАД}}(j) = [\vec{Q}_{\text{опер ИАД}}(j); \vec{Q}_{\text{сз ИАД}}(j); \vec{Q}_{\text{рр ИАД}}(j)], \quad (4)$$

где  $\vec{Q}_{\text{опер ИАД}}(j)$ ,  $\vec{Q}_{\text{сз ИАД}}(j)$  и  $\vec{Q}_{\text{рр ИАД}}(j)$  – вектора (множества) ЛПК оперативности, статистической значимости и релевантности результатов анализа соответственно.

С точки зрения математического толкования и физического смысла, сущность формального описания ИПЭР заключается в его трактовке, позволяющей представить данный интегральный (комплексный, обобщенный) показатель эффективности как совместную, консолидированную вероятность выполнения допустимых требований, предъявляемых вышестоящей системой к процессу и результатам интеллектуального анализа данных в ОХД и ЦОД по оперативности, статистической значимости и релевантности на каждом  $j$ -м временном интервале (шаге) анализа:

$$p_{\text{вып ИАД}}(j) = p(\vec{Q}_{\text{ИАД}}(j) \leq \vec{Q}_{\text{ИАД}}^{\text{доп}}), \quad (5)$$

где  $\vec{Q}_{\text{ИАД}}(j)$  – вектор ЛПК на  $j$ -м интервале процесса анализа;

$\vec{Q}_{\text{ИАД}}^{\text{доп}}$  – вектор допустимых значений (требований) к этим локальным (частным) показателям качества интеллектуального анализа данных в ОХД и ЦОД.

С точки зрения формального описания математической сущности оценивания эффективности интеллектуального анализа информационных массивов в облачных хранилищах и центрах обработки данных, необходимо отметить, что идея состоит в поэтапном вычислении ЛПЭР анализа на каждом  $j$ -м интервале и математически корректной «свертке» их в ИПЭР процесса ИАД в ОХД и ЦОД на этом-же интервале. Предлагаемый подход может быть реализован с использованием математического аппарата относительных (условных) вероятностей и теорем функциональной и параметрической декомпозиции, причем ИПЭР процесса ИАД в ОХД и ЦОД формируется с опорой на относительные вероятности не превышения допустимых границ (выполнения требований) к ЛПК данного процесса [17, 18].

Тогда, с учетом интервально-стохастического характера (вероятностно-временного механизма) оценивания ЛПК ИАД на каждом  $j$ -м временном интервале (шаге) анализа, ИПЭР процесса интеллектуального анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД можно записать в виде:

$$\begin{aligned} p_{\text{вып ИАД}}(j) &= p(j)[(\vec{Q}_{\text{ИАД}}(j) \leq \vec{Q}_{\text{ИАД}}^{\text{доп}})] = \\ &= p_{\text{опер ИАД}}(j)[(\vec{Q}_{\text{опер ИАД}}(j) \leq \vec{Q}_{\text{опер ИАД}}^{\text{доп}}) \cap (\vec{Q}_{\text{сз ИАД}}(j) \leq \vec{Q}_{\text{сз ИАД}}^{\text{доп}})] / \\ &/ (\vec{Q}_{\text{рр ИАД}}(j) \leq \vec{Q}_{\text{рр ИАД}}^{\text{доп}})] \times p_{\text{сз ИАД}}(j)[(\vec{Q}_{\text{сз ИАД}}(j) \leq \vec{Q}_{\text{сз ИАД}}^{\text{доп}}) / (\vec{Q}_{\text{рр ИАД}}(j) \leq \vec{Q}_{\text{рр ИАД}}^{\text{доп}})] \times \\ &\times p_{\text{рр ИАД}}(j)[(\vec{Q}_{\text{рр ИАД}}(j) \leq \vec{Q}_{\text{рр ИАД}}^{\text{доп}})] \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\vec{Q}_{\text{опер ИАД}}(j)$ ,  $\vec{Q}_{\text{сз ИАД}}(j)$ ,  $\vec{Q}_{\text{рр ИАД}}(j)$ ,  $\vec{Q}_{\text{опер ИАД}}^{\text{доп}}$ ,  $\vec{Q}_{\text{сз ИАД}}^{\text{доп}}$  и  $\vec{Q}_{\text{рр ИАД}}^{\text{доп}}$  – вектора (множества) ЛПК оперативности, статистической значимости и релевантности результатов анализа на каждом  $j$ -м временном интервале и вектора допустимых значений (значений предъявляемых требований) к этим ЛПК соответственно;

$p_{\text{опер ИАД}}(j)[\dots]$  – относительная (условная) вероятность не превышения допустимых границ (выполнения требований) локальными показателями оперативности анализа, определяемая при условии выполнения требований к ЛПК статистической значимости и релевантности результатов анализа;

$p_{\text{сз ИАД}}(j)[\dots]$  – относительная вероятность не превышения допустимых границ (выполнения требований) локальными показателями статистической значимости, определяемая при условии выполнения требований к ЛПК релевантности результатов анализа;

$p_{pp \text{ ИАД}}(j)[\dots]$  – безотносительная (безусловная) вероятность неперевышения допустимых границ (выполнения требований) локальными показателями релевантности результатов анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД на  $j$ -м временном интервале.

Рассмотрим в качестве примера некоторые ЛПЭР, входящие в состав ИПЭР процесса ИАД в ОХД и ЦОД.

В частности, одна из составляющая ИПЭР – ЛПЭР процесса анализа с точки зрения его оперативности, математически характеризуемая как относительная (условная по вероятности не превышения значений допустимых границ ЛПК статистической значимости и релевантности результатов анализа) вероятность выполнения требований к ЛПК, характеризующим способность системы на  $j$ -м временном интервале обрабатывать крупные информационные массивы и предоставлять результаты в сроки, позволяющие своевременно принять управленческое решение, может быть записана в виде:

$$\begin{aligned}
 p_{\text{опер ИАД}}(j)[\dots] &= \prod_{i=1}^n [(\bar{v}_{\text{пра}}(j) \leq \bar{v}_{\text{пра}}^{\text{доп}}) / \bar{v}_{\text{пра}}(j); v_{\text{сзд}}(j); K_{\text{па}}(j); \bar{t}_{\text{дост}}(j); \bar{Q}_{\text{сз ИАД}}(j); \bar{Q}_{\text{пп ИАЛ}}(j)] \times \\
 &\times p_{t \text{ пра}}(j)[(\bar{t}_{\text{пра}}(j) \leq \bar{t}_{\text{пра}}^{\text{доп}}) / v_{\text{сзд}}(j); K_{\text{па}}(j); \bar{t}_{\text{дост}}(j); \bar{Q}_{\text{сз ИАЛ}}(j); \bar{Q}_{\text{пп ИАЛ}}(j)] \times \\
 &\times p_{\text{сса}}(j)[(v_{\text{сзд}}(j) \leq v_{\text{сзд}}^{\text{доп}}) / K_{\text{па}}(j); \bar{t}_{\text{дост}}(j); \bar{Q}_{\text{сз ИАЛ}}(j); \bar{Q}_{\text{пп ИАЛ}}(j)] \times \\
 &\times p_{\text{па}}(j)[(K_{\text{па}}(j) \leq K_{\text{па}}^{\text{доп}}) / \bar{t}_{\text{дост}}(j); \bar{Q}_{\text{сз ИАЛ}}(j); \bar{Q}_{\text{пп ИАЛ}}(j)] \times \\
 &\times p_{\text{дост}}(j)[(\bar{t}_{\text{дост}}(j) \leq \bar{t}_{\text{дост}}^{\text{доп}}) / \bar{Q}_{\text{сз ИАД}}(j); \bar{Q}_{\text{пп ИАД}}(j)]
 \end{aligned} \quad (7)$$

где  $p_{v \text{ пра}}(j)[\dots]$  – относительная (условная) по ЛПК статистической значимости и релевантности результатов анализа вероятность неперевышения допустимых границ (выполнения требований) локальными показателями скорости получения результатов анализа на  $j$ -м временном интервале, определяемая как относительная (условная) вероятность выполнения допустимых требований к ЛПК оперативности (времени) анализа данных  $p_{t \text{ пра}}(j)[\dots]$ , скорости сбора данных  $p_{\text{сса}}(j)[\dots]$ , использованию потоковой аналитики  $p_{\text{па}}(j)[\dots]$  и временной доступности результатов анализа  $p_{\text{дост}}(j)[\dots]$ .

При этом ЛПЭР процесса анализа с точки зрения его качества по итогам статистической значимости его результатов  $p_{\text{сз ИАД}}(j)[\dots]$ , математически характеризуемая как относительная (условная по вероятности неперевышения значений допустимых границ ЛПК релевантности результатов анализа) вероятность выполнения требований к ЛПК, описывающим способность системы на  $j$ -м временном интервале получать результаты интеллектуального анализа, не являющиеся случайными (ошибкой, выбросом), определяется аналогичным образом.

Последний компонент, представляющий собой в выражении (6) для вычисления ИПЭР процесса интеллектуального анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД безотносительную (безусловную) вероятность  $p_{\text{pp ИАД}}(j)[\dots]$  неперевышения допустимых границ (выполнения требований) локальными показателями релевантности результатов анализа информационных массивов на  $j$ -м временном интервале, может быть условно записан в виде:

$$\begin{aligned}
 p_{\text{pp ИАД}}(j)[\dots] &= [\bar{Q}_{\text{pp ИАД}}(j) \leq \bar{Q}_{\text{pp ИАД}}^{\text{авн}}] = \\
 &= p_{\text{вр}}(j)[(K_{\text{вр}}(j) \leq K_{\text{вр}}^{\text{доп}}) / K_{\text{точ}}(j); K_{\text{рп}}(j); K_{\text{интерп}}(j)] \times \\
 &\times p_{\text{точ}}(j)[(K_{\text{точ}}(j) \leq K_{\text{точ}}^{\text{доп}}) / K_{\text{рп}}(j); K_{\text{интерп}}(j)] \times p_{\text{рп}}(j)[(K_{\text{рп}}(j) \leq K_{\text{рп}}^{\text{доп}}) / K_{\text{интерп}}(j)] \times \\
 &\times p_{\text{интерп}}(j)[(K_{\text{интерп}}(j) \leq K_{\text{интерп}}^{\text{доп}})]
 \end{aligned} \quad (8)$$

где  $p_{\text{вр}}(j)[\dots]$  – относительная (условная) по показателям точности, релевантности-пертинентности и интерпретируемости результатов анализа вероятность неперевышения допустимых границ (выполнения требований) показателем воспроизводимости результата интеллектуального анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД на  $j$ -м временном интервале;

$p_{\text{точ}}(j)[\dots]$  – относительная по показателям релевантности-пертинентности и интерпретируемости результатов анализа вероятность неперевышения допустимых границ (выполнения требований) показателем точности результата интеллектуального анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД на  $j$ -м временном интервале;

$p_{rp}(j)$ ... – относительная по показателям интерпретируемости результатов анализа вероятность неперевышения допустимых границ (выполнения требований) показателем релеванности-пертинентности результата;

$p_{интерп}(j)$ ... – безотносительная (безусловная) вероятность неперевышения допустимых границ (выполнения требований) показателем интерпретируемости результатов анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД на  $j$ -м временном интервале.

В результате предложенный подход к синтезу (формированию объема и номенклатуры) ЛПК, ЛПЭР и ИПЭР процесса интеллектуального анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД позволил с помощью выражений (1)–(4) синтезировать и описать вектора (множества) локальных показателей качества реализации данного процесса, а на основе выражений (5)–(8) проиллюстрировать состав ЛПЭР процесса анализа и ИПЭР ИАД, характеризующего степень выполнения требований (по оперативности анализа, статистической значимости и релеванности результатов) к качеству процессов такого класса.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, описаны условные стадии нового методологического подхода к последовательному синтезу (формированию объема и номенклатуры) ЛПК, ЛПЭР и ИПЭР процесса интеллектуального анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД.

Вычисление этих ЛПК, ЛПЭР и ИПЭР процесса ИАД, характеризующих качество и эффективность интеллектуального анализа данных в ОХД и ЦОД, качество и эффективность всех процедур и результатов оперативного поиска и достоверного исследования всех значимых закономерностей и тенденций в подобных больших объемах информации, позволяет осуществить сравнительное интервально-стохастическое, (вероятностно-временное) оценивание данного процесса. Алгоритмы вычисления ЛПК, ЛПЭР и ИПЭР процесса ИАД базируются на математике относительных (условных) вероятностей и теорем функциональной и параметрической декомпозиции, причем интегральные показатели эффективности реализации процесса ИАД сформированы как совместные относительные вероятности неперевышения допустимых границ (выполнения требований) значениями локальных показателей качества данного процесса на каждом  $j$ -м временном интервале интеллектуального анализа информационных массивов.

Предложенная последовательность формирования объемов и номенклатуры множеств ЛПК, ЛПЭР и ИПЭР процесса интеллектуального анализа информационных массивов в ОХД и ЦОД, основанная на совместном учете относительных (условных) вероятностей выполнения требований к этим показателям, позволяет, по нашему мнению, повысить адекватность текущего контроля механизмов и итогов анализа с точки зрения учета всего многообразия свойств современного процесса ИАД, что в конечном итоге позволит повысить достоверность оценивания и прогнозирования качества и эффективности интеллектуальных процессов такого класса.

Направлением дальнейших исследований, на наш взгляд, могут и должны стать рассмотрение и разработка возможных теоретических, методологических и практических подходов к созданию моделей интеллектуального анализа информационных массивов, учитывающих лингвистическую нечеткость, а также семантическую и синтаксическую недостоверность больших объемов анализируемых данных.

### **Список источников**

1. Сенько, А. В. Работа с BigData в облаках. Обработка и хранение данных с примерами из Microsoft Azure / А. В. Сенько. – Санкт-Петербург : Питер, 2018. – 448 с.
2. Лукичев, А. Е. Виртуализация нового типа / А. Е. Лукичев // Jet Info. Программно-определяемые ЦОД – борьба за будущее. – 2014. – № 11 (256). – С. 26–30.
3. Thomasian, A. Storage Systems: Organization, Performance, Coding, Reliability, and Their Data Processing / A. Thomasian. – San Francisco : Morgan Kaufmann, 2021. – 410 p.
4. Ларсон, Д. Data Science: Основы анализа данных / Д. Ларсон, А. Шин. – Санкт-Петербург : Питер, 2021. – 324 с.
5. Макшанов, А. В. Интеллектуальный анализ данных : учебное пособие / А. В. Макшанов, А. А. Мусаев. – Санкт-Петербург : СПбГТИ(ТУ), 2019. – 188 с.
6. Шмаль, В. Н. Интеллектуальный анализ данных : учебник / В. Н. Шмаль, С. С. Павлов. – Москва : Ridero, 2022. – 182 с.
7. Тесленко, И. Б. Анализ больших данных: учебное пособие / И. Б. Тесленко, В. Е. Крылов, А. М. Губернаторов и др. – Москва : КноРус, 2023. 295 с.
8. Парашук, И. Б. Проблемы Больших Данных. Особенности и пути решения / И. Б. Парашук // IX-я Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России – 2015 (ИБРР-2015)»: материалы конференции. – Санкт-Петербург : СПОИСУ, 2015. – С. 175–176.
9. Горелик, А. Корпоративное озеро больших данных. Новый подход к использованию Big Data и Data Science в бизнесе / А. Горелик. – Москва : Эксмо, 2023. – 272 с.
10. Парашук, И. Б. Большие Данные, проблемы и перспективы // Неделя науки : материалы конференции : в 2 кн. – Санкт-Петербург : ВАС, 2015. – Кн. 2. – С. 66–71.

11. ГОСТ Р 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. – Москва : Стандартиформ, 2021. – 16 с.
12. Остроух, А. В. Введение в искусственный интеллект : монография / А. В. Остроух. – Красноярск : Научно-инновационный центр, 2020. – 250 с.
13. Боровская, Е. В. Основы искусственного интеллекта: учебное пособие / Е. В. Боровская, Н. А. Давыдова. – 4-е изд. – Москва : Лаборатория знаний, 2020. – 130 с.
14. Елизаров, В. В. Анализ этапов и критериев выбора современных технологий искусственного интеллекта в интересах построения и совершенствования техники средств связи и автоматизации управления специального назначения / В. В. Елизаров, И. Б. Паращук, Д. В. Салюк // Техника средств связи. – 2023. – № 1 (161). – С. 60–68.
15. Буренок, В. М. Проблемы применения систем с искусственным интеллектом в военном деле / В. М. Буренок // Известия РАРАН. – 2021. – № 4 (119). – С. 3–6.
16. Авраменко, В. С. Анализ защищенности компьютерных сетей с применением технологий искусственного интеллекта / В. С. Авраменко // Актуальные проблемы защиты и безопасности : труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции, – Санкт-Петербург, 2024. – С. 287–290.
17. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – Москва : Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.
18. Паращук, И. Б. Применение аппарата условных вероятностей для разработки интегрального и частных показателей надежности систем хранения данных и резервного копирования / И. Б. Паращук, А. В. Михайличенко // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : материалы VIII межвузовской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург : ВАС. 2023. – С. 181–186.

### References

1. Senko, A. V. *Working with BigData in the Cloud. Data Processing and Storage with Examples from Microsoft Azure*. St. Petersburg, Piter Publishing House, 2018. 448 p. (In Russ.).
2. Lukichev, A. E. A New Type of Virtualization. *JetInfo Software-Defined Data Centers – The Fight for the Future*, 2014, no. 11 (256), pp. 26–30 (In Russ.).
3. Thomasian, A. *Storage Systems: Organization, Performance, Coding, Reliability, and Their Data Processing*. San Francisco, Morgan Kaufmann, 2021. 410 p.
4. Larson, D., Shin, A. *Data Science: Fundamentals of Data Analysis*. St. Petersburg, Piter Publishing House, 2021. 324 p. (In Russ.).
5. Makshanov, A. V., Musaev, A. A. *Data Mining : a tutorial*. St. Petersburg, SPbGTI(TU), 2019. 188 p. (In Russ.).
6. Shmal, V. N., Pavlov, S. S. *Data Mining : a tutorial*. Moscow, Ridero Publishing House, 2022. 182 p. (In Russ.).
7. Teslenko, I. B., Krylov, V. E., Gubernatorov, A. M., et al. *Big Data Analysis : A Tutorial*. Moscow, KnoRus, 2023. 295 p. (In Russ.).
8. Parashchuk, I. B. Big Data Problems. Features and Solutions. *IX-th St. Petersburg Interregional Conference "Information Security of Russian Regions-2015 (IBRR-2015)" : Conference Proceedings*. St. Petersburg, SPOISU, 2015, pp. 175–176 (In Russ.).
9. Gorelik, A. *Corporate Big Data Lake: A New Approach to Using Big Data and Data Science in Business*. Moscow, Eksmo, 2023. 272 p. (In Russ.).
10. Parashchuk, I. B. Big Data, Problems, and Prospects. *Science Week : Conference Proceedings* : in 2 books. St. Petersburg, VAS, 2015, book 2, pp. 66–71 (In Russ.).
11. *GOST R 59277-2020. Artificial Intelligence Systems. Classification of Artificial Intelligence Systems*. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 16 p. (In Russ.).
12. Ostroukh, A. V. *Introduction to Artificial Intelligence : monograph*. Krasnoyarsk, Research and Innovation Center, 2020. 250 p. (In Russ.).
13. Borovskaya E. V., Davydova N. A. *Fundamentals of Artificial Intelligence : a tutorial*. 4th ed. Moscow, Knowledge Laboratory, 2020. 130 p. (In Russ.).
14. Elizarov, V. V., Parashchuk, I. B., Salyuk, D. V. Analysis of the Stages and Criteria for Selecting Modern Artificial Intelligence Technologies for the Development and Improvement of Special-Purpose Communication and Control Automation Equipment. *Communication Equipment*, 2023, no. 1 (161), pp. 60–68. (In Russ.).
15. Burenok, V. M. Problems of Using Artificial Intelligence Systems in Military Affairs. *Izvestiya RARAS*, 2021, no. 4 (119), pp. 3–6 (In Russ.).
16. Avramenko, V. S. Analysis of computer network security using artificial intelligence technologies. *Actual problems of protection and security : proceedings of the XXVII All-Russian scientific and practical conference*. St. Petersburg, 2024, pp. 287–290 (In Russ.).
17. Ventsel, E. S. *Probability Theory*. Moscow, Publishing Center "Academy", 2003. 576 p. (In Russ.).
18. Parashchuk, I. B., Mikhailichenko, A. V. Application of the apparatus of conditional probabilities for the development of integral and partial indicators of the reliability of data storage and backup systems. *Problems of technical support of troops in modern conditions : proceedings of the VIII interuniversity scientific and practical conference*. St. Petersburg, VAS, 2023, pp. 181–186 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; одобрена после рецензирования 08.02.2026; принята к публикации 08.02.2026.

The article was submitted 28.01.2026; approved after reviewing 08.02.2026; accepted for publication 08.02.2026.

## УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.021

### УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ: ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ И ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

*Михеев Владислав Сергеевич*, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН), 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, аспирант, ORCID: 0009-0001-3310-248X, e-mail: 9665258@gmail.com

*Шермадини Марина Владимировна*, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, кандидат экономических наук, ORCID: 0000-0003-1694-7234, e-mail: essmd@yandex.ru

Информационная динамика современных предприятий определяется ростом масштабов данных и усложнением цифровых экосистем, что требует перехода от традиционных моделей обработки информации к многоуровневым архитектурам. В статье рассматриваются современные модели и практики управления, их ограничения. Сформулирована интегрированная архитектура, а именно предложена структурированная многоуровневая модель, включающая инфраструктурный, функциональный, аналитический и управляющий уровни, что обеспечивает баланс между качеством, скоростью, безопасностью и стоимостью обработки данных, а также вводится количественный показатель – индекс рациональности (R-index), позволяющий оценивать эффективность организационных решений. Показаны ключевые факторы, влияющие на результативность цифровизации, включая долю автоматизации, качество данных и зрелость процессов управления. Представлены международные и отечественные примеры применения цифровых решений, подтверждающие повышение производительности до 40 % и снижение совокупных издержек до 50 %. Сформулированы практические рекомендации по внедрению рациональных моделей управления информационными потоками через этапы диагностики, пилотирования, институционализации и масштабирования.

**Ключевые слова:** информационные потоки, цифровая трансформация, BPM, RPA, Data Governance, Data Fabric, ROI, TCO, CPT

### INFORMATION FLOW MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS: AN INTEGRATED MODEL AND PERFORMANCE INDICATORS

*Mikheev Vladislav S.*, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN), 6 Miklucho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation, graduate student, ORCID: 0009-0001-3310-248X, e-mail: 9665258@gmail.com

*Shermadini Marina V.*, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN), 6 Miklucho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation, Cand. Sci. (Economics), ORCID: 0000-0003-1694-7234, e-mail: essmd@yandex.ru

The informational dynamics of modern enterprises are shaped by the rapid expansion of data volumes and the increasing complexity of digital ecosystems, necessitating a shift from traditional information-processing models to multi-layered digital architectures. This article examines the concepts of rational information flow management under digital transformation and provides a comparative analysis of classical, agile, and integrative management models, highlighting their respective strengths and limitations. A structured multi-level model – comprising infrastructural, functional, analytical, and governance layers – is proposed to ensure an optimal balance between data quality, processing speed, security, and cost efficiency. A quantitative framework for evaluating management performance is substantiated through the rationality index (R-index) and economic indicators such as ROI, TCO, and CPT. The study identifies key factors influencing the effectiveness of digital transformation, including the degree of automation, data quality, and the maturity of governance processes. International and domestic cases are presented, demonstrating productivity gains of up to 40 % and reductions in total operating costs of up to 50 % following the implementation of integrated digital solutions. Practical recommendations are formulated for the implementation of rational information flow management models across the stages of diagnostics, piloting, institutionalization, and large-scale deployment.

**Keywords:** information flows, digital transformation, BPM, RPA, Data Governance, Data Fabric, ROI, TCO, CPT

## Graphical annotation (Графическая аннотация)

**ВВЕДЕНИЕ**

Стремительный рост масштабов данных, усложнение цифровых экосистем и повышение требований к скорости принятия решений приводят к пересмотру подходов к управлению информационными потоками в современных организациях [1]. По данным IDC, к 2025 г. мировой объем создаваемых и обрабатываемых данных достигнет 175 зеттабайт, что радикально усиливает нагрузку на корпоративные архитектуры и системы управления [2]. Параллельно цифровизация бизнес-процессов и активное внедрение технологий искусственного интеллекта формируют новый контекст функционирования организационных систем, где качество, скорость и безопасность обработки информации становятся критически важными параметрами устойчивого развития [3–6].

В традиционных управленческих моделях информационные потоки рассматриваются как вспомогательный элемент инфраструктуры. Однако в условиях цифровой трансформации они приобретают статус самостоятельного объекта управления, влияющего на производительность, эффективность процессов и управленческие решения [7]. Одновременно возрастает сложность архитектурных решений: организации переходят к гибридным вычислительным средам, распределенной обработке данных, потоковым системам и многоуровневым платформам. Это приводит к появлению новых управленческих задач – обеспечения непрерывности, согласованности, прозрачности и рациональности информационных потоков.

Несмотря на большое число разработок в области автоматизации процессов и управления данными, в научной и прикладной литературе недостаточно проработан вопрос интеграции архитектурных, организационных и экономических аспектов в единую управленческую модель [8]. Проблема заключается в ограниченности методического инструментария, который позволял бы оценивать рациональность управления потоками данных с учетом качества, скорости, безопасности и стоимости их обработки.

В данной статье рассматривается применение многоуровневого подхода к рациональному управлению информационными потоками в условиях цифровой трансформации.

Предлагаемый подход позволяет рассматривать информационные потоки не как вспомогательный технический элемент, а как самостоятельный управляемый ресурс, определяющий производительность, устойчивость и эффективность функционирования организационной системы.

**РАЦИОНАЛЬНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ**

Управление информационными потоками в современных организациях приобретает стратегическое значение, поскольку данные становятся ключевым ресурсом, определяющим эффективность процессов, качество управленческих решений и устойчивость цифровой инфраструктуры [9]. Под информационным потоком понимается упорядоченное движение данных между источниками, хранилищами, приложениями и пользователями в рамках единого контура управления [10].

Современные цифровые архитектуры характеризуются масштабируемостью, распределенностью и интероперабельностью. Широкое распространение получили потоковые технологии обработки данных, гибридные облачные решения и архитектура Data Fabric, объединяющая данные из различных источников в единую управляемую среду [11]. Существенно возрастает роль информационной безопасности: внедряются стандарты ISO/IEC 27001:2022 [12], системы мониторинга и управления событиями безопасности (SIEM) и предотвращения утечек данных (DLP) [13–15].

Рациональное управление информационными потоками предполагает обеспечение требуемого уровня качества, скорости и безопасности обработки данных при оптимальных совокупных затратах. В условиях цифровой трансформации это означает не только техническое обеспечение передачи информации, но и формирование управленческих механизмов, обеспечивающих согласованность, предсказуемость и прозрачность движения данных в организации.

С точки зрения управления, рациональность здесь выражается в способности организации:

- поддерживать прозрачность и трассируемость информационных потоков;
- обеспечивать своевременное и корректное поступление информации в точки принятия решений;
- минимизировать дублирование, простои и лишние операции;
- поддерживать устойчивость и безопасность цифровой инфраструктуры.

Таким образом, рациональное управление информационными потоками представляет собой комплексный управленческий процесс, направленный на обеспечение устойчивости и эффективности цифровой среды. Оно объединяет архитектурные решения, организационные практики и экономические критерии, позволяя рассматривать информационные потоки как самостоятельный объект управления, влияющий на производительность, качество процессов и стратегическую гибкость организации.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ**

В условиях цифровой трансформации наблюдается переход от традиционных организационных структур к гибким и интеграционным моделям управления. Ключевые типы моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Современные модели управления информационными потоками

Модель	Фокус	Сильные стороны	Слабые стороны	KPI	Типовая применимость
Иерархическая	Контроль и стандарты	Прогнозируемость, четкая ответственность	Медленная адаптация	Соблюдение SLA, дисциплина	Стабильные процессы
Функциональная	Экспертиза по функциям	Глубина компетенций	Сложная координация	Рентабельность по функциям	Большие организации
Проектная	Результат в срок /бюджет	Гибкость ресурсов	Временная природа, масштабируемость	Срок, бюджет, качество	Разовые инициативы
Agile	Адаптивность и ценность	Итеративность, обратная связь	Требует культуры /дисциплины	Время цикла, пропускная способность	ИТ-продукт
Lean	Устранение потерь	Снижение TCO	Издержки внедрения	CPT, OEE	Производство, сервис
DevOps	CI/CD и надежность	Скорость релизов	Требует зрелой инфраструктуры	MTTR, частота развертывания	ИТ-платформы
Интеграционные (BPM, RPA, Data Governance, Data Fabric)	Сквозное управление и интеграция	Системность, прозрачность, рациональность по Q/T/C/S	Сложность внедрения и координации	R-index, ROI, TCO, CPT	Цифровые предприятия, экосистемы

Традиционные модели (иерархическая, функциональная, проектная) ориентированы на стабильность, предсказуемость и контроль, обеспечивая четкое распределение ответственности и соблюдение стандартов. Однако их основным ограничением остается низкая адаптивность и слабая скорость реакции на изменения внешней среды [16].

Гибкие модели (Agile, Lean, DevOps) направлены на повышение адаптивности и ценности создаваемых продуктов. Agile базируется на итеративности и обратной связи, Lean фокусируется на устранении потерь и снижении TCO, тогда как DevOps обеспечивает непрерывную интеграцию и доставку (CI/CD, Continuous Integration/ Continuous Delivery), способствуя ускорению и повышению надежности. Несмотря на высокую эффективность, их внедрение требует зрелой организационной культуры, квалифицированного персонала и развитой инфраструктуры [17–19].

Интеграционные подходы (Data Governance, BPM, RPA, Data Fabric) ориентированы на системное объединение процессов, данных и технологий, что позволяет достичь рациональности управления информационными потоками за счет оптимизации качества, времени, стоимости и безопасности [20].

Таким образом, выбор модели определяется технологическими, организационно-культурными и стратегическими факторами развития предприятия, а также уровнем цифровой зрелости.

### ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ

Рационализация управления информационными потоками требует такой архитектуры, которая обеспечивает согласованность процессов, устойчивость цифровой среды и оперативность принятия решений. В качестве решения предлагается интегрированная многоуровневая модель, построенная на принципе распределения функций управления между четырьмя взаимосвязанными уровнями: инфраструктурным, функциональным, аналитическим и управляющим (табл. 2).

Таблица 2 – Уровни интегрированной модели

Уровень	Управленческая функция	Типовые решения и практики
Инфраструктурный	Обеспечение устойчивой среды функционирования потоков данных	Гибридные архитектуры (on-premise + cloud), ресурсы вычисления и хранения, возможности масштабирования
Функциональный	Организация движения данных и согласование процессов	BPM-системы, RPA-платформы, ETL/ELT-маршруты информационных потоков, логика процессов
Аналитический	Обработка и интерпретация данных для принятия решений	Big Data-платформы, AI/М-мониторинг, метрики, потоковая аналитика, предиктивные модели
Управляющий	Регламентация, контроль и координация системы в целом	Data Governance, каталоги данных, SLA политика управления данными, стандарты качества, требования безопасности

Такой подход обеспечивает устойчивость и масштабируемость архитектуры, а также позволяет оптимизировать использование вычислительных ресурсов и потоков данных.

Инфраструктурный уровень формирует ресурсную основу функционирования информационных потоков и обеспечивает их устойчивость. Его ключевая управленческая задача – создание среды, в которой потоки данных могут циркулировать предсказуемо, безопасно и с требуемой производительностью. Он включает средства вычислений, хранения, сетевого взаимодействия и обеспечивает масштабируемость и доступность, необходимые для бесперебойной работы процессов [21].

Функциональный уровень отвечает за организацию движения данных внутри процессов и между ними. Здесь формируются маршруты, логика взаимодействия подсистем, правила передачи и преобразования информации. С управленческой точки зрения функциональный уровень обеспечивает согласованность процессов, сокращает дублирование операций и поддерживает целостность сквозных информационных цепочек. Он играет центральную роль в обеспечении непрерывности выполнения операций в организации [22]. На практике для этого применяются решения UiPath, Camunda и Airflow, реализующие механизмы ETL/ELT (Extract, Transform / Load – извлечение, преобразование / загрузка данных) и автоматизированного распределения задач.

Аналитический уровень обеспечивает преобразование данных в управленческую информацию. Он интегрирует механизмы анализа, мониторинга и прогнозирования, позволяющие оценивать состояние процессов и принимать решения на основе фактических данных. Главная управленческая функция уровня – поддержка оперативного и стратегического управления за счет формирования метрик, выявления отклонений и прогнозирования последствий изменений в системе [23].

Аналитический уровень интегрирует инструменты анализа больших данных и искусственного интеллекта (Big Data, AI/ML), обеспечивая обработку и интерпретацию информации в режиме реального

времени. Использование фреймворков Apache Spark, Apache Flink и TensorFlow позволяет реализовать потоковую аналитику, обучение моделей и предиктивное управление потоками данных.

Управляющий уровень задает правила функционирования всей модели. Он определяет политику управления данными, требования к качеству, доступу и безопасности, а также нормы взаимодействия между подразделениями.

Содержательно этот уровень обеспечивает:

- управление рисками и ограничениями;
- контроль выполнения требований SLA;
- распределение ролей ответственности;
- соблюдение нормативных требований.

Управляющий уровень включает элементы Data Governance, механизмы обеспечения безопасности, контроль соблюдения SLA (Service Level Agreement – соглашение об уровне сервиса между поставщиком услуги и клиентом) и системы управления метаданными [24]. На данном уровне реализуются функции каталогизации данных (Data Catalog, Glue), контроля доступа RBAC (Role-Based Access Control – ролевое управление доступом), защиты информации DLP и SIEM, а также политики конфиденциальности и регуляторного соответствия, основанные на международных стандартах (ISO/IEC 27001:2022).

Совокупность указанных уровней формирует сквозную управляемость информационных потоков – от момента генерации данных до этапов их анализа, хранения и принятия управленческих решений. Такое построение обеспечивает рациональное управление информационными ресурсами, где архитектурные, технологические и организационные элементы являются взаимодополняющими и работают согласованно.

Построенная модель представляет собой целостный инструмент управления, в котором архитектурный, процессный и аналитический аспекты объединены в единое управленческое решение, отличается рядом ключевых преимуществ. Во-первых, она гибридная, поскольку сочетает локальные вычислительные ресурсы и облачные сервисы, что позволяет гибко распределять данные и вычислительные мощности в зависимости от задач. Во-вторых, архитектура обладает масштабируемостью – нагрузка между компонентами системы перераспределяется динамически, обеспечивая устойчивую производительность при росте объемов данных. В-третьих, модель характеризуется высокой устойчивостью, достигаемой за счет резервирования данных, мониторинга инфраструктуры и встроенных механизмов управления рисками.

В результате интегрированная многоуровневая модель создает баланс между качеством, производительностью, экономичностью и безопасностью, выступая системной основой рационального управления данными в условиях цифровой трансформации.

#### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ

Рациональность управления информационными потоками целесообразно оценивать на основе совокупности количественных показателей, отражающих качество, скорость, стоимость и устойчивость обработки данных. Для этой цели вводится интегральный показатель – **индекс рациональности  $R$  –  $index$** , позволяющий оценивать эффективность принятых управленческих решений.

Он позволяет в единой нормированной метрике отразить баланс между качеством, безопасностью, скоростью и стоимостью обработки данных, обеспечивая объективное сравнение различных конфигураций и управленческих решений:

$$R - index = \frac{(\alpha \cdot Q + \beta \cdot S)}{(\gamma \cdot T + \delta \cdot C)}, \text{ где } \alpha, \beta, \gamma, \delta > 0 \text{ и } \alpha + \beta = \gamma + \delta = 1, \quad (1.1)$$

где  $Q$  – качество данных (достоверность, полнота, актуальность, точность);

$T$  – время обработки (латентность, задержка, отклик системы);

$C$  – стоимость обработки (издержки на инфраструктуру, лицензии, персонал);

$S$  – безопасность (уровень защищенности данных и соответствие нормативам);

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – весовые коэффициенты.

Рост качества данных ( $Q$ ) и уровня безопасности ( $S$ ) способствует увеличению значения индекса рациональности, тогда как увеличение времени обработки ( $T$ ) и стоимости, напротив, приводит к его снижению. Параметры  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  выступают в роли весовых коэффициентов, которые отражают относительную важность каждого из критериев в структуре интегрального показателя. Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  определяют, насколько сильно на эффективность системы влияют качество и безопасность, в то время как  $\gamma$  и  $\delta$  описывают вклад временных и стоимостных факторов, определяющих общие издержки функционирования.

Для корректного учета показателей параметры  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  нормируются следующим образом:  $\alpha + \beta = \gamma + \delta = 1$ . Таким образом, они приобретают роль весов, в зависимости от целей компании (упор на надежность системы, защиту данных, качество или безопасность). В производственных

или логистических системах, где главным критерием рациональности выступают скорость обработки и снижение совокупных затрат, акцент, напротив, переносится на параметры времени (Т) и стоимости (С). Такой подход делает индекс гибким инструментом, адаптируемым под специфику отрасли и управленческих задач (табл. 3).

Таблица 3 – Параметры R-index интегрированной модели

Параметр	Отвечает за	Смысл и влияние	Типичные значения
$\alpha$ (альфа)	Вес качества данных (Q)	Чем выше $\alpha$ , тем сильнее влияние точности, актуальности и достоверности данных на общий показатель рациональности	0,3–0,5
$\beta$ (бета)	Вес безопасности (S)	Отражает приоритет защищенности, соответствия нормативам (GDPR, ISO 27001, ФЗ-152 [25])	0,2–0,4
$\gamma$ (гамма)	Вес времени обработки (T)	Характеризует важность оперативности и скорости процессов; увеличение $\gamma$ усиливает «наказание» за задержки	0,2–0,4
$\delta$ (дельта)	Вес стоимости (C)	Отражает влияние финансовой эффективности (CAPEX, OPEX, CPT) на итоговую рациональность	0,3–0,5

Числитель ( $\alpha \cdot Q + \beta \cdot S$ ) показывает ценность системы – насколько качественно и безопасно управляются потоки данных. Знаменатель ( $\gamma \cdot T + \delta \cdot C$ ) – стоимость достижения этой ценности в терминах времени и ресурсов. Таким образом, R-index растет, если качество и безопасность повышаются быстрее, чем увеличиваются затраты и время.

Чтобы оценить оптимальный баланс между затратами и полезностью системы, используется функция оптимизации. Решение сводится к поиску такого значения  $r^*$ , при котором функция максимизации равна нулю:

$$\max_{Q,T,C,S} R - index(Q, T, C, S) = (\alpha Q + \beta S) - r^*(\gamma T + \delta C). \quad (1.2)$$

Для этого используется последовательный подход: фиксируется первоначальное значение параметра  $r$ , при котором достигается текущий R-index. Далее пересчитывается значение функции при новых  $r^*$  до тех пор, пока разница между соседними значениями не станет незначительной. Это будет означать, что дальнейшее улучшение системы без изменения внешних параметров невозможно, и система вышла в оптимум.

Для оценки инвестиций используют показатель ROI, который отражает, насколько эффективно окупаются цифровые решения. Эта метрика показывает, сколько прибыли или экономии приносит каждый вложенный рубль. В контексте цифровизации ROI помогает понять, оправдывают ли себя расходы на автоматизацию и модернизацию процессов. Показатель учитывает не только первоначальные капитальные вложения (оборудование, лицензии, разработку), но и текущие эксплуатационные затраты – обслуживание, поддержку и персонал. Если ROI положителен, значит, проект приносит ощутимый экономический эффект: сокращаются операционные издержки, растет производительность и снижаются трудозатраты. ROI служит универсальным индикатором результативности цифровой трансформации, позволяя сравнивать разные проекты между собой и принимать решения о целесообразности дальнейших инвестиций:

$$ROI = \frac{E_{\text{год}} - C_{\text{внедр}}}{C_{\text{внедр}}}, \quad (2.1)$$

где  $E_{\text{год}}$  – годовая экономия;

$C_{\text{внедр}}$  – капитальные затраты на внедрение.

Расширенный ROI, учитывающий эксплуатационные расходы, можно представить следующим образом:

$$ROI = \frac{E - OPEX - CAPEX}{CAPEX}, \quad (2.2)$$

где  $E$  – ожидаемый экономический эффект;

$CAPEX$  – капитальные затраты на внедрение;

$OPEX$  – операционные расходы.

Если требуется оценить экономический эффект без учета операционных затрат, применяется упрощенная формула  $ROI_{\text{capex}}$ , отражающая чистую окупаемость первоначальных инвестиций в проект цифровизации:

$$ROI_{capex} = \frac{E - CAPEX}{CAPEX} \quad (2.3)$$

Ожидаемый экономический эффект можно представить как произведение четырех факторов: объема выполняемых операций ( $N$ ), доли процессов, которые удалось автоматизировать ( $d$ ), базовой стоимости одной операции ( $c_0$ ) и процента снижения этой стоимости благодаря автоматизации. Тогда ROI можно выразить как:

$$ROI = \frac{N \cdot d \cdot c_0 \cdot e - OPEX - CAPEX}{CAPEX}, \quad (2.4)$$

$$ROI_{capex} = \frac{N \cdot d \cdot c_0 \cdot e - CAPEX}{CAPEX} \quad (2.5)$$

Связывая экономический эффект с инвестиционными затратами, ROI в данном случае позволяет оценить сроки получения финансовой отдачи от проекта.

С другой стороны, для оценки затрат на эксплуатацию системы (обслуживание, лицензии, персонал, модернизация и др.) на протяжении ее жизненного цикла используется показатель TCO. Он также позволяет оценить экономическую рациональность различных архитектурных решений:

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^n OPEX_t. \quad (3)$$

Для оценки стоимости одной операции (расчет, запрос данных, обработка документа и др.) используется показатель CPT – средней стоимости транзакции. Он особенно важен при анализе эффективности автоматизации, поскольку демонстрирует удельный экономический эффект автоматизации.

$$CPT = \frac{\text{Общие затраты за период}}{\text{Количество транзакций}} \quad (4)$$

Также в целях обеспечения надежности и предсказуемости информационной системы используется SLA – соглашение об уровне обслуживания. Он представляет собой формализованный набор метрик качества IT-услуг, которые определяют ключевые параметры работы системы: максимально допустимое время простоя, уровень доступности, время реакции и восстановления, а также обязательства по безопасности и защите данных.

В контексте данной модели SLA выступает как система ограничений: она задает предельные значения времени отклика, отказоустойчивости, пропускной способности и требований по локализации данных. Другими словами, SLA определяет рамки, в которых система должна функционировать, обеспечивая баланс между производительностью, надежностью и безопасностью.

### РОССИЙСКАЯ И МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИКИ

Мировая и отечественная практика демонстрируют, что рационализация управления информационными потоками оказывает значимое влияние на производительность, устойчивость и экономическую эффективность организаций.

Международные компании активно используют гибридные архитектуры, потоковую обработку данных и автоматизацию процессов для сокращения задержек в принятии решений и повышения точности аналитики. Например, переход к распределенным конвейерам обработки данных позволил ряду глобальных цифровых платформ сократить время реакции на события и значительно уменьшить операционные затраты. Использование сквозной аналитики и автоматизации процессов обеспечило рост производительности на 20–40 %, что подтверждается данными аналитических отчетов Deloitte и Gartner. Исследования Gartner (2023) и Deloitte (2024) подтверждают, что использование гибридных архитектур приводит к снижению TCO от 35 до 60 %, а скорость аналитической обработки данных возрастает в 2–3 раза [26, 27]. Это подчеркивает, что переход к распределенным архитектурам и облачным технологиям дает не только прямой экономический эффект, но и повышает гибкость и устойчивость цифровых систем.

В промышленном секторе широкое распространение получили цифровые двойники и управляемые модели потоков данных, применяемые для мониторинга оборудования в режиме реального времени. Эта технология позволила крупным международным производственным компаниям снизить количество unplanned простоев оборудования на 35 %, повысить предсказуемость операционных процессов и сократить операционные издержки примерно на 20 % [28–30]. Потоковая обработка данных и аналитика в реальном времени сегодня стали стандартом для ведущих цифровых компаний. Создание распределенных конвейеров и графов потоковой обработки, применение архитектуры Kinesis + Lambda + DynamoDB позволяет обрабатывать миллиарды событий в реальном времени, сокращая задержку принятия решений на 67 % и повышая точность прогнозирования спроса на 25 %. Реализация персонализации контента с помощью Apache Kafka и Spark Streaming позволяет улучшить внутренние показатели до 20,5 % при переходе на event-driven (событийно-ориентированную) архитектуру.

Российская практика также демонстрирует высокую результативность подходов, основанных на оптимизации информационных потоков. Крупные организации внедряют BPM-системы, автоматизацию процессов и аналитические платформы, что обеспечивает сокращение времени обработки информации, повышение качества данных и снижение издержек. В финансовом и транспортном секторах применение интегрированных моделей управления потоками данных привело к ускорению обработки операций и улучшению клиентских сервисов, а также к значительному росту операционной эффективности [31].

По данным Сбера (2024), автоматизация клиентских процессов позволила сократить время обработки заявок на 42 % и уменьшить операционные расходы на 31 %, что подтверждает высокую отдачу от внедрения интеллектуальных технологий на отечественном рынке [32].

Представленный обзор подтверждает, что внедрение многоуровневых моделей управления информационными потоками обеспечивает устойчивый экономический и организационный эффект и является ключевым направлением развития современных цифровых предприятий.

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

Реализация моделей рационального управления информационными потоками требует системного и поэтапного подхода, который сочетает методологии BPM, RPA, Data Governance и принципы гибридной цифровой архитектуры. Мировая и отечественная практика показывает, что устойчивый эффект достигается не одномоментно, а через четыре взаимосвязанные фазы внедрения: диагностику, пилотирование, институционализацию и масштабирование [33].

Диагностика (0–1 месяц). На стартовом этапе проводится аудит текущего состояния: картируются существующие информационные потоки, анализируются ключевые метрики эффективности – CPT, время обработки (T) и интегральный показатель рациональности (R-index). Одновременно выполняется оценка цифровой зрелости организации и уровня соответствия установленным SLA. Результатом этапа становится базовая аналитическая модель, обеспечивающая прозрачность движения данных и выявляющая «узкие места» – участки, где процессы можно оптимизировать или автоматизировать [34].

Пилотные проекты (1–6 месяцев). Следующий шаг – пилотные проекты в 1–3 наиболее перспективных бизнес-процессах. Здесь рекомендуется использовать принцип Quick Wins («быстрых побед») – выбирать направления, где автоматизация даст быстрый и ощутимый эффект при минимальных интеграционных сложностях. В проектах применяются технологии RPA и BPM, а в качестве контрольных метрик фиксируются CPT, пропускная способность и уровень ошибок. Этот этап служит проверкой эффективности концепции и формирует практические аргументы для масштабирования.

Институционализация (6–12 месяцев). После успешных пилотов организация переходит к укреплению внутренних компетенций и структур. Создаются центры компетенций, которые обеспечивают методическую поддержку проектов и развитие экспертизы внутри компании. Параллельно формируется политика управления данными, создаются корпоративный каталог данных, реестр аналитических и ML-моделей, а также вводятся процессы контроля их жизненного цикла. Это повышает зрелость цифровой среды и обеспечивает соответствие требованиям международных стандартов ISO/IEC 20000-1:2018 и ISO/IEC 27001:2022 [35]. На этом этапе компания фактически переходит от отдельных инициатив к системному управлению цифровыми процессами.

Финальная стадия – масштабирование и переход к гибридной архитектуре. Реализуется развёртывание API-шлюзов, систем наблюдаемости (Observability Systems), а также оркестрация микросервисов и потоковых процессов (Microservice and Stream Orchestration). Целевые показатели эффективности включают достижение уровня R-index > 0,7 и снижение совокупной стоимости обработки (CPT) не менее чем на 30 % в течение первого года. Согласно аналитическим обзорам Gartner (2023) и World Bank (2024), именно на этом этапе организации получают синергетический эффект – благодаря объединению автоматизации, аналитики и управления качеством данных [36]. Система становится не просто технологически развитой, а управляемой, измеримой и устойчивой.

Предложенная последовательность шагов отражает эволюционную логику цифровой трансформации: каждая стадия опирается на результаты предыдущей и формирует основу для следующей. Такой подход обеспечивает прозрачность процессов, управляемость изменений и возможность точной оценки эффективности, делая внедрение рациональных моделей управления данными не разовой инициативой, а непрерывным процессом организационного развития.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представленная в работе интегрированная модель рационального управления информационными потоками демонстрирует, что эффективность цифровых систем определяется не отдельными технологиями, а сбалансированным взаимодействием архитектуры, процессов и управления. Такой подход позволяет достигать оптимума между качеством, скоростью, безопасностью и затратами на обработку данных – четырьмя ключевыми параметрами устойчивой цифровой инфраструктуры.

Использование формализованных метрик – индекса рациональности (R-index), а также показателей ROI, TCO и CPT – делает возможной количественную оценку эффекта цифровизации и ее

влияния на производственные и управленческие процессы. Проведенный анализ чувствительности показал, что доля автоматизации (d) и коэффициент экономии являются основными факторами, определяющими рост ROI. Повышение цифровой зрелости при этом достигается через внедрение систем Data Governance и развитие центров компетенций (CoE), которые формируют культуру ответственного управления данными.

Полученные результаты подтверждают, что интеграция гибридных архитектур с технологиями BPM, RPA и AI обеспечивает ощутимый экономический и организационный эффект: повышение производительности труда на 25–40 %, сокращение издержек на 30–50 % и рост показателя рациональности (R-index) до 0,7–0,8. При этом соблюдение стандартов ISO/IEC 20000-1:2018, ISO/IEC 27001:2022, GDPR и ФЗ-152 обеспечивает нормативную устойчивость и доверие пользователей к цифровым решениям, что особенно важно в условиях роста требований к безопасности и прозрачности данных.

В перспективе дальнейшие исследования целесообразно направить на развитие когнитивных моделей управления потоками данных, цифровых двойников информационных систем и интеграцию принципов ESG-аналитики (Environmental, Social, Governance Analytics) в оценку рациональности цифровых экосистем. Это позволит перейти от оценки отдельных метрик к комплексному анализу цифровой устойчивости, где экономическая эффективность, технологическое качество и социальная ответственность будут рассматриваться как взаимосвязанные элементы единой цифровой стратегии.

#### Список источников

1. Индикаторы цифровой экономики : 2024 : стат. сб. / НИУ ВШЭ. – Москва, 2024. – 312 с.
2. IDC. The Digitization of the World From Edge to Core: Data Age 2025. Framingham (MA): International Data Corporation. – 2018. – URL: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/dataage-idc-report-final.pdf>.
3. OECD. Digital Economy Outlook 2023. – Paris : OECD Publishing, 2023. – URL: [https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-economy-outlook\\_f0b5c251-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-economy-outlook_f0b5c251-en.html).
4. McKinsey & Company. The State of AI 2024. – McKinsey Global Institute, 2024. – URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai>.
5. Доклад о реализации плана деятельности Минцифры России за 2022 год. По данным Сбера (2024), автоматизация клиентских процессов: Минцифры России, 2023.
6. Искусственный интеллект в управлении : аналитический доклад / НИУ ВШЭ. – Москва, 2024.
7. Голубков, Е. П. Информационные потоки в управлении организацией / Е. П. Голубков // Менеджмент в России и за рубежом. – 2022. – № 4. – С. 45–53.
8. Клейнер, Г. Б. Системная экономика / Г. Б. Клейнер. – Москва : ЦЭМИ РАН, 2020. – 746 с.
9. Ковальчук, М. В. Цифровая трансформация экономики / М. В. Ковальчук, О. С. Нарайкин // Вестник РАН. – 2021. – Т. 91, № 5. – С. 403–412.
10. Афанасьев, В. Н. Управление информационными потоками в организациях / В. Н. Афанасьев. – Москва : Финансы и статистика, 2019. – 256 с.
11. Kaspersky ICS-CERT. Threat Landscape for Industrial Automation Systems (Q2 2024). – Moscow : Kaspersky Lab, 2024. – URL: <https://ics-cert.kaspersky.com/publications/reports/2024/09/26/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-q2-2024>.
12. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Information security management systems. Requirements. – Geneva : ISO, 2022.
13. Positive Technologies. Cybersecurity Threat Landscape 2024: Annual Analytical Report. – Moscow : Positive Technologies, 2024. – URL: <https://ptsecurity.com/ww-en/analytics>.
14. Endpoint Protector. What does ISO 27001:2022 say about Data Loss Prevention? Blog. – 2023. – URL: <https://www.endpointprotector.com/blog/how-dlp-can-help-you-with-iso-27001-compliance>.
15. Metomic. Is DLP (Data Loss Prevention) a Requirement for ISO 27001:2022? – London : Metomic Ltd, 2025. – URL: <https://www.metomic.io/resource-centre/is-dlp-a-requirement-for-iso-27001-2022>.
16. Коротков, Э. М. Теория менеджмента / Э. М. Коротков. – Москва : Юрайт, 2023. – 640 с.
17. Панфилова, А. П. Гибкие методы управления / А. П. Панфилова // Управленческие науки. – 2021. – № 3. – С. 27–36.
18. Вумек, Дж. Бережливое производство / Дж. Вумек, Д. Джонс. – Москва : Альпина Паблишер, 2020. – 472 с.
19. DevOps и цифровая зрелость организаций : доклад / НИУ ВШЭ. – Москва, 2022.
20. Шеремет, А. Д. Управление бизнес-процессами предприятия А. Д. / Шеремет. – Москва : Инфра-М, 2021. – 384 с.
21. Калинина, О. В. Архитектура корпоративных информационных систем / О. В. Калинина // Бизнес-информатика. – 2022. – № 2. – С. 15–26.
22. Лapidус Л. В. Экономика данных / Л. В. Лapidус. – Москва : Юрайт, 2022. – 304 с.
23. Data Governance : методические рекомендации / НИУ ВШЭ. – Москва, 2023.
24. Управление данными в цифровых организациях : аналитический доклад / НИУ ВШЭ. – Москва, 2023.
25. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных» (ред. 2024) // Официальный интернет-портал правовой информации Российской Федерации. – Москва, 2024. – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102108643>.

26. Deloitte. Automation with Intelligence: 2022 Global Intelligent Automation Survey. – London : Deloitte LLP, 2022. – URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/technology-and-the-future-of-work/intelligent-automation-2022-survey-results.html>.
27. Gartner Inc. Hybrid Cloud Economics Report 2023. – Stamford (CT) : Gartner Research, 2023. – URL: <https://www.gartner.com/en/documents/4000565-hybrid-cloud-economics-report>.
28. Netflix Tech Blog. How and Why Netflix Built a Real-Time Distributed Graph (Part 1). URL: <https://netflixtechblog.com/how-and-why-netflix-built-a-real-time-distributed-graph-part-1-ingesting-and-processing-data-80113e124acc>.
29. Siemens, A. G. Digital Twin for Industrial Data Flows / A. G. Siemens. – Munich : Siemens AG, 2024. – URL: <https://www.siemens.com/digital-twin>.
30. Fowler, M. Refactoring and the Strangler Fig Pattern in Modern Software Architecture / M. Fowler. – Boston : ThoughtWorks Press, 2021. – URL: <https://martinfowler.com/bliki/StranglerFigApplication.html>.
31. Цифровая трансформация организаций в России : стат. сб. / Росстат. – Москва, 2024.
32. Годовой отчет ПАО «Сбербанк России» за 2024 г. – Москва, 2025.
33. Методология цифровой трансформации организаций / Минцифры РФ. – Москва, 2023.
34. ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000-1-2019. Управление ИТ-услугами. – Москва : Стандартинформ, 2019.
35. ISO/IEC 20000-1:2018. Information Technology. Service Management. – Geneva : ISO, 2018.
36. World Bank. Digital Development Overview 2024. – Washington D.C. : World Bank Group, 2024. – URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/digitaldevelopment/overview>.

### References

1. *Indicators of the Digital Economy: 2024: Statistical Compendium*. National Research University Higher School of Economics. Moscow, 2024. 312 p. (In Russ.).
2. IDC. *The Digitization of the World From Edge to Core: Data Age 2025. Framingham (MA): International Data Corporation*, 2018. Available at: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/dataage-idc-report-final.pdf>.
3. OECD. *Digital Economy Outlook 2023*. – Paris: OECD Publishing, 2023. Available at: [https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-economy-outlook\\_f0b5c251-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-economy-outlook_f0b5c251-en.html)
4. *McKinsey & Company. The State of AI 2024*. McKinsey Global Institute, 2024. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai>.
5. *Report on the Implementation of the Activity Plan of the Ministry of Digital Development of Russia for 2022*. Moscow, Ministry of Digital Development of Russia, 2023 (In Russ.).
6. *Artificial Intelligence in Governance: Analytical Report*. National Research University Higher School of Economics. Moscow, 2024 (In Russ.).
7. Golubkov, E.P. Information Flows in Organization Management. *Management in Russia and Abroad*, 2022, no. 4, pp. 45–53 (In Russ.).
8. Kleiner, G. B. *Systemic Economics*. Moscow, CEMI RAS, 2020. 746 p. (In Russ.).
9. Kovalchuk, M. V., Naraykin, O. S. Digital Transformation of the Economy. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2021, vol. 91, no. 5, pp. 403–412 (In Russ.).
10. Afanasyev, V. N. *Management of Information Flows in Organizations*. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2019. 256 p. (In Russ.).
11. *Kaspersky ICS-CERT. Threat Landscape for Industrial Automation Systems (Q2 2024)*. Moscow, Kaspersky Lab, 2024. Available at: <https://ics-cert.kaspersky.com/publications/reports/2024/09/26/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-q2-2024>.
12. *ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Information security management systems. Requirements*. Geneva, ISO, 2022.
13. *Positive Technologies. Cybersecurity Threat Landscape 2024: Annual Analytical Report*. Moscow, Positive Technologies, 2024. Available at: <https://ptsecurity.com/ww-en/analytics>.
14. *Endpoint Protector. What does ISO 27001:2022 say about Data Loss Prevention? Blog*, 2023. Available at: <https://www.endpointprotector.com/blog/how-dlp-can-help-you-with-iso-27001-compliance>.
15. *Metomic. Is DLP (Data Loss Prevention) a Requirement for ISO 27001:2022?* London, Metomic Ltd, 2025. Available at: <https://www.metomic.io/resource-centre/is-dlp-a-requirement-for-iso-27001-2022>.
16. Korotkov, E. M. *Management Theory*. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 640 p. (In Russ.).
17. Panfilova, A. P. Agile Management Methods. *Managerial Sciences*, 2021, no. 3, pp. 27–36 (In Russ.).
18. Womack, J., Jones, D. *Lean Production*. Moscow, Alpina Publisher, 2020. 472 p. (In Russ.).
19. *DevOps and Digital Maturity of Organizations : report*. National Research University Higher School of Economics. Moscow, 2022 (In Russ.).
20. Sheremet, A. D. *Enterprise Business Process Management*. Moscow, Infra-M Publ., 2021. 384 p. (In Russ.).
21. Kalinina, O. V. Architecture of Corporate Information Systems. *Business Informatics*, 2022, no. 2, pp. 15–26 (In Russ.).
22. Lapidus, L. V. *Data Economy*. Moscow, Yurayt Publ., 2022. 304 p. (In Russ.).
23. *Data Governance: Methodological Recommendations*. National Research University Higher School of Economics. Moscow, 2023 (In Russ.).
24. *Data Management in Digital Organizations: Analytical Report*. National Research University Higher School of Economics. Moscow, 2023 (In Russ.).
25. Federal Law of July 27, 2006 no. 152-FZ “On Personal Data” (ed. 2024). *Official Internet Legal Information Portal of the Russian Federation*. Moscow, 2024. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102108643> (In Russ.).

26. *Deloitte. Automation with Intelligence: 2022 Global Intelligent Automation Survey*. London, Deloitte LLP, 2022. Available at: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/technology-and-the-future-of-work/intelligent-automation-2022-survey-results.html>.

27. *Gartner Inc. Hybrid Cloud Economics Report 2023*. Stamford (CT), Gartner Research, 2023. Available at: <https://www.gartner.com/en/documents/4000565-hybrid-cloud-economics-report>.

28. *Netflix Tech Blog. How and Why Netflix Built a Real-Time Distributed Graph (Part 1)*. Available at: <https://netflixtechblog.com/how-and-why-netflix-built-a-real-time-distributed-graph-part-1-ingesting-and-processing-data-80113e124acc>.

29. *Siemens AG. Digital Twin for Industrial Data Flows*. Munich, Siemens AG, 2024. Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin>.

30. Fowler, M. *Refactoring and the Strangler Fig Pattern in Modern Software Architecture*. Boston, ThoughtWorks Press, 2021. Available at: <https://martinfowler.com/bliki/StranglerFigApplication.html>.

31. *Digital Transformation of Organizations in Russia: Statistical Compendium*. Federal State Statistics Service (Rosstat). Moscow, 2024 (In Russ.).

32. *Annual Report of Public Joint-Stock Company Sberbank of Russia for 2024*. Moscow, 2025 (In Russ.).

33. *Methodology for Digital Transformation of Organizations*. Ministry of Digital Development of the Russian Federation. Moscow, 2023 (In Russ.).

34. *GOST R ISO/IEC 20000-1–2019. IT Service Management*. Moscow, Standartinform, 2019 (In Russ.).

35. *ISO/IEC 20000-1:2018. Information Technology. Service Management*. Geneva, ISO, 2018.

36. *World Bank. Digital Development Overview 2024*. Washington D.C., World Bank Group, 2024. Available at: <https://www.worldbank.org/en/topic/digitaldevelopment/overview>.

Статья поступила в редакцию 16.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 16.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 09.02.2026.

## **МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

УДК 621.315.626:621.311.001.57

### **СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ, ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

*Никифоров Александр Анатольевич*, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0009-0004-9195-1537, e-mail: [ieei\\_director@mail.ru](mailto:ieei_director@mail.ru)

*Порваткин Егор Константинович*, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,

магистрант, e-mail: [egor.porvatkin1@gmail.com](mailto:egor.porvatkin1@gmail.com)

*Шаронов Максим Александрович*, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,

аспирант, ORCID: 0009-0002-5291-7980, e-mail: [max.sharonov.97@mail.ru](mailto:max.sharonov.97@mail.ru)

*Львов Алексей Арленович*, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,

доктор технических наук, профессор, ORCID:0000-0003-4270-7867, e-mail: [alvova@mail.ru](mailto:alvova@mail.ru)

В статье представлен комплексный подход к созданию имитационных цифровых двойников в среде MATLAB/Simulink для исследования разнообразия качеств электроэнергии. Рассмотрены модели, воспроизводящие различные причины возникновения провалов напряжения: аварийные режимы в распределительных сетях, пуск мощных асинхронных двигателей, подключение силовых трансформаторов. Дополнительно создан двойник для анализа электрических переходных процессов при коммутации конденсаторных установок. Все разработанные цифровые двойники построены на основе блочной структуры MATLAB/Simulink и позволяют проводить детальный анализ процессов ухудшения качества электроэнергии. Приведены результаты численного исследования.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, цифровой двойник, MATLAB/Simulink, падение напряжения, переходной процесс, компьютерное моделирование

### **CREATION OF DIGITAL TWINS FOR TRANSIENT PROCESSES ARISING IN POWER GRIDS TO STUDY THE QUALITY OF ELECTRIC SUPPLY**

*Nikiforov Alexander A.*, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0009-0004-9195-1537, e-mail: [ieei\\_director@mail.ru](mailto:ieei_director@mail.ru)

*Porvatkin Egor K.*, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,

master's student, e-mail: [egor.porvatkin1@gmail.com](mailto:egor.porvatkin1@gmail.com)

*Sharonov Maksim A.*, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,

graduate student, ORCID: 0009-0002-5291-7980, e-mail: [max.sharonov.97@mail.ru](mailto:max.sharonov.97@mail.ru)

*Lvov Aleksey A.*, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0003-4270-7867, e-mail: [alvova@mail.ru](mailto:alvova@mail.ru)

The article presents a comprehensive approach to creating simulation-based digital twins in the MATLAB/Simulink environment aimed at studying various aspects of electric energy quality. Models that reproduce different causes of voltage dips are considered, including emergency modes in distribution networks, start-up of powerful asynchronous motors, connection of power transformers. Additionally, a twin has been created for analyzing electrical transient processes during switching of capacitor banks. All developed digital twins are built using MATLAB/Simulink block structure and allow detailed analysis of processes leading to deterioration of electricity quality. The results of numerical research are presented.

**Keywords:** electricity quality, digital twin, MATLAB/Simulink, voltage dip, transient process, computer modeling

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение высокого качества электроэнергии представляет собой одну из основных задач современной энергетики, особенно в условиях развития интеллектуальных электрических сетей. Экономический ущерб от изменения качества электроэнергии может иметь значительные размеры как для энергоснабжающих организаций, так и для потребителей [1–3].

Основными типами качеств электроэнергии являются: провалы и скачки напряжения, переходные процессы, гармонические изменения и фликер. Для эффективного решения задачи повышения качества электроэнергии необходимо детальное изучение физических процессов, приводящих к нарушениям, а также разработка методов их предотвращения.

Современные вычислительные средства позволяют создавать детальные цифровые двойники электроэнергетических систем для исследования различных аспектов качества электроэнергии. Использование таких двойников дает возможность не только анализировать возможные проблемы, но и прогнозировать поведение систем с учетом различных вариантов развития событий [4]. Кроме того, моделирование позволяет изучать механизмы работы электрических сетей и оценивать их эффективность [5].

Для создания цифровых двойников электроэнергетических систем существует множество компьютерных программных продуктов [6], каждый из которых имеет свои особенности и область применения. В научно-исследовательской практике широко использовались такие программы, как MATLAB с пакетами PowerSystemToolbox [7, 8], Simulink с библиотекой PowerAnalysisToolbox [9] и SimPowerSystems [10–12], PSCAD/EMTDC [13], ATP/EMTP [14], PowerSystemAnalysisToolbox [15, 16]. В данной работе для создания цифрового двойника взята программа MATLAB/Simulink с библиотекой SimPowerSystems.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач были созданы цифровые двойники в среде MATLAB/Simulink. Основная цель исследования заключается в компьютерном моделировании переходных процессов, возникающих в электросети при различных ситуациях, для изучения различных типов качеств электроэнергии.

При разработке цифровых двойников использовались следующие принципы: минимизация количества блоков, применение стандартных настроек параметров для обеспечения воспроизводимости результатов, создание универсальных модулей для дальнейшего использования в составе более сложных систем. Параметры двойников соответствуют характеристикам типовых отечественных электрических сетей по ГОСТ 32144-2013 [17].

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Разработанный двойник аварийных режимов в распределительных сетях представлен на рисунке 1. Данная модель предназначена для исследования провалов напряжения, возникающих при различных типах замыкания. Структура модели включает трехфазный источник питания с номинальными параметрами: напряжение 10 кВ, мощность 30 МВА, частота 50 Гц. Питание потребителей осуществляется через понижающий трансформатор с соединением обмоток треугольник-звезда (10/0,4 кВ, 1 МВА). Нагрузка предусмотрена активным сопротивлением 10 кВт и индуктивностью 100 ВАР.

Для регистрации параметров включения режима в моделях предусмотрены измерительные блоки, фиксирующие мгновенные значения и действующие значения напряжения на шинах 10 кВ и 0,4 кВ. Имитация аварийных режимов осуществляется с помощью специальных блоков, позволяющих моделировать различные типы замыканий на шинах 10 кВ. Длительность рассмотрения составляет 0,4 с. Анализ гармонического состава сигналов проводится с использованием методов, описанных в источниках [18–21].

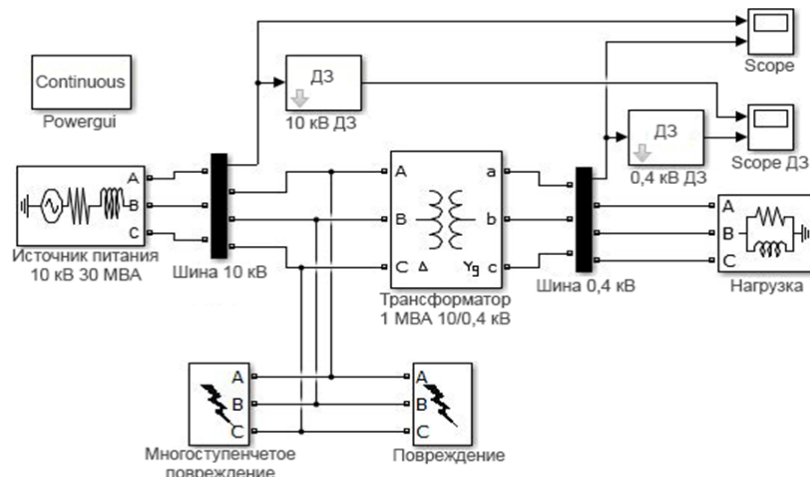


Рисунок 1 – Цифровой двойник аварийных режимов в линиях электропередачи

Разработанный цифровой двойник позволяет воспроизводить широкий спектр аварийных режимов: однофазные и двухфазные замыкания на землю, межфазные короткие замыкания, трехфазные короткие замыкания, а также многоступенчатые повреждения. На рисунке 2 показаны осциллограммы напряжения при междуфазном замыкании между фазами А и В в сети 10 кВ, возникшего в момент времени 0,168 с.

Анализ результатов показывает, что на шинах 10 кВ наблюдаются значительные изменения напряжения в поврежденных фазах А и В, при этом глубина провала различна для разных фаз. Это условие наличия переходного сопротивления в месте повреждения, составляющего 8 Ом. Возмущения в высоковольтной сети через трансформатор передаются в сеть 0,4 кВ, где характер изменения напряжения определен схемой соединения обмоток трансформатора [24]. В фазе С в сети 0,4 кВ наблюдается небольшое повышение напряжения, что связано с отсутствием нейтрали заземления и высоким сопротивлением повреждениям.

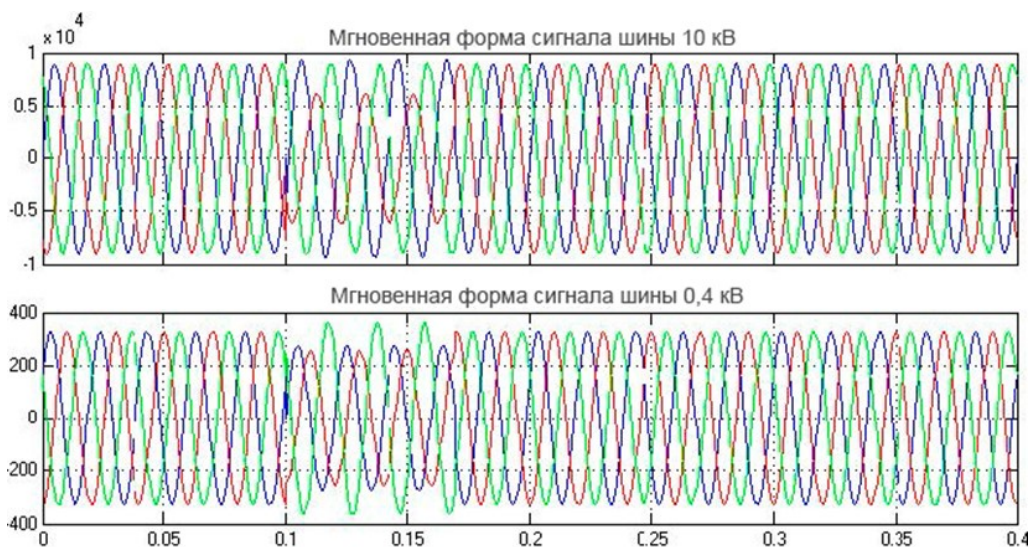


Рисунок 2 – Провалы и скачки напряжения, вызванные межлинейным замыканием на линии 10 кВ

Для количественной оценки качества электроэнергии в практических исследованиях используется представление изменений напряжения в соответствии с действующими измерениями, нормированными по номинальному напряжению. На рисунке 3 показаны временные независимые действующие измерения напряжения для рассматриваемого случая между фазным замыканием. Настоящее представление позволяет визуально оценить провал напряжения по каждой фазе. Незначительные колебания, наблюдаемые до и после основных возмущений, обуславливают изменения фазовых соотношений в аварийном режиме [25].

Созданная модель также обеспечивает возможность исследования многоступенчатых провалов напряжения.

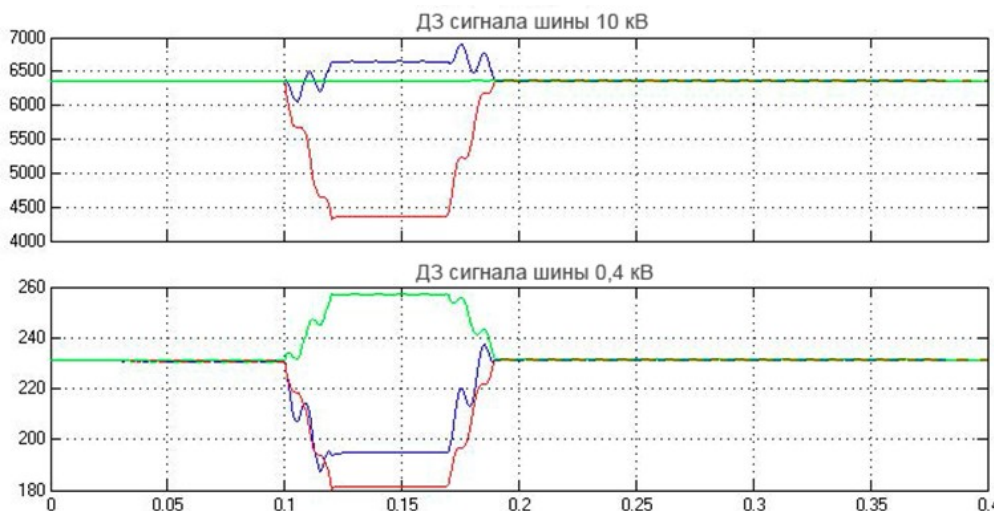


Рисунок 3 – Провисание и увеличение D3 сигнала

Многоступенчатые нарушения напряжения обычно приводят к приведению напряжения в различные устройства релейной защиты, что приводит к поэтапному определению напряжения и, соответственно, к ступенчатому определению напряжения до окончательного установления номинального режима [25]. Также подобные нарушения могут быть вызваны изменением параметров повреждения во времени.

В некоторых случаях многоступенчатые ошибки основаны на последовательностях изменений, происходящих в течение короткого интервала времени и регистрируемых как единое событие. На рисунке 4 представлены осциллограммы многоступенчатого провала напряжения, вызванного двухфазным замыканием на землю. Первый блок повреждения активен в интервале от 0,1 до 0,168 с с сопротивлением повреждения 1 Ом, второй блок имитирует изменение условий повреждения в интервале от 0,168 до 0,3 с с сопротивлением 0,1 Ом. Изменение параметров повреждения во времени приводит к характерному многоступенчатому профилю падения напряжения.

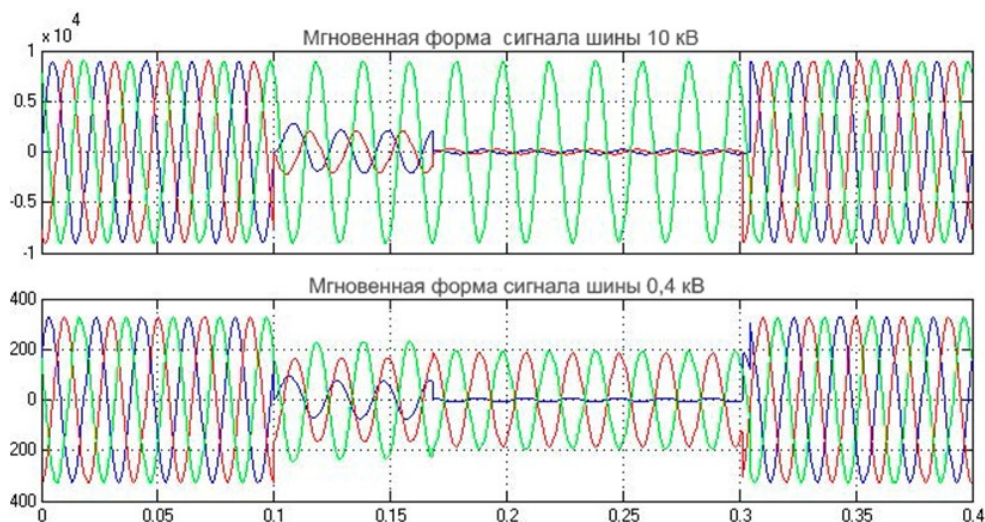


Рисунок 4 – Форма сигнала многоступенчатого снижения напряжения, вызванного замыканием на землю на линии 10 кВ

На рисунке 5 показаны действующие значения напряжения для случая многоступенчатого провала.

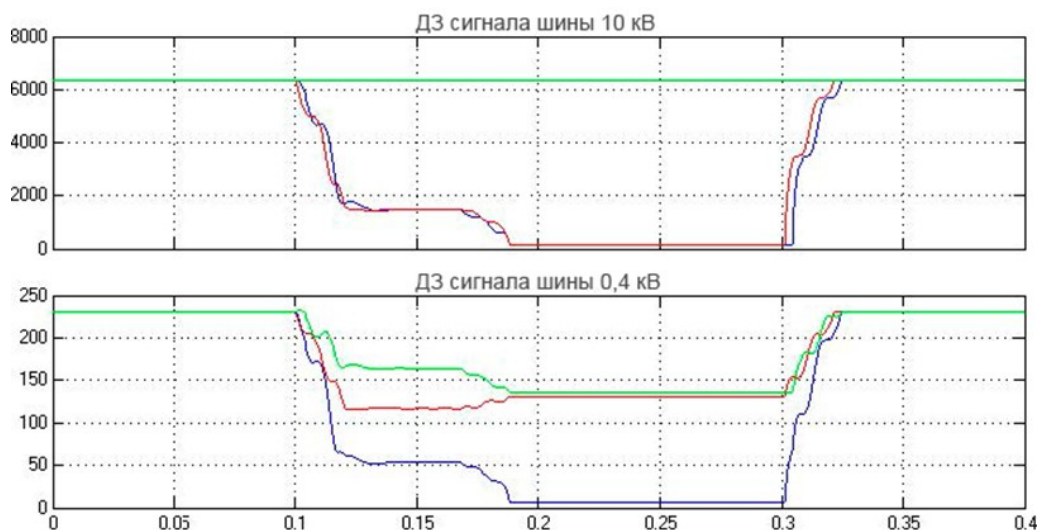


Рисунок 5 – Многоступенчатое падение напряжения D3 сигнала

### ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Создан цифровой двойник процесса работы асинхронного двигателя для исследования процессов, возникающих при включении мощных электродвигателей. Цифровой двойник (рис. 6) состоит из трехфазного источника питания (10 кВ, 30 МВА, 50 Гц), понижающего трансформатора (10 кВ / 0,4 кВ, 1 МВА), трехфазного коммутационного аппарата для управления пуском двигателя,

трехфазного асинхронного двигателя и активной нагрузки 10 кВт. Измерительные устройства для регистрации текущих измерений напряжения, размещенных на шинах, – 10 кВ и 0,4 кВ. Время рассмотрения установлено равным 0,4 с. Гармонический анализ сигналов выполняется с использованием методов, приведенных в работах [27–30].

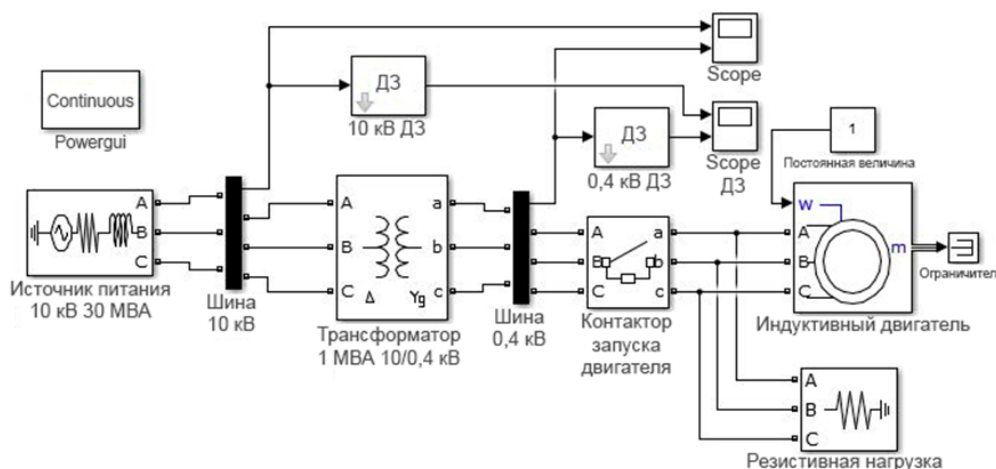


Рисунок 6 – Цифровой двойник пуска асинхронного двигателя

Осциллограммы напряжения при пуске двигателя мощностью 75 кВт в момент времени 0,1 с показаны на рисунке 7. Начальная скорость двигателя задается с помощью блока констант и составляет 1 рад/с. Провал напряжения в сети 0,4 кВ через трансформаторную связь в питающую сеть – 10 кВ.

Максимальное изменение напряжения наблюдается в сети 0,4 кВ, к которой непосредственно подключен двигатель. При минимальной передаче возмущения в сети более высокого напряжения его величина снижается, а на шинах падение напряжения 10 кВ становится практически незаметным.

Провал напряжения при пуске трехфазного асинхронного двигателя характеризуется симметричностью по фазам относительно и небольшой глубиной, обычно не более 15 % от номинального значения. Величина провала напряжения определяется номинальной мощностью двигателя.

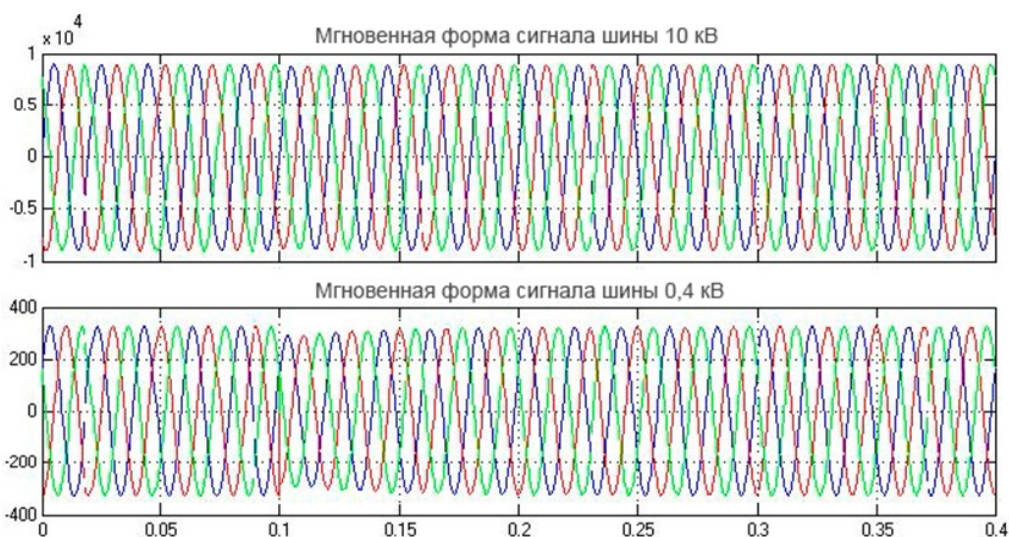


Рисунок 7 – Мгновенная форма сигнала падения напряжения, вызванного пуском асинхронного двигателя мощностью 75 кВт

Увеличение номинальной мощности асинхронного двигателя приводит к более серьезному провалу напряжения (рис. 8).

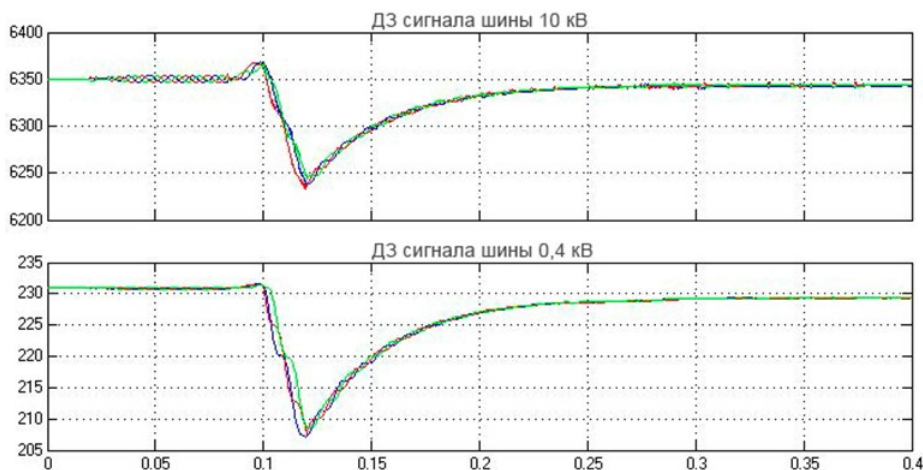


Рисунок 8 – Падение напряжения при пуске асинхронного двигателя мощностью 75 кВт

### ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПОДКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Цифровой двойник (рис. 9) моделирует падение напряжения при подключении трансформатора к сети. Этот эффект вызван намагничиванием системы. Цифровой двойник состоит из трехфазного источника питания (10 кВ, 30 МВА, 50 Гц), трехфазного выключателя напряжения (10 кВ / 0,4 кВ, 1 МВА), а также активной нагрузки 10 кВт и индуктивной нагрузки 100 ВАр. Измерительные устройства для регистрации действующих измерений напряжения, установленного на шинах, – 10 кВ. Для детального анализа гармонического состава сигналов используется блок Simulinksimout для сохранения данных и графический интерфейс Simulinkpowergui для выполнения БПФ-анализа.

Коммутационный аппарат настроен на включение в момент времени 0,06 с для имитации подключения трансформатора к сети. Общее время рассмотрения составляет 1 с. Анализ гармонического состава сигналов осуществляется с использованием методов, описанных в работах [18–21]. При данном типе нарушения качества электроэнергии обычно требуется более 1 с для полного восстановления номинального режима.

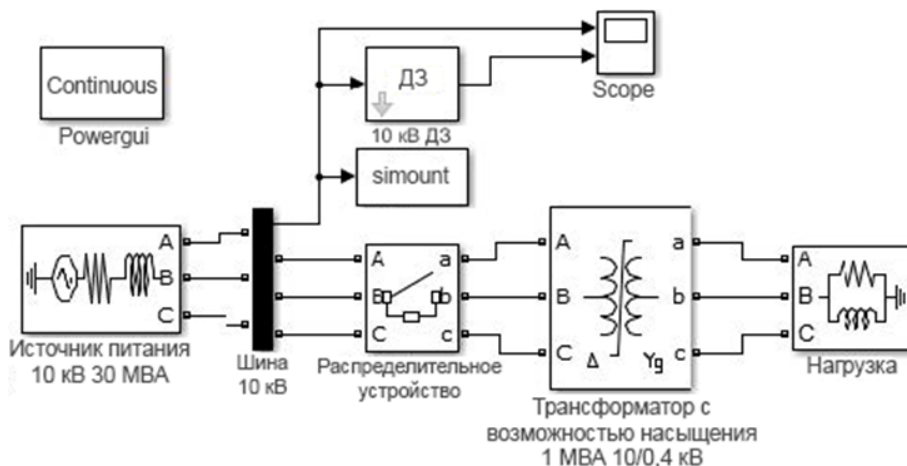


Рисунок 9 – Цифровой двойник подачи питания на трансформатор

На рисунке 10 показаны осциллограммы провала напряжения при подключении трансформатора к питающей сети. Характерной особенностью данного процесса является неравномерное изменение напряжения по фазам и постепенное восстановление до номинального уровня. Глубина падения напряжения зависит от мощности источника питания и подключаемого трансформатора. Увеличение трансформатора мощности приводит к еще большей ошибке.

Отличительными качествами провала напряжения при подключении трансформатора являются: несимметричность по фазам, относительно небольшая глубина (до 15 % от номинального значения) и наблюдается содержание четных гармоник, особенно второй. Анализ гармонического состава с помощью блока Simulinkpowergui с настройками: максимальная частота анализа – 2000 Гц, интервальный анализ – 10 циклов основной частоты.

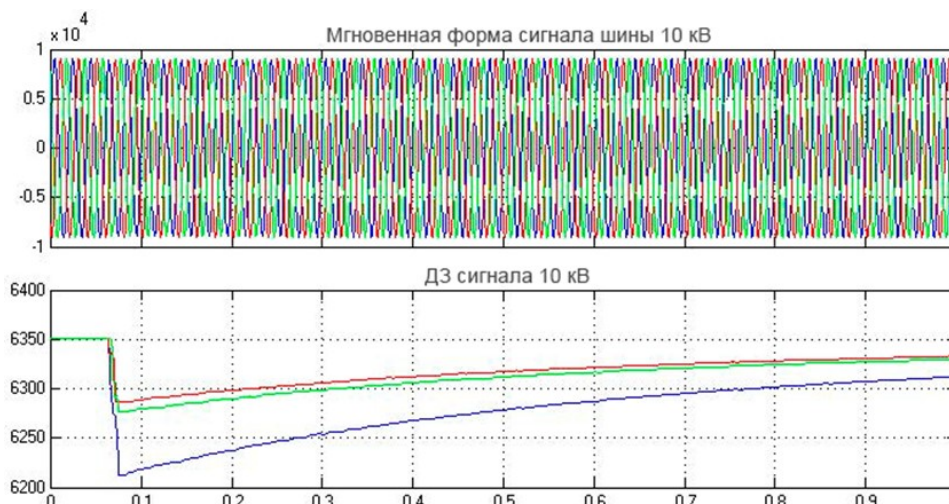


Рисунок 10 – Падение напряжения, вызванное включением трансформатора

Параметры оконного анализа выбраны в соответствии с требованиями стандартов IEC 61000-4-7:2009 [22] и ГОСТ 30804.4.7-2013 [23]. Возможности анализа позволяют довести гармонический состав до 40-й гармоники. Анализ выполняется в интервале от 0,2 до 0,4 с, что позволяет охватить весь переходный процесс. На рисунке 11 показаны результаты гармонического анализа для фазы А, демонстрирующие характерное для данного типа нарушение – повышенное содержание четных гармоник: 2-й, 6-й, 12-й, 18-й и 24-й.

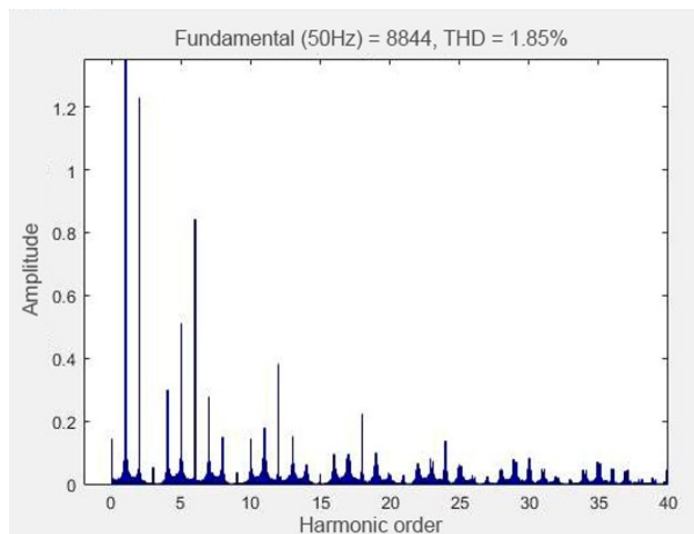


Рисунок 11 – Анализ гармоник, вызванных падением напряжения фазы А из-за включения трансформатора

### ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КОММУТАЦИИ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК

Цифровой двойник (рис. 12) предназначен для изучения переходных процессов, возникающих при подключении конденсаторных батарей в среднестатистической реактивной мощности [31, 32]. Двойник состоит из трехфазного источника питания (10 кВ, 30 МВА, 50 Гц), понижающего трансформатор (10 кВ/0,4 кВ, 1 МВА), активной нагрузки 100 кВт и индуктивной нагрузке 100 кВАр. Измерительные устройства для регистрации действующих измерений напряжения, установленных на шинах, – 10 кВ и 0,4 кВ.

Конденсаторные батареи подключаются к каждой шине через трехфазные коммутационные аппараты. Мощность конденсаторной батареи в сети 0,4 кВ составляет 40 кВАр, что обеспечивает коэффициент мощности до 0,857 при индуктивной нагрузке 100 кВАр. Конденсаторная батарея в сети 10 кВ имеет большую мощность – 100 кВАр.

Созданная модель позволяет совмещать переменные переходные процессы при подключении конденсаторных батарей как в сеть 10 кВ, так и в сеть 0,4 кВ. Время моделирования составляет 0,1 с. Анализ гармонического состава показателей выполняется с использованием методов, описанных в работах [27–30].

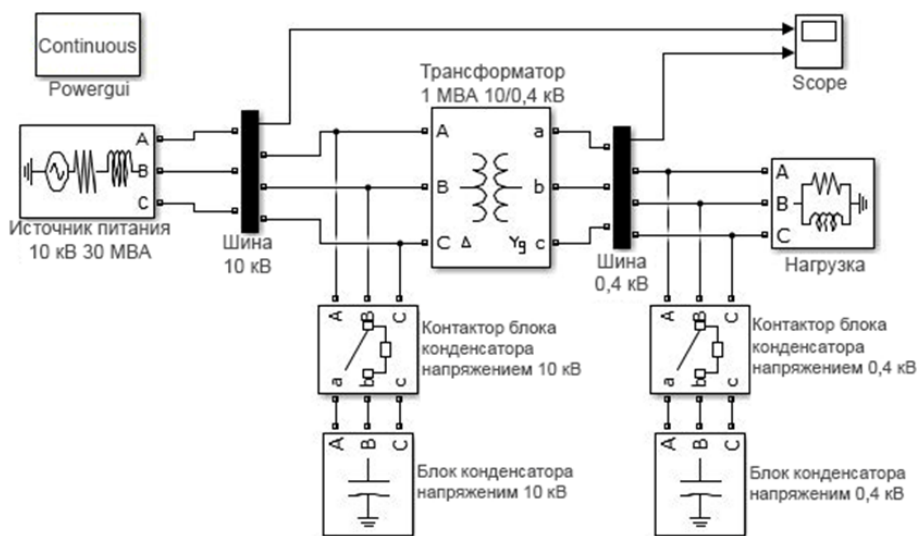


Рисунок 12 – Цифровой двойник включения блока конденсаторов

На рисунке 13 показаны результаты измерения при подключении конденсаторной батареи в сеть 0,4 кВ. Коммутация трехфазного выключателя приводит к улучшению переходных процессов на соответствующих шинах системы. Амплитуда переходных колебаний значительно снижается при повышении напряжения в сети более высокого напряжения благодаря высокой мощности источника питания.

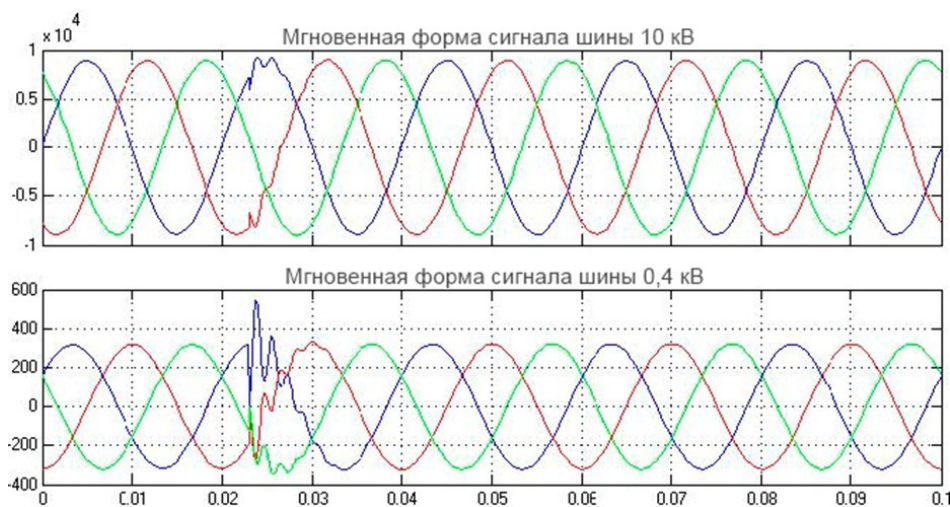


Рисунок 13 – Колебательный переходный процесс, вызванный включением конденсаторной батареи в фидерную линию напряжением 0,4 кВ

Частота изменений в переходном процессе определяется параметрами конденсаторной батареи. Скорость затухания переходного процесса зависит от величины активной нагрузки в системе. Увеличение активной нагрузки приводит к увеличению коэффициента затухания и более быстрому окончанию переходного процесса.

На рисунке 14 представлены результаты моделирования при подключении конденсаторной батареи в сеть 10 кВ при отключенной батарее в сеть 0,4 кВ. В данном случае величина переходных колебаний не смещается при передаче возмущения в сеть более низкого напряжения, поскольку сеть 0,4 кВ получает питание от мощного источника через линию 10 кВ. Также видно, что частота переходного процесса выше из-за большей емкости конденсаторной батареи на шинах 10 кВ.

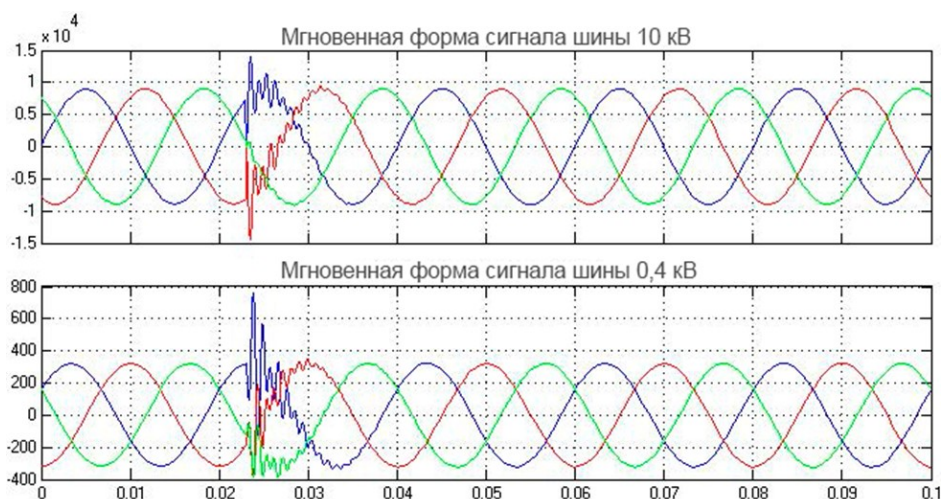


Рисунок 14 – Колебательный переходный процесс, вызванный включением конденсаторной батареи в фидерную линию напряжением 10 кВ

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе подход к имитационному моделированию посредством составления цифровых двойников предоставляет исследователям возможность гибкого конструирования моделей электроэнергетических систем для преобразования различных типов уровней качества электричества путем комбинирования конкретных блоков в среде моделирования. Это позволяет получить подробное представление о механизмах возникновения и распространения нарушений в электрической сети.

В данной работе представлены цифровые двойники для исследования основных типов качеств электроэнергии: провалов напряжения, вызванных аварийными режимами, пуском асинхронных двигателей, подключением трансформаторов, а также переменными переходными процессами при коммутации конденсаторных установок. Разработанные цифровые двойники могут служить для создания учебно-методических материалов и проведения научных исследований в области качества электроэнергии.

### Список источников

- McGranaghan, M. F. Economic Evaluation of Power Quality / M. F. McGranaghan, B. Roettger // IEEE Power Engineering Review. – 2003. – Vol. 22, № 2. – P. 8–12.
- Буре, И. Г. Влияние современного оборудования жилых и офисных комплексов на качество электроэнергии / И. Г. Буре, И. М. Хевсуриани, М. Н. Киселев, А. Ю. Козырьков // Энергетик. – 2017. – № 1. – С. 42–46.
- Львова, Е. В. Исследование цифровых методов измерения активной и реактивной мощности в силовых сетях / Е. В. Львова, А. А. Никифоров, М. А. Шаронов, М. Ф. Степанов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках, 2023. – № 4. – URL: mathmod.esrae.ru/44-186 (дата обращения: 21.01.2025).
- McGranaghan, M. F. Challenges and Trends in Analyses of Electric Power Quality Measurement Data / M. F. McGranaghan, S. Santoso // EURASIP J. on Advances in Signal Processing. – 2007. <https://doi.org/10.1155/2007/57985>.
- McEachern, A. A Free Simulator Program for Teaching Power Quality Concepts / A. McEachern // Proc. of the 9th Int. Conf. on Electrical Power Quality and Utilisation. – Barcelona, Spain, 2007. – P. 1–4. DOI 10.1109/EPQU.2007.4424112.
- Bam, L. Review: Power System Analysis Software Tools / L. Bam, W. Jewell // IEEE Power Engineering Society General Meeting. – San Francisco, USA, 2005. – Vol. 1. – P. 139–144. – DOI 10.1109/PES.2005.1489097.
- Hadi, S. Power System Analysis / S. Hadi. – 3rd ed. – PSA Publishing LLC, 2011. – 772 p.
- Ntombela, M. An Investigation into the Capabilities of MATLAB Power System Toolbox for Small Signal Stability Analysis in Power Systems / M. Ntombela, K. K. Kaberere, K. A. Folly, A. I. Petroianu // Power Engineering Society Inaugural Conf. and Exp. in Africa. – Durban, South Africa : IEEE, 2005. – P. 242–248. – DOI 10.1109/PE-SAFR. 2005.1611822.
- Schoder, K. PAT: A Power Analysis Toolbox for MATLAB/Simulink / K. Schoder, A. Hasanovic, A. Feliachi, A. Hasanovic // IEEE Trans. on Power Systems, 2003. – Vol. 18, № 1. – P. 42–47. – DOI 10.1109/TPWRS.2002.807117.
- Sybille, G. Digital Simulation of Power Systems and Power Electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset / G. Sybille, L. H. Hoang // Proc. of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – Singapore : IEEE, 2000. – Vol. 4. – P. 2973–2981. – DOI 10.1109/PESW.2000.847358.
- Sybille, G. Theory and Applications of Power System Blockset, A MATLAB/Simulink-Based Simulation Tool for Power Systems / G. Sybille, P. Brunelle, L. H. Hoang et al. // Proc. of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – Singapore : IEEE, 2000. – Vol. 1. – P. 774–779. – DOI 10.1109/PESW.2000.850165.
- Dessaint, L. A. A Power System Simulation Tool Based on Simulink / L. A. Dessaint, K. Al-Haddad, L. H. Hoang et al. // IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1999. – Vol. 46, № 6. – P. 1252–1254. – DOI 10.1109/41.808019.

13. Patne, N. R. Stochastic Estimation of Voltage Sag Due to Faults in the Power System by Using PSCAD/EMTDC Software as a Tool for Simulation / N. R. Patne, K. L. Thakre // *J. of Electrical Power Quality and Utilisation*. – 2007. – Vol. 13, № 2. – P. 59–63.
14. Filho, J. M. C. Validation of Voltage Sag Simulation Tools: ATP and Short Circuit Calculation Versus Field-Measurements / J. M. C. Filho, R. C. Leborgne, J. P. G. Abreu et al. // *IEEE Trans. on Power Delivery*. – 2008. – Vol. 23, № 3. – P. 1472–1480. – DOI 10.1109/TPWRD.2008.916752.
15. Milano, F. An Open Source Power System Analysis Toolbox / F. Milano // *IEEE Trans. on Power Systems*. – 2005. – Vol. 20, № 3. – P. 1199–1206. – DOI 10.1109/TPWRS.2005.851911.
16. Vanfretti, L. Application of the PSAT, an Open Source Software for Educational and Research Purposes / L. Vanfretti, F. Milano // *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. – Tampa, USA : IEEE, 2007. – P. 1–7. – DOI 10.1109/PES.2007.385952.
17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014.
18. Dolinina, O. Estimating Algorithm for Harmonics of Current and Voltage Signals When Measuring Reactive Power in Industrial Power Networks / O. Dolinina, O. Toropova, E. L'vova, N. Vagarina // *Studies in Systems, Decision and Control*. – Vol. 337. – Springer Nature Switzerland, 2020. – P. 250–271. – DOI 10.1007/978-3-030-65283-8\_21.
19. Artyukhov, I. I. A Method of Reactive Power Measurement in Industrial Alternative Current Mains Supplies / I. I. Artyukhov, M. A. Solomin, E. V. L'vova // *Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. – Saratov : IEEE, 2016. – P. 361–366. – DOI 10.1109/APEDE.2016.7879029.
20. Львова, Е. В. Оптимальное оценивание параметров сигналов в промышленных сетях переменного тока / Е. В. Львова, П. А. Шаронов, М. А. Шаронов // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2023. – № 9. – С. 32–38.
21. Львова, Е. В. Сравнение цифровых алгоритмов измерения активной мощности: обзор методов обработки дискретного сигнала / Е. В. Львова, А. А. Никифоров, О. М. Балабан, М. А. Шаронов // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2024. – № 1 (65). – С. 122–135.
22. IEC 61000-4-7:2009. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto.
23. ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний. Введ. 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014.
24. Bollen, M. H. J. Different Methods for Classification of Three-Phase Unbalanced Voltage Dips Due to Faults / M. H. J. Bollen, L. D. Zhang // *Electric Power Systems Research*. – 2003. – Vol. 66, № 1. – P. 59–69. – DOI [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(03\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(03)00072-5).
25. Djokic, S. Z. Advanced Voltage Sag Characterisation. Part 1: Phase Shift / S. Z. Djokic, J. V. Milanovic // *IEE Proc. on Generation Transmission and Distribution*, 2006. – Vol. 153, iss. 4. – P. 423–430. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20050350>.
26. Styvaktakis, E. Signatures of Voltage Dips: Transformer Saturation and Multistage Dips / E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2003. – Vol. 18, iss. 1. – P. 265–270. – DOI 10.1109/TPWRD.2002.804016.
27. Львов, А. А. Сравнение методов оценивания параметров квазигармонических сигналов / А. А. Львов, А. А. Серанова, Р. В. Ермаков, А. С. Мучкаев // *Радиотехника*. – 2019. – № 8 (12). – С. 88–95. – DOI 10.18127/j00338486-201908(12)-14.
28. Seranova, A. Comparison of Methods for Parameter Estimating of Superimposed Sinusoids / A. Seranova, R. Ermakov, A. Sytnik et al. // *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 337: Recent Research in Control Engineering and Decision Making. – Springer Nature Switzerland, 2020. – P. 140–151. – DOI 10.1007/978-3-030-65283-8\_12.
29. Moutchkaev, A. S. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Theory and Algorithm / A. S. Moutchkaev, S.-H. Kong, A. A. L'vov // *Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. – Saratov, Russia : IEEE, 2016. – P. 1–6. – DOI 10.1109/APEDE.2016.7879042.
30. Moutchkaev, A. S. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Analysis and Results / A. S. Moutchkaev, S.-H. Kong, A. A. L'vov // *Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. – Saratov, Russia : IEEE, 2016. – P. 1–6. – DOI 10.1109/APEDE.2016.7879043.
31. Bollen, M. H. J. Categorization and Analysis of Power System Transients // M. H. J. Bollen, E. Styvaktakis, I. Y. H. Gu // *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2005. – Vol. 20, iss. 3. – P. 2298–2306. – DOI 10.1109/TPWRD.2004.843386.
32. Bollen, M. H. J. On the Analysis of Voltage and Current Transients in Three-Phase Power Systems / M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu // *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2007. – Vol. 22, № 2. – P. 1194–1201. – DOI 10.1109/TPWRD.2007.893613.

#### References

1. McGranaghan, M., Roettger B. Economic Evaluation of Power Quality. *IEEE Power Engineering Review*, 2003, vol. 22, no. 2, pp. 8–12.
2. Bure, I. G., Khovsuryani, I. M., Kiselev, M. N., Kozyrkov, A. Yu. Impact of Modern Residential and Office Complex Equipment on Electricity Quality. *Energetik*, 2017, no. 1, pp. 42–46 (In Russ.).

3. Lvova, E. V., Nikiforov, A. A., Sharonov, M. A., Stepanov, M. F. Study of Digital Methods for Active and Reactive Power Measurement in Power Grids. *Mathematical Modeling, Computer and Physical Experiment in Natural Sciences*, 2023, no. 4. Available at: <http://mathmod.esrae.ru/44-186> (accessed 21.01.2025) (In Russ.).
4. McGranaghan, M. F., Santoso, S. Challenges and Trends in Analyzing Electric Power Quality Measurement Data. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007. DOI 10.1155/2007/57985.
5. McEachern, A. A Free Simulator Program for Teaching Power Quality Concepts. *Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. Barcelona, Spain, 2007, pp. 1–4. DOI 10.1109/EPQU.2007.4424112.
6. Bam, L., Jewell, W. Review: Power System Analysis Software Tools. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. San Francisco, USA, 2005, vol. 1, pp. 139–144. DOI 10.1109/PES.2005.1489097.
7. Hadi, S. *Power System Analysis*. 3rd ed. PSA Publishing LLC, 2011. 772 p.
8. Ntombela, M., Kaberere, K. K., Folly, K. A., Petroianu, A. I. An Investigation into the Capabilities of MATLAB Power System Toolbox for Small Signal Stability Analysis in Power Systems. *Power Engineering Society Inaugural Conference and Exhibition in Africa*. Durban, South Africa: IEEE, 2005, pp. 242–248. DOI 10.1109/PESAFR.2005.1611822.
9. Schoder, K., Hasanovic, A., Feliachi, A., Hasanovic, A. PAT: A Power Analysis Toolbox for MATLAB/Simulink. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, vol. 18, no. 1, pp. 42–47. DOI 10.1109/TPWRS.2002.807117.
10. Sybille, G., Hoang L. H. Digital Simulation of Power Systems and Power Electronics Using the MATLAB/Simulink Power System Blocks. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. Singapore, IEEE, 2000, vol. 4, pp. 2973–2981. DOI 10.1109/PESW.2000.847358.
11. Sybille, G., Brunelle, P., Hoang, L. H. et al. Theory and Applications of Power System Blockset, A MATLAB/Simulink-Based Simulation Tool for Power Systems. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. Singapore, IEEE, 2000, vol. 1, pp. 774–779. DOI 10.1109/PESW.2000.850165.
12. Dessaint, L. A., Al-Haddad, K., Hoang, L. H. et al. A Power System Simulation Tool Based on Simulink. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, vol. 46, no. 6, pp. 1252–1254. DOI: 10.1109/41.808019.
13. Patne, N. R., Thakre, K. L. Stochastic Estimation of Voltage Sag Due to Faults in the Power System by Using PSCAD/EMTDC Software as a Tool for Simulation. *Journal of Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, vol. 13, no. 2, pp. 59–63.
14. Filho, J. M. C., Leborgne, R. C., Abreu, J. P. G. et al. Validation of Voltage Sag Simulation Tools: ATP and Short Circuit Calculation Versus Field Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 3, pp. 1472–1480. DOI 10.1109/TPWRD.2008.916752.
15. Milano, F. An Open Source Power System Analysis Toolbox. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, vol. 20, no. 3, pp. 1199–1206. DOI 10.1109/TPWRS.2005.851911.
16. Vanfretti, L., Milano, F. Application of the PSAT, an Open Source Software for Educational and Research Purposes. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Tampa, USA, IEEE, 2007, pp. 1–7. DOI 10.1109/PES.2007.385952.
17. GOST 32144-2013. *Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Standards for Electric Power Quality in General-Purpose Power Supply Systems. Effective from July 1, 2014*. Moscow, Standartinform Publ., 2014 (In Russ.).
18. Dolinina, O., Toropova, O., L'vova, E., Vagarina, N. Estimating Algorithm for Harmonics of Current and Voltage Signals When Measuring Reactive Power in Industrial Power Networks. *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer Nature Switzerland, 2020, vol. 337, pp. 250–271. DOI 10.1007/978-3-030-65283-8\_21.
19. Artyukhov, I. I., Solomin, M. A., L'vova, E. V. A Method of Reactive Power Measurement in Industrial AC Mains Supplies. *Proceedings of the 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, IEEE, 2016, pp. 361–366. DOI 10.1109/APEDE.2016.7879029.
20. Lvova, E. V., Sharonov, P. A., Sharonov, M. A. Optimal Parameter Estimation of Signals in Industrial AC Networks. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2023, no. 9, pp. 32–38 (In Russ.).
21. Lvova, E. V., Nikiforov, A. A., Balaban, O. M., Sharonov, M. A. Comparison of Digital Algorithms for Active Power Measurement: Overview of Discrete Signal Processing Methods. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2024, no. 1 (65), pp. 122–135 (In Russ.).
22. IEC 61000-4-7:2009. *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto*.
23. GOST 30804.4.7-2013. *Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Resistance to Voltage Dips, Short Interruptions and Changes in Power Supply Voltage. Requirements and Test Methods. Effective from July 1, 2014*. Moscow, Standardinform Publ., 2014 (In Russ.).
24. Bollen, M. H. J., Zhang, L. D. Different Methods for Classification of Three-Phase Unbalanced Voltage Dips Due to Faults. *Electric Power Systems Research*, 2003, vol. 66, no. 1, pp. 59–69. DOI 10.1016/S0378-7796(03)00072-5.
25. Djokic, S. Z., Milanovic, J. V. Advanced Voltage Sag Characterisation. Part 1: Phase Shift. *IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution*, 2006, vol. 153, issue 4, pp. 423–430. DOI 10.1049/ip-gtd:20050350.
26. Styvaktakis, E., Bollen, M. H. J. Signatures of Voltage Dips: Transformer Saturation and Multistage Dips. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, vol. 18, issue 1, pp. 265–270. DOI 10.1109/TPWRD.2002.804016.
27. Lvov, A. A., Seranova, A. A., Ermakov, R. V., Muchkaev, A. S. Comparison of Quasi-Harmonic Signal Parameter Estimation Methods. *Radio Engineering*, 2019, no. 8 (12), pp. 88–95. DOI 10.18127/j00338486-201908(12)-14 (In Russ.).

28. Seranova, A., Ermakov, R., Sytnik, A. et al. Comparison of Methods for Parameter Estimating of Superimposed Sinusoids. *Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 337: Recent Research in Control Engineering and Decision Making*. Springer Nature Switzerland, 2020, pp. 140–151. DOI 10.1007/978-3-030-65283-8\_12.

29. Moutchkaev, A. S., Kong, S.-H., L'vov, A. A. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Theory and Algorithm. *Proceedings of the 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia, IEEE, 2016, pp. 1–6. DOI 10.1109/APEDE.2016.7879042.

30. Moutchkaev, A. S., Kong, S.-H., L'vov, A. A. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Analysis and Results. *Proceedings of the 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Saratov, Russia, IEEE, 2016, pp. 1–6. DOI 10.1109/APEDE.2016.7879043.

31. Bollen, M. H. J., Styvaktakis, E., Gu, I. Y. H. Categorization and Analysis of Power System Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, issue 3, pp. 2298–2306. DOI 10.1109/TPWRD.2004.843386.

32. Bollen, M. H. J., Gu, I. Y. H. On the Analysis of Voltage and Current Transients in Three-Phase Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 1194–1201. DOI 10.1109/TPWRD.2007.893613.

Статья поступила в редакцию 31.07.2025; одобрена после рецензирования 08.09.2025; принята к публикации 26.01.2026.

The article was submitted 31.07.2025; approved after reviewing 08.09.2025; accepted for publication 26.01.2026.

УДК 004.056

**УЯЗВИМОСТЬ СИММЕТРИИ ДВУХ ПРОКОЛОВ ЭНТРОПИИ  
НЕЙРОСЕТЕВОЙ БИОМЕТРИИ, ПОСТРОЕННОЙ НА БИНАРНЫХ НЕЙРОНАХ  
ИЛИ НЕЙРОНАХ С МНОГОУРОВНЕВЫМИ КВАНТОВАТЕЛЯМИ**

*Иванов Александр Иванович*, Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Российская Федерация, 440000, г. Пенза, ул. Советская, 1,  
доктор технических наук, профессор, научный консультант, ORCID 0000-0002-3854-2660, e-mail: bio.ivan.penza@mail.ru

*Серикова Юлия Игоревна*, Научно-производственное предприятие «Рубин», Российская Федерация, 440000, г. Пенза, ул. Байдукова, 2,

кандидат технических наук, инженер-программист, ORCID: 0000-0002-4959-321X, e-mail: julia-ska@yandex.ru

*Иванов Алексей Петрович*, Пензенский государственный университет, Российская Федерация, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технических средств информационной безопасности, ORCID: 0000-0003-4075-2138, e-mail: ap\_ivanov@pnzgu.ru

В работе исследуется уязвимость нейросетевого доверенного интеллекта приложений биометрической аутентификации. Описана уязвимость сетей из бинарных нейронов, обученных автоматически алгоритмом ГОСТ Р 52633.5, построенная на наличии у выходных кодовых состояний таких сетей, явно выраженных двух проколов энтропии для кода аутентификации «Свой» и его инверсии. Дан основной признак такого типа уязвимости и показано, что часть нейронов с многоуровневыми квантователями, имеющими четное число выходных состояний, наследуют уязвимость простейших бинарных нейронов. Сделан вывод о том, что одним из направлений защиты от подобных уязвимостей является переход к использованию искусственных нейронов с троичными выходными квантователями в случае использования малопотребляющих доверенных контроллеров SIM-карт и RFID-карт.

**Ключевые слова:** бинарные нейроны, троичные нейроны, энтропия Шеннона, энтропия Хэмминга, корреляционная энтропия, симметрия энтропии

**THE VULNERABILITY OF THE SYMMETRY OF TWO ENTROPY PUNCTURES  
OF NEURAL NETWORK BIOMETRICS BUILT ON BINARY NEURONS  
OR NEURONS WITH MULTILEVEL QUANTIZERS**

*Ivanov Aleksandr I.*, Penza Scientific Research Electrotechnical Institute, 9 Sovetskaya St., Penza, 440000, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, Scientific Adviser, ORCID 0000-0002-3854-2660, e-mail: bio.ivan.penza@mail.ru

*Serikova Yuliya I.*, Research and Production Enterprise «Rubin», 2 Baydukova St., Penza, 440000, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), software engineer, ORCID: 0000-0002-4959-321X, e-mail: julia-ska@yandex.ru

*Ivanov Aleksey P.*, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440000, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Sub-department of Technical Means of Information Security, ORCID: 0000-0003-4075-2138, e-mail: ap\_ivanov@pnzgu.ru

The paper examines the vulnerability of the trusted neural network intelligence of biometric authentication applications. The vulnerability of networks of binary neurons trained automatically by the GOST R 52633.5 algorithm is described, based on the presence of two pronounced entropy punctures in the output code states of such networks for the "Own" authentication code and its inversion. The main feature of this type of vulnerability is given and it is shown that some of the neurons with multilevel quantizers having an even number of output states inherit the vulnerability of the simplest binary neurons. It is concluded that one of the areas of protection against such vulnerabilities is the transition to the use of artificial neurons with ternary output quantizers in the case of low-consumption trusted SIM card controllers and RFID cards.

**Keywords:** binary neurons, ternary neurons, Shannon entropy, Hamming entropy, correlation entropy, entropy symmetry

### ВВЕДЕНИЕ

В конце прошлого века передовые страны начали активно заниматься биометрической идентификацией и аутентификацией. Идентификация рассматривалась в контексте биометрических паспортов с вклеенной RFID микросхемой [1], в которой записаны биометрические шаблоны владельца международного паспорта. Для того чтобы международные паспорта разных стран были универсальны, в 2002 году был создан международный технический комитет ISO/IEC JTC-1/sc37 (Биометрия). За время своего существования им было создано порядка 200 международных стандартов по биометрии. Для России эти международные стандарты гармонизованы национальным техническим комитетом ТК 098.

Средства биометрической идентификации должны быть защищены аппаратно, их считыватели должны располагаться в контролируемой зоне аэропортов и иных пунктов пересечения границ различных стран.

Для того чтобы создавать средства биометрической аутентификации, необходимо уметь преобразовывать уникальность «нечеткого» биометрического образа человека в «четкий» криптографический ключ некоторого протокола криптографической аутентификации. Зарубежные исследователи пытались для решения этой задачи использовать так называемые «нечеткие экстракторы» [2–5].

Структура «нечетких экстракторов» основана на контроле статистик «сырых» биометрических данных [6]. Каждый из контролируемых биометрических параметров сравнивается со средним значением всех биометрических параметров. Если отсчет  $i$ -го биопараметра больше среднего, то  $i$ -му разряду «сырого» ключа присваивается значение «1». Если параметр меньше среднего, то  $i$ -му разряду «сырого» ключа присваивается значение «0». При таком подходе мы получаем ситуацию, когда примерно 30 % разрядов «сырого» кода оказываются ошибочными.

«Нечеткие экстракторы» пытаются обнаружить и устранить ошибки в разрядах «сырого» кода через использование классических полиномиальных кодов с обнаружением и исправлением ошибок [7], имеющих высокую избыточность. Структурно технология выглядит привлекательно, однако она оказалась не работоспособна для большинства биометрических технологий. Она «хорошо» работает примерно для половины самых эффективных биометрических технологий и «плохо» работает для второй половины менее стабильных биометрических технологий.

Корень проблемы состоит в том, что классические полиномиальные избыточные коды [7] легко обнаруживают и правят до 5 % ошибок, при этом их избыточность не велика. По мере роста числа ошибок падает корректирующая способность кодов и одновременно растет их кодовая избыточность. Одной из лучших биометрических технологий является анализ рисунка радужной оболочки глаза. По этой технологии Даугман [3] контролирует 2048 биометрических параметров. После обнаружения и исправления ошибок его «нечеткий экстрактор» дает криптографический ключ длиной 114 бит. То есть в «нечетком экстракторе» Даугмана используется полиномиальный код с  $2048/114 \approx 21$  кратной кодовой избыточностью. Тем не менее такая длина кода аутентификации вполне приемлема для биометрии. Катастрофа наступает только для менее стабильных биометрических данных: рисунки отпечатков пальцев, голосовые парольные фразы, геометрия руки, геометрия особых точек на лице человека. К сожалению, для этих менее стабильных технологий длина ключа может оказаться менее 10 бит, что недостаточно для безопасной биометрической аутентификации.

Обойти проблему нестабильных биометрических данных удастся, если отказаться от бинарного квантования «сырых» данных. Эта технология и соответствующая ветвь биометрических стандартов развивается в России [8–10]. Принципиальным отличием нейросетевых технологий обогащения «сырых» данных является то, что уже не один «сырой» параметр дает бит ключа, а несколько «сырых» биопараметров обогащаются накапливающей частью одного нейрона, и только после этого квантуется выходной сигнал накопителя (обогапителя). Если «сырые» данные «плохие», то их потребуется больше (искусственный нейрон имеет больше входов). Если «сырые» данные «хорошие», то число входов у нейрона должно быть меньше. Варьируя при обучении числом входов у каждого искусственного нейрона всегда можно добиться высокой достоверности принимаемого им решения «0» или «1». При автоматическом обучении нейросети из 256 нейронов на 20 примерах рукописного образа «Свой» стандартизованным алгоритмом [10] удастся добиться получение на выходе нейросети 256-битного криптографического ключа со всеми верными битами при доверительной вероятности 0,95 [11] в среде моделирования «БиоНейроАвтограф-2». По сути, доверительной вероятности 0,95 при длине ключа 256 бит уже достаточно для решения множества задач биометрико-нейросетевой идентификации/аутентификации. В этом контексте дополнительное обнаружение и исправление ошибок может не потребоваться. Тем не менее обнаружение и исправление редких ошибок может быть выполнено специальными кодами с очень низкой избыточностью [12].

### **ОСНОВНАЯ УЯЗВИМОСТЬ БИНАРНЫХ СЕТЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ**

Основное преимущество перехода от квантования одиночных «сырых» данных в «нечетких экстракторах» к бинарному квантованию обогащенных накопителями нейронов состоит в том, что длина ключа аутентификации может быть любой. Длина ключа зависит только от числа нейронов в сети, однако выходные биты нейросетевого ключа оказываются зависимыми (коррелированными). Это порождает угрозу по организации атак на извлечение знаний из архитектуры и параметров обученной нейросети. Опираясь на статистическое исследование корреляционных связей между разрядами [13–17] кодов-откликов нейросети, реальным является значительное сокращение пространства переборных их возможных состояний.

Таким образом, для извлечения знаний из сетей бинарных искусственных нейронов в начале этого века создано несколько эффективных атак, которые эксплуатируют симметрию энтропии выходных кодов-откликов бинарных нейронов. Эффекты, используемые атаками, отображены на рисунке 1.

Обученная алгоритмом ГОСТ Р 52633.5 [10] бинарная нейросеть, при подаче на ее входы примеров образа «Чужой», будет откликаться случайными кодами длиной 256 бит. Архитектура нейросети предполагает случайный выбор входных связей каждого из 256 искусственных нейронов. При этом входные связи у разных нейронов могут повторяться. Если взять любую пару биометрических параметров и рассмотреть отклики обученной нейросети, то все нейроны с одинаковыми входными связями будут давать сечения, пример которого отображен в левой части рисунка 1. При этом все решающие правила всех 13-ти нейронов с общими входными связями будут давать линии, проходящие через центр гиперсферы – «Все Чужие». Эллипс распределения данных «Свой» не пересекается ни одной из разделяющих линий. Только в этом случае примеры образа «Свой» будут давать стабильный выходной код на выходе обученной нейросети.

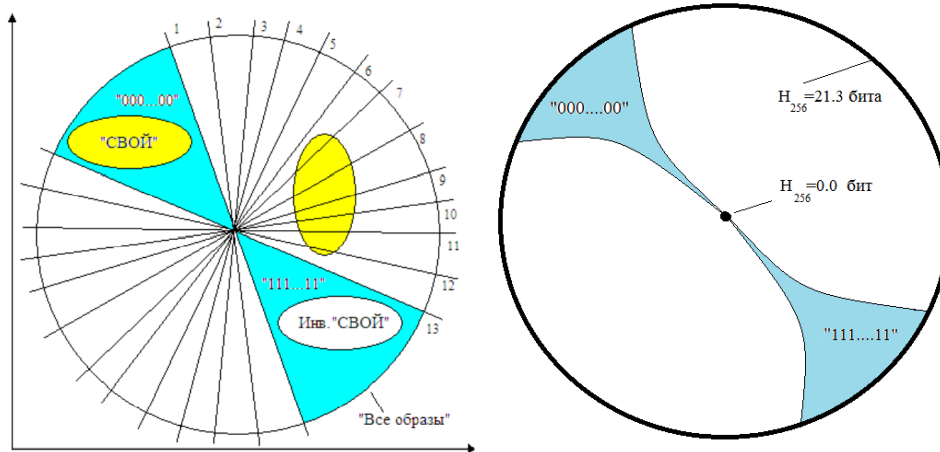


Рисунок 1 – Дефект бинарных нейросетей, порождающий два прокола гиперсферы энтропии 21,3 бита для кодов, близких к коду «Свой» «000...00», и для кодов, близких к инверсному образу «Свой»

При этом всегда появляется инверсный образ «Свой», имеющий входные биометрические параметры с другим знаком, и инверсный выходной код-отклик нейросети. Оба образа «Свой» и его инверсия дают одинаково стабильные отклики с нулевым значением энтропии. Само значение энтропии образов «Чужой» оценивается на малых выборках по величине  $-\log_2(P_2)$ , где  $P_2$  – это вероятность ошибок второго рода (ложного принятия «Чужого» за «Своего»), вычисленная по ГОСТ Р 52633.3 [9]. Энтропия, вычисленная через преобразование  $-\log_2(P_2)$ , всегда меньше 256 бит и составляет, например, 21,3 бита, как это отображено в правой части рисунка 1.

Принципиально важным является то, что описанная выше ситуация не является гипотетической, она легко воспроизводима численными методами. Образ «Свой» и его инверсия присутствуют у всех бинарных нейросетей с линейным накоплением данных входным взвешенным суммированием. Все эллипсы «Свой» не имеют пересечения линиями (гиперплоскостями) решающих правил и потому дают стабильный выходной код. Все образа «Чужой» напротив многократно пересекаются гиперплоскостями решающих правил, и потому коды-отклики на них нестабильны, их энтропия велика – 21,3 бита.

### АТАКА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ ИЗ БИНАРНЫХ СЕТЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ

Следует отметить, что факт наличия двух проколов в 256-мерной гиперсфере энтропии (правая часть рисунка 1) в прошлом веке никто не использовал для реализации атак на подбор длинного криптографического ключа. Это было связано с тем, что энтропию было принято оценивать по Шеннону, а эта задача имеет экспоненциальную вычислительную сложность:

$$H("x_1, x_2, \dots, x_{256}") = -\sum_{i=1}^N P_i \cdot \log(P_i), \quad (1)$$

где  $N \approx 2^{256}$  из-за того, что вероятность появления каждого  $i$ -го кодового состояния  $P_i$  мала. Чем выше число переменных в (1), тем больше нужна выборка для корректной оценки доверительной вероятности.

Чем длиннее ключ, тем сложнее выполнить оценку энтропии. Положение кардинально меняется, если по рекомендации ГОСТ Р 52633.3 [9] отказаться от оценок вероятности каждого из возможных кодовых состояний. Стандарт рекомендует упростить вычисления переходом в пространство расстояний Хэмминга:

$$h = \sum_{i=1}^{256} ("x_i") \oplus ("c_i"), \quad (2)$$

где  $\langle x_i \rangle$  –  $i$ -й разряд анализируемого кода «Чужой»;

$\langle c_i \rangle$  –  $i$ -й разряд заданного при обучении кода «Свой».

Переход в пространство расстояний Хэмминга (2) позволяет снизить число возможных состояний от величины  $N \approx 2^{256}$  до всего 257 амплитуд вероятности появления спектральных линий  $\Psi(h) = \{\Psi(0), \Psi(1), \dots, \Psi(256)\}$ . Более того, суммирование 256 случайных состояний делает описывающую функцию распределения амплитуд вероятности близким к нормальному. Пользуясь этим, всегда можно найти математическое ожидание наблюдаемых амплитуд спектральных линий  $E(\Psi(h))$  и их стандартное отклонение  $\sigma(\Psi(h))$ . Зная эти два статистических момента, можно спрогнозировать амплитуду вероятности появления нулевого расстояния Хэмминга  $\Psi(0)$ , точно совпадающую с вероятностью ошибок второго рода –  $P_2$ .

Все вышеперечисленные аспекты теоретически позволяют извлекать знания из бинарной нейросети примерно за 20 минут на обычной вычислительной машине [18–20]. Для решения задачи достаточно иметь небольшую базу из примерно 10 000 примеров биометрических образов «Чужой». На рисунке 2 приведен пример распределения значений энтропий для первоначальной выборки базы примеров рукописных паролей «Чужой».

Из рисунка 2 видно, что среднее значение энтропии Шеннона тестируемой нейросети составляет порядка 11 бит. В анализируемой выборке значение энтропии меняется в пределах от 4 до 20 бит. При этом минимальные значения энтропии, близкие к 4 битам, имеют между их кодами расстояние Хэмминга в 256 бит. На рисунке 2 они выделены окружностями. Коды «Чужой-0» на 4 бита отличаются от кода «Свой», заданного при обучении. Вторая окружность «Чужой-10000» покрывает вторую группу достаточно стабильных кодов, близких к коду-отклику инверсии образа «Свой». Образы «Чужой-5000» объединяют окрестность кодовых состояний с наибольшим значением энтропии и отличаются от кодов двух окружностей (4 бита) расстоянием Хэмминга в 128 бит.

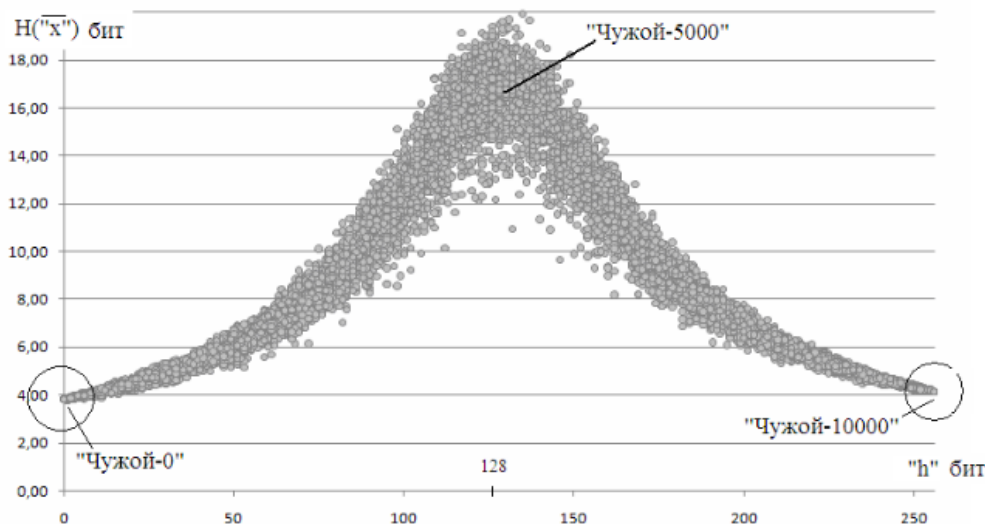


Рисунок 2 – Пример распределения значений энтропии базы реальных данных при извлечении знаний из обученной нейросети

Из рисунка 2 видно, что база в 10 000 примеров образов «Чужой» позволяет выбрать две группы примеров с наиболее малым значением в 4 бита их энтропии. Для того чтобы получить примеры с меньшим значением энтропии в 0,4 бита, необходимо сотни обнаруженных примеров с минимальной энтропией размножить до выборки первоначального объема. Размножение данных выполняется по ГОСТ Р 52633.2 [20]. Описанная выше атака обычно требует селекции и размножения данных в нескольких поколениях.

### ПРИЗНАК ВСЕХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ИМЕЮЩИХ СИММЕТРИЮ ДВУХ ПРОКОЛОВ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ОБРАЗОВ «СВОЙ» И ИХ ИНВЕРСИИ

Описанная выше уязвимость приводит к атакам на симметрию энтропийных проколов. К сожалению, такая уязвимость характерна не только для сетей бинарных нейронов. Если будут построены сети с четверичными квантователями у нейронов, имеющими четыре выходных состояния {«00», «01», «10», «11»}, то для них энтропия Шеннона должна удвоиться, однако проблема симметричных проколов может сохраниться.

Та же самая проблема может возникнуть и в случае применения 8-миричных выходных квантователей с 8-миричными кодами выходных состояний  $\{\langle 000 \rangle, \langle 001 \rangle, \dots, \langle 110 \rangle, \langle 111 \rangle\}$ . Формально можно продолжать наращивать число бит, порождаемых одним искусственным нейроном [21, 22]. При этом часть нейросетевых архитектур с многоуровневыми квантователями будет наследовать дефект двух симметричных проколов многомерной энтропийной гиперсферы. В свою очередь, наличие этого дефекта может создавать иллюзию роста уровня защищенности нейросетевой аутентификации, тогда как его нет на практике [18, 19].

В связи с вышеизложенным нужен тест, гарантированно выявляющий дефекты нейросетевых архитектур. Практика показала, что такое тестирование легко выполнимо вероятностно-корреляционным анализом выходных кодов нейросети. Для этого необходимо построить корреляционную матрицу  $256 \times 255$ , исключив из нее единичную диагональ:

$$\begin{bmatrix} r_{1,2} & r_{1,3} & r_{1,4} & \dots & r_{1,255} & r_{1,256} \\ r_{2,1} & r_{2,3} & r_{2,4} & \dots & r_{2,255} & r_{2,256} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{256,1} & r_{256,2} & r_{256,3} & \dots & r_{256,254} & r_{256,255} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В случае, если на входы бинарной нейросети подавать случайные данные, полученные от программного генератора псевдослучайных чисел с нормальным законом распределения, ее 256-битные отклики должны быть слабо коррелированы. То есть коэффициенты корреляции должны изменяться в пределах от  $-0,183$  до  $+0,183$ . Эта ситуация должна соответствовать хаосу групповой неопределенности Гейзенберга [23]. На рисунке 3 эта ситуация отображена в форме распределения хаоса («белого» шума), находящегося в центре со стандартным отклонением  $\sigma(r) \approx 0,061$  и математическим ожиданием  $E(r) \approx 0,00$ .

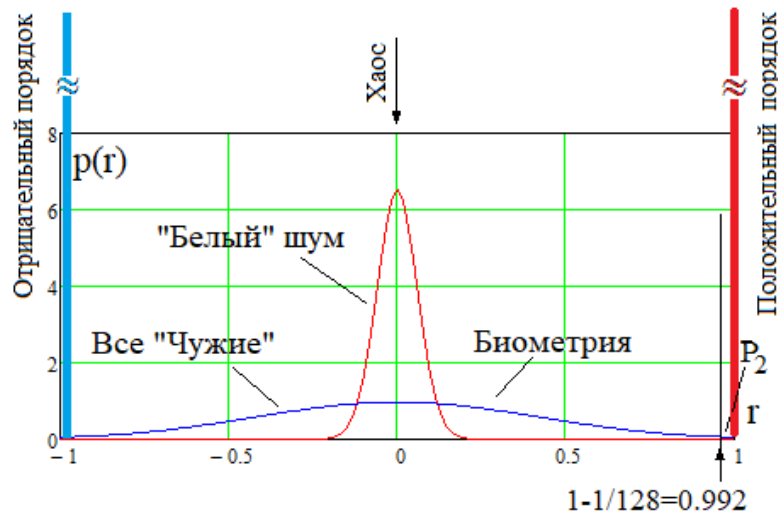


Рисунок 3 – Варианты распределений плотностей вероятности откликов нейросетевого бинарного преобразователя биометрии в код ключа длиной 256 бит

Абсолютный положительный порядок [24] на рисунке 3 отображен как плотность распределения в точке  $r \rightarrow 1,0$  в виде дельта-функции (положительный прокол гиперсферы энтропии правой части рисунка 1 вблизи к значению кода «Свой»). Также на рисунке 3 появляется второе возможное положение абсолютного отрицательного порядка, соответствующее второй предельной точке корреляции  $r \rightarrow -1,0$ , когда выходные коды-отклики нейросети близки инверсии кода аутентификации «Свой».

Узкое распределение данных о коэффициентах корреляции, близкое к полному хаосу «белого» шума, не может существовать для данных реальной биометрии. Реальные данные нейросетевой биометрии для большого числа примеров образов все «Чужие» имеют стандартное отклонение много больше минимального значения  $\sigma(r) \approx 0,061$ .

Критерием присутствия у нейросетевой конструкции дефекта двух проколов многомерной энтропии Шеннона является многократный рост стандартного отклонения корреляционных связей для примеров биометрических образов все «Чужие» по сравнению со стандартным отклонением «белого» шума  $\sigma(r) \approx 0,061$ .

### ЗАЩИТА ОТ АТАК ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ ИЗ НЕЙРОСЕТЕЙ НЕКРИПТОГРАФИЧЕСКИМ НИЗКОУРОВНЕВЫМ ХЭШИРОВАНИЕМ

По сути, «белый» шум с предельно низким значением стандартного отклонения  $\sigma(r) \approx 0,061$  возникает только в случае независимого подбрасывания единственной симметричной монеты 256 раз и хорошо описывается биномиальным законом распределения Бернулли. Если же мы будем подбрасывать все 256 монет горстью, то даже состояния симметричных монет уже нельзя рассматривать как независимые [25]. Появляются корреляционные связи между состояниями монет, устранение которых вновь возвращает хаос «белого» шума.

Очевидно, что для устранения корреляционных связей в данных может быть использовано криптографическое хэширование. К сожалению, криптографическое хэширование данных имеет достаточно сложную программную реализацию объемом в несколько сотен строк кода. Для экономии ресурсов малопотребляющих доверенных контроллеров SIM-карт и RFID-карт целесообразно отказаться от использования криптографического хэширования. При программной эмуляции нейронных сетей эффективным оказывается некриптографическое хэширование данных. Оно может быть выполнено через использование нескольких различающихся квантователей у нейронов одной сети [22]. Примеры вариантов четверичных квантователей для четверичных нейронов приведены на рисунке 4.

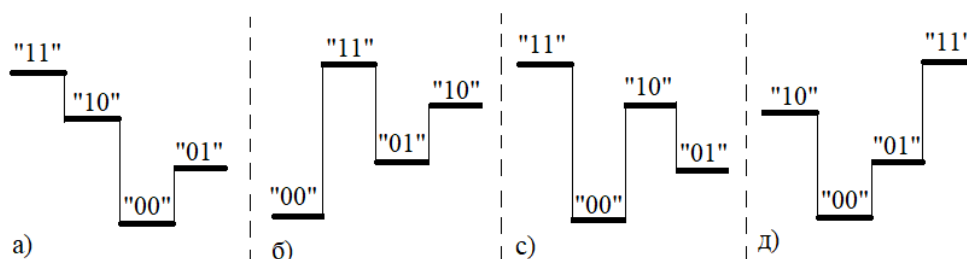


Рисунок 4 – Четыре варианта немонотонных квантователей, используемых при реализации низкоуровневого некриптографического хэширования

Эффективное устранение корреляционных связей разрядов нейрокодов может быть выполнено, если связать подключение одного из квантователей рисунка 4 к  $n$ -му нейрону с двумя предыдущими или с двумя последующими разрядами. Подобное низкоуровневое хэширование приводит к значительному снижению стандартного отклонения коэффициентов корреляции реальных биометрических образов.

### ЗАЩИТА ОТ АТАК ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ ПЕРЕХОДОМ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СЕТЕЙ ТРОИЧНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ

Еще одним способом противодействия бинарной симметрии энтропии Шеннона (рис. 1) и энтропии одиночных квантователей с числом состояний  $2^n$  является переход к использованию троичных квантователей. Изначально предполагалось, что переход от бинарных нейронов к троичным нейронам должен приводить к полуторokratному росту энтропии выходных кодов нейросети. Это предположение строилось на том, что замена бинарных нейронов на четверичные дает удвоение длины выходного кода или удвоение энтропии.

Практические попытки оценки роста энтропии при замене бинарных нейронов на троичные дают увеличение энтропии примерно в 15 раз [11, 26]. Это примерно в 10 раз выше первоначальных ожиданий.

Столь серьезное расхождение интуитивных ожиданий роста энтропии и практических оценок энтропии объяснено математически А. Ю. Хренниковым [27]. Им доказано, что наиболее выгодно использовать квантователи с числом состояний, совпадающим с простыми числами  $q = \{2, 3, 5, 7, 11, 13, \dots\}$ . В этом контексте бинарные нейроны являются наихудшими. Последнее положение подтверждается тем, что исследования отечественных и иностранных физиологов с 30-х годов прошлого века по настоящее время сделали общедоступными в публикациях осциллограммы передачи данных между нейронами живых организмов [28]. Анализ этих изображений показал, что даже у простейших дождевых червей нет бинарных нейронов [29]. На текущий момент не обнаружено ни одного бинарного нейрона. Все нейроны живых существ много сложнее простейших бинарных нейроконструкций.

Причина 15-кратного роста энтропии при замене бинарных нейронов на троичные, видимо, обусловлена тем, что троичная симметрия дает большее число проколов энтропии и эти проколы имеют меньшую глубину (нет проколов до нуля энтропии). Более того, преимущество троичных нейронов подтверждается при решении других нейросетевых задач [30, 31].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при использовании троичных нейронов вместо бинарных нейронов должна наблюдаться значительная экономия энергопотребления нейросетевых вычислений и экономия памяти из-за двукратного сокращения числа нейронов. Это крайне важно, если ориентироваться на применение доверенных SIM-карт и RFID-карт.

Еще одним практически важным обстоятельством является то, что на текущий момент атака извлечения знаний из бинарных нейросетей [18, 19] хорошо изучена и является эффективной. Подобная атака на сети троичных нейронов пока не исследована, условия ее реализуемости и ее эффективность неизвестны.

## Список источников

1. Болл, Р. М. Руководство по биометрии / Р. М. Болл, Д. Х. Коннел, Ш. Панканти, Н. К. Патха, Э. К. Сеньор. – Москва : Техносфера, 2007. – 368 с.
2. Dodis, Y. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy / Y. Dodis, L. Reyzin, A. Smith // EUROCRYPT. – 2004, April 13. – P. 523–540.
3. Feng, Hao. Combining Crypto with Biometrics Effectively / Feng Hao, Ross Anderson, and John Daugman // IEEE Transactions on Computers. – 2006. – Vol. 55, № 9. – P. 1081–1088. <https://doi.org/10.1109/TC.2006.138>.
4. Rane, S. Standardization of Biometric Template Protection / S. Rane // IEEE MultiMedia. – 2014. – Vol. 21, № 4. P. 94–99. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2014.65>.
5. Nandakumar, K. Biometric Template Protection: Bridging the Performance Gap Between Theory and Practice / K. Nandakumar, A. K. Jain // IEEE Signal Processing Magazine. – 2015. – Vol. 32, № 5. – P. 88–100. <https://doi.org/10.1109/MSP.2015.2427849>.
6. Иванов А. И. Протоколы биометрико-криптографического рукопожатия: защита распределенного искусственного интеллекта Интернет вещей нейросетевыми методами / И А. Иванов, П. А. Чернов // Системы безопасности. – 2018. – № 6 (144). – С. 54–59.
7. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования / Р. Морелос-Сарагоса. – Москва : Техносфера. 2007. – 320 с.
8. ГОСТ Р 52633.0-2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 19 с.
9. ГОСТ Р 52633.3-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 16 с.
10. ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 20 с.
11. Алчинов, В. И. Основы нейросетевого искусственного интеллекта. Краткий вводный курс : учебно-методическое пособие / В. И. Алчинов, А. И. Иванов. – Пенза : Пензенский государственный университет, 2024. – 68 с.
12. Безяев, А. В. Биометрико-нейросетевая аутентификация: обнаружение и исправление ошибок в длинных кодах без накладных расходов на избыточность : препринт / А. В. Безяев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 40 с.
13. Маршалко, Г. Б. Вопросы оценки стойкости нейросетевой системы биометрической аутентификации / Г. Б. Маршалко // Конференция РусКрипто. – URL: <https://ruscrypto.ru/association/archive/rc2013.html> (дата обращения: 01.12.2025).
14. Маршалко, Г. Б. О безопасности схемы биометрической аутентификации, основанной на нейронной сети / Г. Б. Маршалко // Математические вопросы криптографии. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 87–98.
15. Bogdanov, D. S. Data recovery for a neural network-based biometric authentication scheme / D. S. Bogdanov, V. O. Mironkin // Математические вопросы криптографии. – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 61–74. – DOI 10.4213/mvk284.
16. Волчихин, В. И. Алгоритм быстрого вычисления энтропии Шеннона на малых выборках для длинных кодов биометрии с существенно зависимыми разрядами / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Иванов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 4. – С. 27–34. – DOI 10.24143/2072-9502-2024-4-27-34.
17. Иванов, А. И. Корреляционная энтропия как метрика расстояния от идеального белого шума до практически полностью упорядоченных данных / А. И. Иванов // Системы безопасности. – 2025. – № 4. – С. 130–133.
18. Волчихин, В. И. Нейросетевая молекула: решение обратной задачи биометрии через программную поддержку квантовой суперпозиции на выходах сети искусственных нейронов / В. И. Волчихин, А. И. Иванов // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 518–529. – DOI 10.15507/0236-2910.027.201704.518-529.
19. Волчихин, В. И. Использование программной поддержки эффектов квантовой суперпозиции для ускорения решения задачи направленного перебора биометрических данных при извлечении знаний из нейросети / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, М. А. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2023. – № 4 (68). – С. 18–30. – DOI 10.21685/2072-3059-2023-4-2.
20. ГОСТ Р 52633.2-2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 22 с.
21. Волчихин, В. И. Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации / В. И. Волчихин, А. И. Иванов,

В. А. Фунтиков, Е. А. Малыгина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 86–96.

22. Малыгина, Е. А. Биометрико-нейросетевая аутентификация: перспективы применения сетей квадратичных нейронов с многоуровневым квантованием биометрических данных : препринт / Е. А. Малыгина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 114 с.

23. Иванов, А. И. Квантовая неопределенность Гейзенберга для «средне-групповой» скорости математических молекул / А. И. Иванов // Защита информации. Инсайд. – 2024. – № 6 (120). – С. 58–63.

24. Иванов, А. И. Энтропия как оценка числа модификации кода от исходного хаоса к максимальному порядку: быстрый алгоритм приближенной оценки качества случайных последовательностей / А. И. Иванов // Защита информации. Инсайд. – 2024. – № 4 (118). – С. 56–59.

25. Иванов, А. И. Появление взаимной корреляции состояний 256 монет Бернулли при их параллельном подбрасывании горстью / А. И. Иванов // Защита информации. Инсайд. – 2025. – № 4 (124). – С. 82–86.

26. Алчинов, В. И. Рост энтропии выходных кодов нейросети при замене в ней двоичных персептронов на троичные персептроны / В. И. Алчинов, А. И. Иванов, Н. И. Серикова [и др.] // Информационно-управляющие, телекоммуникационные системы, средства поражения и их техническое обеспечение : сборник научных статей по материалам VI Всероссийской межведомственной научно-технической конференции, Пенза, 16 мая 2024 года. – Пенза : Пензенский государственный университет, 2024. – С. 188–197.

27. Хренников, А. Ю. Моделирование процессов мышления в р-адических системах координат : учебное пособие / А. Ю. Хренников. – Москва : Физматлит, 2004. – 296 с.

28. Николлс, Дж. От нейрона к мозгу : пер. с англ. / Дж. Николлс, Р. Мартин, Б. Валлас, П. Фукс. – Москва : Едиториал УРСС, 2003. – 672 с.

29. Иванов, А. И. Бионика: оценка числа кодовых состояний обмена данными в структуре микропотребляющих, высокоразмерных, природоподобных нейровычислителей / А. И. Иванов, Е. А. Малыгина, Ю. И. Серикова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 3 (71). – С. 25–36. – DOI 10.21685/2072-3059-2024-3-3.

30. Волчихин, В. И. Номограммы для сравнения корректирующих способностей бинарных и троичных нейронов, используемых при многокритериальной проверке гипотезы независимости данных малых выборок / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Иванов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 4 (64). – С. 5–16. – DOI 10.21685/2072-3059-2022-4-1.

31. Иванов, А. И. Виртуальное усиление эффекта распараллеливания вычислений при переходе от бинарных нейронов к использованию q-арных искусственных нейронов / А. И. Иванов, А. П. Иванов, К. Н. Савинов, Р. В. Еременко // Надежность и качество сложных систем. – 2022. – № 4 (40). – С. 89–97. – DOI 10.21685/2307-4205-2022-4-10.

#### References

1. Bolle, R. M., Connell, J. H., Pankanti, Sh., Ratha, N. K., Senior, A. W. *Guide to Biometrics*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 368 p. (In Russ.).

2. Dodis Y., Reyzin L., Smith A. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy. *EUROCRYPT*, 2004. April 13, pp. 523–540.

3. Feng, Hao, Ross, Anderson, and John, Daugman. Combining Crypto with Biometrics Effectively. *IEEE Transactions on Computers*, 2006, vol. 55, № 9, pp. 1081–1088. <https://doi.org/10.1109/TC.2006.138>.

4. Rane, S. Standardization of Biometric Template Protection. *IEEE MultiMedia*, 2014, vol. 21, № 4, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2014.65>.

5. Nandakumar, K., Jain, A. K. Biometric Template Protection: Bridging the Performance Gap Between Theory and Practice. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2015, vol. 32, №. 5. pp. 88–100. <https://doi.org/10.1109/MSP.2015.2427849>.

6. Ivanov, A. I., Chernov, P. A. Biometric-cryptographic handshake protocols: protection of distributed artificial intelligence of the Internet of Things by neural network methods. *Security Systems*, 2018, no. 6 (144), pp. 54–59 (In Russ.).

7. Morelos-Saragosa, R. *The art of error-correcting coding. Methods, algorithms, application*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 320 p. (In Russ.).

8. GOST R 52633.0-2006. *Information protection. Information security techniques. Requirements for highly reliable biometric authentication tools*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 19 p. (In Russ.).

9. GOST R 52633.3-2011. *Information protection. Information security techniques. Testing the resistance of highly reliable biometric protection tools to selection attacks*. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 16 p. (In Russ.).

10. GOST R 52633.5-2011. *Information protection. Information security techniques. Automatic training of neural network converters biometrics-access code*. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 20 p. (In Russ.).

11. Alchinov, V. I., Ivanov, A. I. *Fundamentals of neural network artificial intelligence. Short introductory course : an educational and methodical manual*. Penza : Publishing House of Penza State University, 2024. 68 p. (In Russ.).

12. Bezyaev, A. V. Biometric and neural network authentication: error detection and correction in long codes without redundancy overhead : preprint. Penza : Publishing House of Penza State University, 2020. 40 p. (In Russ.).

13. *RusCrypto Conference: Marshalko G.B. Issues of assessing the durability of a neural network biometric authentication system*. Available at: <https://ruscrypto.ru/accociation/archive/rc2013.html> (accessed 01.12.2025) (In Russ.).

14. Marshalko, G. B. On the security of a neural network-based biometric authentication scheme. *Mathematical Issues of Cryptography*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 87–98.

15. Bogdanov, D. S., Mironkin, V. O. Data recovery for a neural network-based biometric authentication scheme. *Mathematical Issues of Cryptography*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 61–74. DOI 10.4213/mvk284.

16. Volchikhin, V. I., Ivanov, A. I., Ivanov, A. P. Algorithm for fast computation of Shannon's entropy on small samples for long biometrics codes with essentially dependent digits. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2024, no. 4, pp. 27–34. DOI 10.24143/2072-9502-2024-4-27-34 (In Russ.).
17. Ivanov, A. I. Correlation entropy as a metric of distance from ideal white noise to almost completely orderly data. *Security Systems*, 2025, no. 4, pp. 130–133 (In Russ.).
18. Volchikhin, V. I., Ivanov, A. I. Neural network molecule: solving the inverse problem of biometrics through software support for quantum superposition at the outputs of a network of artificial neurons. *Mordovia University Bulletin*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 518–523. DOI 10.15507/0236-2910.027.201704.518-529 (In Russ.).
19. Volchikhin, V. I., Ivanov, A. I., Shcherbakov, M. A. Using software support for quantum superposition effects to speed up the solution of the targeted enumeration issue in biometric data when extracting knowledge from a neural network. *University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*, 2023, no. 4, pp. 18–30. DOI 10.21685/2072-3059-2023-4-2 (In Russ.).
20. GOST R 52633.2-2010. *Information protection. Information security techniques. Requirements for the formation of synthetic biometric images intended for testing highly reliable biometric authentication tools*. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 22 p. (In Russ.).
21. Volchikhin, V. I., Ivanov, A. I., Funtikov, V. A., Malygina, E. A. Perspectives of using artificial neural networks with multilayer quantizer in technology of bio-metric-neural-network authentication. *University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*, 2013, no. 4 (28), pp. 86–96 (In Russ.).
22. Malygina, E. A. *Biometric-neural network authentication: prospects for using quadratic neural networks with multi-level quantization of biometric data: preprint*. Penza : Publishing House of Penza State University, 2020. 114 p. (In Russ.).
23. Ivanov, A. I. Heisenberg's quantum uncertainty for the "average-group" velocity of mathematical molecules. *Information protection. Inside*, 2024, no. 6 (120), pp. 58–63 (In Russ.).
24. Ivanov, A. I. Entropy as an estimate of the number of code modifications from initial chaos to maximum order. *Information protection. Inside*, 2024, no. 4 (118), pp. 56–69 (In Russ.).
25. Ivanov, A. I. The emergence of a mutual correlation of the states of 256 Bernoulli coins when they are tossed in parallel by a handful. *Information protection. Inside*, 2025, no. 4 (124), pp. 82–86 (In Russ.).
26. Alchinov, V. I., Ivanov, A. I., Serikova, N. I., Savinov, K. N., Papusha, N. A. The entropy of the output codes of the neural network increases when binary perceptrons are replaced with ternary perceptrons in it. *Information management, telecommunication systems, weapons of destruction and their technical support : collection of scientific articles based on the materials of the VI all-Russian interdepartmental scientific and technical conference, Penza, May 16, 2024*. Penza, Publishing House of Penza State University, 2024, pp. 188–197 (In Russ.).
27. Khrennikov, A. Yu. *Modeling of thinking processes in p-adic coordinate systems : a textbook*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 296 p. (In Russ.).
28. Nicholls, J., Martin, R., Wallas, B., Fuchs, P. *From neuron to brain : translated from English*. Moscow, Unified URSS, 2003. 672 p. (In Russ.).
29. Ivanov, A. I., Malygina, E. A., Serikova, Yu. I., Ermakova, A. I., Guzhova, S. A. Bionics: estimation the number of code states of data exchange in the structure of microconsuming, high-dimensional, nature-like neurocomputers. *University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*, 2024, no. 3, pp. 25–36. DOI 10.21685/2072-3059-2024-3-3 (In Russ.).
30. Volchikhin, V. I., Ivanov, A. I., Ivanov, A. P., Eremenko, R. V., Savinov, K. N. Nomograms for comparing the corrective abilities of binary and ternary neurons used in multicriteria testing of the hypothesis of small sample data independence. *University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*, 2022, no. 4, pp. 5–16. DOI 10.21685/2072-3059-2022-4-1 (In Russ.).
31. Ivanov, A. I., Ivanov, A. P., Savinov, K. N., Eremenko, R. V. Virtual enhancement of the effect of parallelization of calculations in the transition from binary neurons to the use of q-ary artificial neurons. Reliability and quality of complex systems, 2022, no. 4, pp. 89–97. DOI 10.21685/2307-4205-2022-4-10 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 05.02.2026.

The article was submitted 23.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 05.02.2026.

УДК 004.001

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАТЕГОРИЙ ЗАДАЧ И ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ  
КОМПЕТЕНЦИЙ УЧАСТНИКОВ В СОРЕВНОВАНИЯХ CAPTURE THE FLAG (CTF)  
ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

*Юсупов Майербек Назарбекович*, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1, магистрант, ORCID: 0009-0005-8689-4328, e-mail: boss.maerbek@mail.ru

*Кузнецова Валентина Юрьевна*, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1, кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления», ORCID: 0000-0002-6954-5020, e-mail: v.kuznetsova@astu.ru

В статье представлен всесторонний анализ категорий задач, используемых в соревнованиях Capture The Flag (CTF), а также рассматриваются профессиональные компетенции, необходимые участникам для их решения. Особое внимание уделяется критериям выбора задач, соответствию актуальным угрозам информационной безопасности, а также этическим и техническим аспектам проведения CTF. Статья демонстрирует, как различные категории задач способствуют развитию профессиональных навыков, необходимых для карьеры в сфере информационной безопасности, и подчеркивает важность сбалансированного и актуального наполнения задач для повышения эффективности образовательных и профессиональных программ.

**Ключевые слова:** Capture The Flag, информационная безопасность, категории задач, профессиональные компетенции, выбор задач, технические навыки, этика, квалификация специалистов

**SYSTEM ANALYSIS OF TASK CATEGORIES AND PROFESSIONAL  
COMPETENCIES OF PARTICIPANTS IN CAPTURE THE FLAG (CTF)  
INFORMATION SECURITY COMPETITIONS**

*Yusupov Mayerbek N.*, Astrakhan State Technical University, 16/1 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, undergraduate, ORCID: 0009-0005-8689-4328, e-mail: boss.maerbek@mail.ru

*Kuznetsova Valentina Yu.*, Astrakhan State Technical University, 16/1 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department "Automated Information Processing and Control Systems", ORCID: 0000-0002-6954-5020, e-mail: v.kuznetsova@astu.ru

This article presents a comprehensive analysis of the problem categories used in Capture The Flag (CTF) competitions and discusses the professional competencies required to solve them. Particular attention is paid to the criteria for choosing problems, their relevance to current information security threats, and the ethical and technical aspects of conducting CTFs. The article demonstrates how different problem categories contribute to the development of professional skills required for a career in information security and highlights the importance of balanced and relevant problem content for improving the effectiveness of educational and professional programs.

**Keywords:** Capture The Flag, information security, task categories, professional competencies, task selection, technical skills, ethics, specialist qualifications

**ВВЕДЕНИЕ**

Capture The Flag (CTF) – это соревнования по решению задач, направленных на практику и закрепление навыков в области кибербезопасности. Участники команды или отдельные игроки выполняют задания, связанные с защитой компьютерных сетей и данных. За правильные ответы («флаги») начисляются баллы, цель игры – заработать больше баллов, чем соперники. Платформы CTF (также часто называемые в литературе средами CTF или фреймворками CTF) обычно используются в качестве игровых сред, где участники могут практиковать навыки, умения и знания в области компьютерной безопасности. С помощью таких систем могут быть реализованы в игровой форме различные методы атак или отточены навыки в области защиты от них. Долгосрочные цели соревнований CTF, например, в сфере образования, заключаются в том, чтобы позволить участникам проверить свои навыки и способности в области компьютерной безопасности, расширить практический опыт, а также бросить вызов участникам и проверить их знания.

Современные соревнования Capture The Flag (CTF) выступают как мощный инструмент формирования и оценки профессиональных компетенций в области информационной безопасности. Одним из ключевых элементов таких соревнований является разнообразие задач, которые позволяют выявить уровень знаний, аналитические способности и креативность участников. Правильный

подбор и формулировка задач способствуют развитию необходимых навыков и стимулируют интерес к профессиональному росту. В данной статье рассматриваются основные категории задач, используемые в CTF, а также критерии их выбора и соответствующие профессиональные компетенции, что позволяет понять, как данный формат способствует подготовке компетентных специалистов.

Статистика показывает высокую активность российских специалистов в области информационной безопасности: Россия входит в топ-3 стран по количеству команд (более 2700). Крупнейшие турниры, такие как Кубок CTF России, собирают сотни команд из всех регионов. Основные форматы – Attack-Defense и Task-based (Jeopardy).

### АНАЛИЗ ТИПОВОЙ СТРУКТУРЫ И ОРГАНИЗАЦИИ СОРЕВНОВАНИЙ В ФОРМАТЕ CTF

Для организации CTF-соревнований по информационной безопасности требуется планирование и подготовка. Проанализируем общие этапы подготовки различных CTF-соревнований.

1. Цель и формат соревнований:
  - определение цели CTF-соревнований, например, обучение, популяризация ИБ;
  - выбор формата CTF-соревнований, например, Jeopardy, Attack-Defense, и Mixed.
2. Формирование списка организаторов соревнований.
  - назначение ответственного организатора и распределение ролей среди команды, например, разработчики задач, судьи.
3. Разработка самих задач для соревнований:
  - создание различных тематик задач, например, веб-безопасность, криптография;
  - проведение апробации задач на корректность.
4. Подготовка необходимой технической инфраструктуры:
  - использование серверов и сетевой инфраструктуры;
  - обеспечение безопасности специальной платформы для участия, чтобы предотвратить несанкционированный доступ и атаки.
5. Регистрация участников соревнований:
  - разработка системы регистрации команд участников;
  - подготовка необходимой инструкции для участников соревнований.
6. Проведение CTF-соревнований:
  - Наблюдение за процессом проведения соревнований;
  - Обеспечение необходимой технической поддержки для участников соревнований.
7. Оценка и подведение итогов проведенных CTF-соревнований:
  - специальная система для оценки решенных задач и начисления очков для команд;
  - анализ результатов команд, объявление победителей и награждение участников соревнований.

Изобразим данные этапы проведения CTF-соревнований в виде контекстной диаграммы декомпозиции, представленной на рисунке 1.

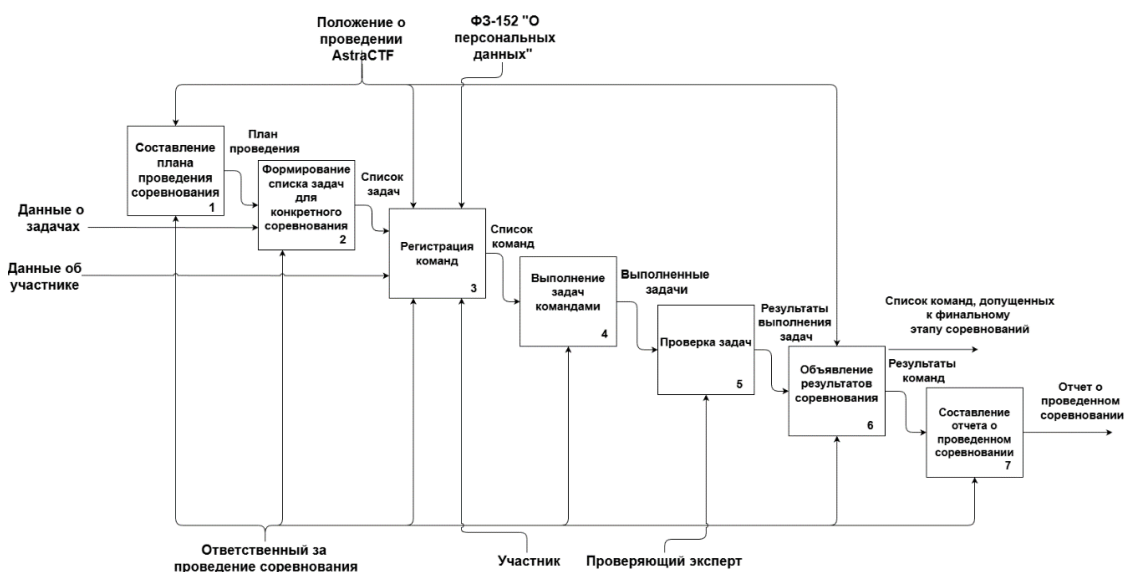


Рисунок 1 – Контекстная диаграмма декомпозиции проведения CTF-соревнований

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ CTF-СОРЕВНОВАНИЙ**

Изучив общие этапы организации CTF-соревнований, проанализируем конкретные соревнования, которые уже были проведены в России:

### **1. Соревнования Tinkoff CTF 2025.**

Тинькофф организовал свои собственные CTF-соревнования, а именно: TinkoffCTF 2024. Данные соревнования объединили различных специалистов и студентов, предоставив специальную платформу для участия.

Целью данных соревнований было повышение уровня подготовки специалистов по информационной безопасности и популяризации данной области ИБ среди молодежи. Формат проведения соревнований – Jeopardy CTF, данный формат представляет собой решение задач в различных категориях.

Организаторы соревнований являлись сотрудниками компании Тинькофф, эксперты из различных университетов. Кроме этого, были назначены ответственные за разработку задач для соревнований, а также техническая поддержка.

Было разработано более 50 задач в разных категориях, таких как веб-безопасность, форензика, стеганография.

Регистрация участников (команд) соревнований была осуществлена через созданный веб-сайт.

Соревнования TinkoffCTF 2025 были проведены в несколько этапов. Рассмотрим каждый этап:

#### **1. Онлайн (отборочный) этап соревнований:**

- в отборочном (онлайн) этапе соревнований приняли участие более 500 команд;
- участникам (командам) соревнований было предложено решить определенное количество задач на ограниченное время, сами задачи были рассортированы по категориям и уровню сложности.

#### **2. Основной этап соревнований.**

- основной этап соревнований проводился в Москве, в офлайн-формате, в офисе Тинькофф;
- в соревнованиях приняли участие 50 лучших команд, прошедших отборочный (онлайн) этап соревнований;

- командам соревнований было необходимо решить новый набор задач.

#### **3. Финал соревнований:**

- финальный этап соревнований включал в себя новые задачи, а также проходил в режиме реального времени.

Изучим категории задач, которые были задействованы в соревнованиях TinkoffCTF 2025:

#### **1. Веб-безопасность:**

- задачи данной категории были связаны с поиском и эксплуатацией уязвимостей в веб-приложениях;
- задачи на анализ кода и конфигураций веб-серверов для выявления ошибок информационной безопасности.

#### **2. Реверс-инжиниринг:**

- задачи на проведение анализа файлов и программ для выявления флагов и понимания их функциональности.

#### **3. Криптография:**

- задачи, связанные с шифрованием данных, анализ криптографических протоколов и алгоритмов;
- задачи на использование методов криптоанализа для нахождения необходимых флагов.

#### **4. Форензика:**

- задачи на проведение анализа файловых систем;
- задачи на восстановление удаленных данных и расследование инцидентов в области информационной безопасности.

#### **5. Стеганография:**

- задачи на проведение поиска информации в изображениях, аудио- и видеофайлах;
- задачи на использование методов стеганографического анализа.

Подведем итоги проведения соревнования TinkoffCTF 2025:

#### **1. Объявление победителей соревнований:**

- победителями соревнований стали 3 команды, набравшие большее количество очков по сравнению с другими командами соревнований по итогам финального этапа;
- командам-победителям были вручены сертификаты и приглашения на проведение стажировки в компанию Тинькофф.

#### **2. Обратная связь о проведении соревнований:**

- участники (команды) соревнований отметили положительную организацию данных соревнований, а также интересные и разнообразные задачи;

– организаторы соревнований собрали данные, полученные через обратную связь для улучшения следующих соревнований и проведения анализа преимуществ и недостатков проведенных соревнований.

### 3. Популяризация ИБ.

– соревнования TinkoffCTF 2025 способствовали повышению интереса к информационной безопасности среди студентов и профессионалов;

### 2. Соревнования VolgaCTF 2025.

Соревнования VolgaCTF 2025 были организованы и проведены в Казани.

Целью данных соревнований было выявление талантов в области информационной безопасности, повышение уровня подготовки специалистов в области ИБ, а также сотрудничество между образовательными учреждениями. Формат проведения соревнований – Jeopardy CTF с элементами Attack-Defense.

Организаторы соревнований – представители различных университетов, IT-компании, а также эксперты в области информационной безопасности.

Было разработано более 60 задач в разных категориях, такие как криптография, стеганография, и т. д. Регистрация участников (команд) соревнований была осуществлена через созданный веб-сайт.

Соревнования VolgaCTF 2025 были проведены в несколько этапов. Рассмотрим каждый этап:

#### 1. Онлайн (отборочный) этап соревнований:

- в отборочном (онлайн) этапе соревнований приняли участие более 700 команд;
- участникам (командам) соревнований было предложено решить определенное количество задач на ограниченное время, сами задачи были рассортированы по категориям и уровню сложности;
- по результатам отборочного (онлайн) этапа соревнований были определены команды, которые прошли в финальную часть данных соревнований.

#### 2. Основной этап соревнований:

- основной этап соревнований был проведен в оффлайн-формате в Казани;
- в соревнованиях приняли участие 50 лучших команд, прошедших отборочный (онлайн) этап соревнований;

– командам соревнований было необходимо решить новый набор задач.

#### 3. Финал соревнований:

- финальный этап соревнований включал в себя новые задачи, а также проходил в режиме реального времени.

Изучим категории задач, которые были задействованы в соревнованиях VolgaCTF 2024:

#### 1. Веб-безопасность:

- задачи на анализ кода и конфигураций веб-серверов для выявления ошибок информационной безопасности.

#### 2. Реверс-инжиниринг:

- задачи на проведение анализа файлов и программ для выявления флагов и понимания их функциональности.

#### 3. Криптография:

- задачи, связанные с шифрованием данных, анализ криптографических протоколов и алгоритмов;

– задачи на использование методов криптоанализа для нахождения необходимых флагов.

#### 4. Форензика:

- задачи на проведение анализа файловых систем;
- задачи на восстановление удаленных данных и расследование инцидентов в области информационной безопасности.

#### 5. Стеганография:

- задачи на проведение поиска информации в изображениях, аудио- и видеофайлах;
- задачи на использование методов стеганографического анализа.

Подведение итогов проведения соревнований VolgaCTF 2025:

#### 1. Объявление победителей соревнований:

- победителями соревнований стали 3 команды, набравшие большее количество очков по сравнению с другими командами соревнований по итогам финального этапа;

– командам-победителям были вручены сертификаты и приглашения на проведение стажировки в различных IT-компаниях.

#### 2. Обратная связь о проведении соревнований:

– организаторы соревнований собрали данные, полученные через обратную связь для улучшения следующих соревнований и проведения анализа преимуществ и недостатков проведенных соревнований.

Представим сравнительный анализ российских соревнований в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ различных CTF-соревнований

<b>Критерий</b>	<b>Tinkoff CTF</b>	<b>VolgaCTF 2024</b>
Формат	Онлайн и офлайн	Онлайн
Уровень участников	Средний и высокий	Средний
Тип задач	Веб, криптография, судебная экспертиза, реверс-инжиниринг	Веб, криптография, судебная экспертиза, реверс-инжиниринг
Оценка креативности	Да	Нет
Система оценок	Динамическая (различные баллы за задачи)	Статическая (фиксированные баллы)
Продолжительность	48 часов	24 часа
Обратная связь	Хорошая, оперативная	Средняя
Разнообразие задач	Высокое	Среднее
<i>Преимущества</i>	<i>Отличная организация, качественные задачи</i>	<i>Простота участия, доступность для новичков</i>
<i>Недостатки</i>	<i>Сложные задачи для новичков</i>	<i>Простые задачи</i>

Таким образом, на основе проведенного сравнительного анализа различных CTF-соревнований были выявлены преимущества, а также недостатки данных соревнований, что видно по таблице выше. Далее целесообразно рассмотреть, какие именно задачи были задействованы в данных соревнованиях.

#### **ОБЗОР КАТЕГОРИЙ ЗАДАЧ**

В рамках проведения CTF-соревнований выделяют несколько ключевых категорий задач, каждая из которых направлена на развитие определенных навыков и знаний у участников. Ниже подробно рассмотрены основные категории.

##### **1. Веб-безопасность.**

Задачи, связанные с анализом веб-приложений и серверных конфигураций, обнаружением уязвимостей, SQL-инъекций, межсайтовых скриптовых атак (XSS) и др. Веб-приложения – одна из наиболее распространенных целей атак, поэтому умение выявлять и устранять уязвимости в них является критически важным навыком для специалиста по информационной безопасности.

##### **2. Реверс-инжиниринг.**

Задачи на анализ бинарных файлов, декомпиляцию, понимание внутренней структуры программных продуктов, выявление скрытых функций и флагов. Позволяет участникам понять внутренние механизмы программ, что важно для обнаружения уязвимостей и анализа вредоносных программ.

##### **3. Криптография.**

Задачи, связанные с расшифровкой сообщений, криптоанализом, использованием алгоритмов шифрования и их взломом. Обеспечение конфиденциальности данных – краеугольный камень информационной безопасности; навыки работы с криптографическими протоколами востребованы у специалистов.

##### **4. Форензика.**

Анализ дампов памяти, сетевых трафиков, восстановление удаленных данных, расследование инцидентов. Необходимость быстрого реагирования и расследования киберинцидентов делает данный тип задач ключевым для специалистов по инцидент-менеджменту.

##### **5. Стеганография.**

Обнаружение скрытых сообщений и данных в изображениях, аудиофайлах, текстах. Умение находить скрытые данные важно как для защиты информации, так и для проведения разведывательных операций.

##### **6. Эксплуатация уязвимостей.**

Задачи на поиск, разработку и применение эксплойтов, а также создание автоматизированных средств атаки. Это фундаментальные навыки для оценки уязвимостей систем и разработки методов защиты.

##### **7. Пентестинг (проверка на проникновение).**

Проведение моделируемых атак на системы и сети, подготовка отчетов о результатах. Позволяет участникам понять слабые места систем и научиться их устранять.

##### **8. OSINT (Open Source Intelligence).**

Исследование открытых источников информации для сбора данных и анализа. Навыки работы с публичными источниками необходимы для разведки и оценки угроз.

9. MISC (разные задачи).

Задачи, не входящие в другие категории, например, анализ логов, социальная инженерия. Разностороннее развитие навыков и подготовка к нестандартным ситуациям.

10. Безопасность ОС.

Задачи, связанные с анализом защиты операционных систем, выявлением уязвимостей и их устранением. Ключевые навыки для специалистов по защите инфраструктуры.

Для уточнения осведомленности специалистов в сфере информационной безопасности о видах заданий для соревнований был проведён их опрос о различных категориях задач (веб-безопасность, реверс-инжиниринг, криптография, форензика, стеганография) в %, результаты которого приведены в качестве диаграммы на рисунке 2. В опросе приняли участие 56 астраханских специалистов в области ИБ.

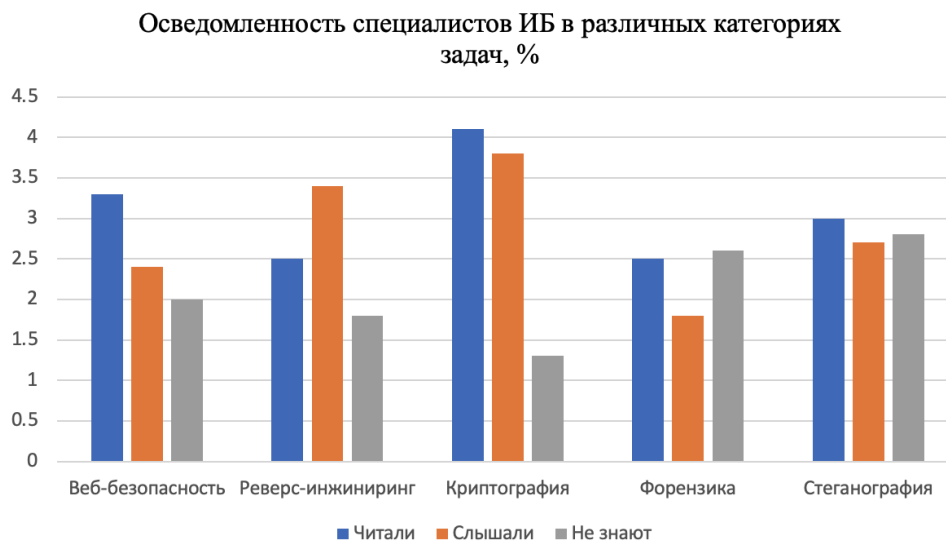


Рисунок 2 – Диаграмма осведомленности специалистов ИБ в различных категориях задач, %

Опрос показал, что о таких категориях задач, как форензика и стеганография, многие специалисты не знали, что, в свою очередь, делает информирование о данных видах задач актуальным.

### КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ ПОДХОД

Реализация задач разного типа в соревнованиях требует от участников наличия определенных профессиональных компетенций. Согласно приказу Минобрнауки РФ № 1515 от 01.12.2016, выделяют следующие компетенции и соответствующие им навыки:

1. Криптография.

Задачи на расшифровку зашифрованных сообщений, криптоанализ, реализация и взлом шифров.

Необходимые профессиональные компетенции:

- способность выполнять работы по установке, настройке и обслуживанию программных, программно-аппаратных (в том числе криптографических) и технических средств защиты информации (ПК-1);

- способность применять программные средства системного, прикладного и специального назначения, инструментальные средства, языки и системы программирования для решения профессиональных задач (ПК-2);

- способность принимать участие в проведении экспериментальных исследований системы защиты информации (ПК-12).

2. Социальная инженерия.

Задачи на умение вести себя с мошенниками, манипулирование.

Необходимые профессиональные компетенции:

- способность организовывать работу малого коллектива исполнителей в профессиональной деятельности (ПК-14).

3. WEB-безопасность.

Задачи на защиту WEB-сервисов от атак, анализ WEB-сервисов.

Необходимые профессиональные компетенции:

- способность применять программные средства системного, прикладного и специального назначения, инструментальные средства, языки и системы программирования для решения профессиональных задач (ПК-2);

- способность принимать участие в проведении экспериментальных исследований системы защиты информации (ПК-12).

4. Форензика.

Задачи на анализ дампов памяти, сетевых трафиков, восстановление удаленных данных, а также расследование инцидентов.

Необходимые профессиональные компетенции:

- способность применять программные средства системного, прикладного и специального назначения, инструментальные средства, языки и системы программирования для решения профессиональных задач (ПК-2);
- способность принимать участие в проведении экспериментальных исследований системы защиты информации (ПК-12);
- способность проводить анализ исходных данных для проектирования подсистем и средств обеспечения информационной безопасности и участвовать в проведении технико-экономического обоснования соответствующих проектных решений (ПК-7).

5. Стеганография.

Задачи на поиск скрытых данных в изображениях, аудиофайлах, текстах.

Необходимые профессиональные компетенции:

- способность организовывать технологический процесс защиты информации ограниченного доступа в соответствии с нормативными правовыми актами и нормативными методическими документами Федеральной службы безопасности Российской Федерации, Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ПК-15).

6. OSINT.

Задачи на исследование открытых источников информации.

Необходимые профессиональные компетенции:

- способность проводить анализ исходных данных для проектирования подсистем и средств обеспечения информационной безопасности и участвовать в проведении технико-экономического обоснования соответствующих проектных решений (ПК-7).

7. MISC.

Задачи, не похожие ни на один из других разделов задач.

Необходимые профессиональные компетенции:

- способность проводить анализ исходных данных для проектирования подсистем и средств обеспечения информационной безопасности и участвовать в проведении технико-экономического обоснования соответствующих проектных решений (ПК-7).

8. Безопасность ОС.

Задачи, связанные с защитой операционной системы, анализа ОС.

Необходимые профессиональные компетенции:

- способность применять программные средства системного, прикладного и специального назначения, инструментальные средства, языки и системы программирования для решения профессиональных задач (ПК-2);
- способность принимать участие в проведении экспериментальных исследований системы защиты информации (ПК-12).

Компетенции были сопоставлены разделам знаний в таблице 2.

Таблица 2 – Раздел и соответствующая компетенция

Раздел	Требуемые профессиональные компетенции
Исследование открытых источников (OSINT)	Способность проводить анализ исходных данных для проектирования подсистем и средств обеспечения информационной безопасности и участвовать в проведении технико-экономического обоснования соответствующих проектных решений (ПК-7)
Разное (MISC)	Способность проводить анализ исходных данных для проектирования подсистем и средств обеспечения информационной безопасности и участвовать в проведении технико-экономического обоснования соответствующих проектных решений (ПК-7).
Скрытая передача информации (стеганография)	Способность организовывать технологический процесс защиты информации ограниченного доступа в соответствии с нормативными правовыми актами и нормативными методическими документами Федеральной службы безопасности Российской Федерации, Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ПК-15)
Безопасность ОС	1. Способность применять программные средства системного, прикладного и специального назначения, инструментальные средства, языки и системы программирования для решения профессиональных задач (ПК-2). 2. Способность принимать участие в проведении экспериментальных исследований системы защиты информации (ПК-12).
Криптография	Способность выполнять работы по установке, настройке и обслуживанию программных, программно-аппаратных (в том числе криптографических) и технических средств защиты информации (ПК-1)

Данные категории задач, а также соответствующие профессиональные компетенции для их решения демонстрируют, как CTF-соревнования способствуют развитию различных навыков, необходимых для профессиональной карьеры в области информационной безопасности.

Изучим различные критерии выбора задач для CTF-соревнований, которые определяются следующими факторами:

1. Соответствие актуальным угрозам ИБ.

Задачи должны отражать актуальные угрозы, с которыми сталкиваются различные организации и пользователи.

2. Оценка профессиональных навыков.

Задачи должны обеспечивать проверку профессиональных навыков, необходимых для профессионалов в области ИБ.

3. Баланс сложности заданий.

Задачи должны быть сбалансированы по уровню сложности для участия как новичков, так и опытных специалистов в области ИБ.

4. Инновационность и интерес.

Задачи должны быть интересными, чтобы участники соревнований были мотивированы их решать.

Для составления заданий для различных CTF-соревнований необходимо учитывать следующие факторы:

1. Этичность и легальность.

Задачи должны быть этичными и легальными, т. е. не провоцировать участников соревнований на незаконные действия с их стороны. Необходимо избегать задачи, которые могут быть связаны как призыв к нарушению законодательства.

2. Техническая сложность.

Задачи должны быть технически сложными, но выполнимыми, чтобы мотивировать участников соревнований к развитию своих профессиональных навыков. Необходимо обеспечивать возможность проверки решений и корректности выполнения данных задач.

3. Образовательная ценность.

Задачи должны иметь образовательную ценность, помогая участникам соревнований улучшить свои навыки и знания в области информационной безопасности. Адекватно спроектированные задачи включают аспекты обучения и практического применения теоретических знаний в области ИБ.

Рассмотрим пример задачи для CTF и соответствующую профессиональную компетенцию, необходимую для решения данной задачи (рис. 3).

<p><b>Соц. инженерия</b></p> <p><i>Трудоемкость решения задачи – низкая.</i></p> <p><i>Формат ответа на задание – выбор из нескольких вариантов.</i></p> <p><i>Способ проверки – автоматическая проверка.</i></p>	<p><b>Условие:</b> Вы получили сообщение в социальных сетях от незнакомца, который утверждает, что он из популярного бренда одежды. Они предлагают вам эксклюзивную скидку на их продукцию, если вы перейдете по ссылке и предоставите свою электронную почту и номер телефона.</p> <p><b>Варианты ответа:</b></p> <p>1) <u>Перейдите по ссылке и предоставьте свои данные.</u> 2) <u>Проверьте подлинность бренда, связавшись с ними по официальным каналам.</u></p> <p>3) <u>Сообщите о сообщении как о фишинге.</u> 4) <u>Удалите сообщение и заблокируйте отправителя.</u></p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Рисунок 3 – Пример задания в разделе «Социальная инженерия»

Для решения данной задачи необходима профессиональная компетенция (ПК-14), а именно: способность организовывать работу малого коллектива исполнителей в профессиональной деятельности.

Хотелось бы указать следующее: оценивание заданий в виде тестов – легко, как мы указали в примере выше, но если рассмотреть задачу с развернутым ответом, требующую от участника не только знаний в области ИБ, знаний компетенций, но и креативный подход к решению задания, за что участник может получить намного больше баллов за выполнение. Соответственно, необходима информационная система, позволяющая решать и проверять данное развернутое решение участников соревнований. Приведем пример данного задания (рис. 4).

Решите этот ELF: [paf.elf](#)

Он не запускается на WSL1, используйте виртуальную машину с линуксом.

А вот что он умеет делать:

```
root@kali:~# ./paf_5aa0839763.elf [REDACTED]
Valid flag
root@kali:~# █
```

Рисунок 4 – Пример задания, требующего развернутый ответ

Ответ на задание необходимо прикреплять в виде файла с подробным пояснением решения данного задания.

### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ задач в различных CTF-соревнованиях показывает, что они охватывают большинство актуальных тем и угроз в области информационной безопасности. Данные задачи требуют от участников соревнований технических знаний, аналитического мышления, креативности, и т. д.

Категории задач, используемые в CTF, формируют комплексный набор навыков, необходимых специалистам по информационной безопасности. Правильный подбор и баланс задач по сложности, актуальности и этическим стандартам позволяют не только проверять уровень профессиональной подготовки участников, но и стимулировать их развитие, что способствует формированию квалифицированных кадров в области ИБ. Внедрение разнообразных задач, соответствующих современным угрозам, повышает эффективность CTF как образовательного инструмента и способствует развитию профессиональных компетенций. Эффективность CTF как образовательной площадки обеспечивается балансом сложности задач, уровнем инновационности и возможностью развития практических навыков, при этом у имеющихся автоматизированных площадок имеются свои недостатки, в связи с чем является актуальной разработка собственной площадки для проведения аналогичных соревнований.

### Список источников

1. Григорьев, А. CTF в кибербезопасности: все, что нужно знать об игре Capture the flag / А. Григорьев, У. Крюкова // Start X. – URL: <https://startx.team/blog/statyi/capture-the-flag-v-kiberbezopasnosti/> (дата обращения: 03.03.2026).
2. Демина, Р. Ю. Защита web-контента от нелегитимного роботизированного копирования / Р. Ю. Демина, И. М. Ажмухамедов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2022. – Т. 18, № 1(27). – С. 11–17. – DOI 10.34708/GSTOU.2022.65.43.002. – EDN MEXYHY.
3. Кузнецова, В. Ю. Аспекты оценки эффективности подготовки специалистов в области информационной безопасности / В. Ю. Кузнецова // Безопасные информационные технологии : сборник трудов Десятой международной научно-технической конференции. Москва, 03–04 декабря 2019 года. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 230–232. – EDN DWKHWI.
4. Кузнецова, В. Ю. Обеспечение компетентности российских школьников в вопросах криптографии: анализ целей, возможных подходов и технологий, средств их программной поддержки / В. Ю. Кузнецова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 2 (46). – С. 163–170. – EDN WXIMCQ.
5. Лапонина, О. Р. Сравнительный анализ CTF-платформ для обучения кибербезопасности / О. Р. Лапонина, В. А. Матошенко // CYBERLENINKA. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-ctf-platform-dlya-obucheniya-kiberbezopasnosti> (дата обращения: 03.03.2026).
6. Минобрнауки РФ. Приказ № 1515 от 01.12.2016 «Об утверждении профессиональных стандартов в области информационной безопасности». – Москва : Минобрнауки РФ, 2016.
7. Михалева, А. Capture the Flag (CTF) в кибербезопасности: все, что нужно знать об этой игре / Анастасия Михалева // Skillfactory Media. – URL: <https://blog.skillfactory.ru/capture-the-flag-ctf-v-kiberbezopasnosti/> (дата обращения: 02.03.2026).
8. Оценка влияния цифровизации образования на человека и безопасная среда обучения / Л. В. Баева, И. М. Ажмухамедов, С. А. Храпов [и др.]. – Москва : Т8 Издательские Технологии, 2022. – 320 с. – ISBN 978-5-521-18650-1. – EDN GKHLIB.

### References

1. Grigoriev, A., Kryukova, U. CTF in cybersecurity: everything you need to know about the game Capture the flag. *Start X*. Available at: <https://startx.team/blog/statyi/capture-the-flag-v-kiberbezopasnosti/> (accessed 03.03.2026) (In Russ.).
2. Demina, R. Yu., Azhmukhamedov, I. M. Protection of web content from illegitimate robotic copying. *Bulletin of GGNTU. Technical Sciences*, 2022, vol. 18, no. 1 (27), pp. 11–17. DOI 10.34708 / GSTOU.2022.65.43.002. EDN MEXYHY (In Russ.).

3. Kuznetsova, V. Yu. Aspects of assessing the effectiveness of training specialists in the field of information security. *Secure information technologies : proceedings of the Tenth international scientific and technical conference. Moscow, December 3–4, 2019*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2019, pp. 230–232. EDN DWKHWI (In Russ.).
4. Kuznetsova, V. Yu. Ensuring the competence of Russian schoolchildren in cryptography: analysis of goals, possible approaches and technologies, means of their software support. *Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2019, no. 2 (46), pp. 163–170. EDN WXIMCQ (In Russ.).
5. Laponina, O. R., Matoshenko, V. A. Comparative analysis of CTF platforms for training cybersecurity. *CYBERLENINKA*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-ctf-platfordmdlyaobucheniya-kiberbezopasnosti> (accessed 03.03.2026) (In Russ.).
6. Mikhaleva, A. Capture the Flag (CTF) in cybersecurity: everything you need to know about this game. *Skillfactory Media*. Available at: <https://blog.skillfactory.ru/capture-the-flag-ctf-v-kiberbezopasnosti/> (accessed 02.03.2026) (In Russ.).
7. *Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Order no. 1515 of 01.12.2016 "On approval of professional standards in the field of information security"*. Moscow, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, 2016 (In Russ.).
8. Baeva, L. V., Azhmukhamedov, I. M., Khrapov, S. A. [et al.]. *Assessing the impact of digitalization of education on a person and a safe learning environment*. Moscow, T8 Publishing Technologies, 2022. 320 p. ISBN 978-5-521-18650-1. EDN GKHLIB (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.01.2026; одобрена после рецензирования 08.02.2026; принята к публикации 08.02.2026.

The article was submitted 23.01.2026; approved after reviewing 08.02.2026; accepted for publication 08.02.2026.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 519.876.5

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ НЕДОСТОВЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Андронов Сергей Александрович*, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А, кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики, ORCID ID: 0000-0002-5438-3751, e-mail: andronov\_00@mail.ru

Фейковые новости наносят ощутимый вред в различных сферах деятельности, что свидетельствует о необходимости их изучения механизмов их появления и распространения. Статистика мониторинга фейков отмечает, что фейки обладают «сезонностью»: год от года фейки возрождаются, появляются одни и те же сообщения. Данный факт наводит на мысль о необходимости классификации поступающих ложных новостей с целью противодействия их распространению. Такая классификация может быть построена на анализе исторических данных, где в качестве признаков могут выступать дата, время жизни, инфоповод, степени вирусности, забываемости, каналы распространения, уровень противодействия, число опровержений в единицу времени и т. д. Использование созданного датасета позволит автоматизировать процессы распознавания при мониторинге новостей и мер противодействия. В статье исследуется вопрос оценки параметров фейковых новостей с использованием математических моделей распространения информации в классе систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Выполнен сравнительный анализ моделей по критерию качества представления фактических данных. Предложена методика определения диапазона изменения коэффициента информационного противодействия распространению фейковой информации для систем обыкновенных дифференциальных уравнений любой сложности, настроенных на исторические данные.

**Ключевые слова:** фейковые новости, распространение информации, информационное противодействие, системно-динамическое моделирование, Anylogic

## ASSESSING THE DEGREE OF COUNTERACTION TO THE DISSEMINATION OF FALSE INFORMATION

*Andronov Sergey A.*, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, lit. A, 67 Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russia Federation, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Systems Analysis and Logistics, ORCID ID: 0000-0002-5438-3751, e-mail: andronov\_00@mail.ru

Fake news causes significant harm in various fields, highlighting the need to study the mechanisms of its generation and dissemination. Fake news monitoring statistics indicate that fakes exhibit a "seasonal" nature: year after year, fakes resurface, with the same messages appearing repeatedly. This fact suggests the need to classify incoming fake news in order to counteract its spread. Such a classification can be based on an analysis of historical data, where the following characteristics may be used: date, lifetime, news hook, virality, forgettability, distribution channels, level of counteraction, number of refutations per unit of time, etc. Using the created dataset will allow for the automation of recognition processes when monitoring news and countermeasures. The article examines the issue of estimating the parameters of fake news using mathematical models of information dissemination in the class of systems of ordinary differential equations. Comparative analysis of models based on the quality of actual data presentation was conducted. A methodology for determining the range of variation of the information countermeasure coefficient against the dissemination of fake information for data management systems of any complexity, configured using historical data, was proposed.

**Keywords:** fake news, information dissemination, information counteraction, system dynamics modeling, Anylogic

### ВВЕДЕНИЕ

Фальшивые новости, или фейки, способны вызывать сильные эмоции и распространяться с высокой скоростью в интернете, подобно вирусу. Заметим, что распространение истинных новостей происходит значительно медленнее фейковых, что, очевидно, связано с отсутствием необходимости их купирования. На скорость распространения могут оказывать влияние высокие рейтинги новостных каналов на ТВ, собирающие большие аудитории, новостные каналы порталов российских и зарубежных СМИ, новости в мессенджерах и, конечно, может быть, даже в первую очередь, степень критического мышления аудитории. Одним из главных факторов, определяющих скорость процессов, в результате которых новость распространяется по коммуникационным каналам во времени

и в пространстве среди членов социальной системы, является межличностное общение между сторонниками данной фейковой новости и теми, кто еще колеблется или вообще ничего не слышал о ней. Известны ряд признаков вербальной идентификации фейковых новостей, на которых здесь нет смысла останавливаться. В дальнейшем будем считать, что фейковая новость благополучно распознана, но неизвестна степень ее вредоносности.

Лживые новости поступают сплошным потоком. На рисунке 1 приведены запросы при проверке фейков на ресурсе [1]. Естественно, что «завируситься» может любая, в том числе и правдивая информация, с которой бороться не требуется, а наоборот, стоит всячески поощрять. Также нет нужды бороться с очевидно безобидными ложными новостями, которыми наполнены социальные сети (например, смешными, способными лишь поднять настроение). Замечено, что существует положительная корреляция между успешным развитием экономики и распространением правдивых оптимистичных новостей, чего нельзя сказать о таком влиянии при распространении злостных фейков, вызывающих недоверие и апатию в обществе [2].



Рисунок 1 – Запросы при проверке фейковых новостей

Хорошо известна аналогия, которую можно провести между процессом развития эпидемии и процессом распространения фейковых новостей, поскольку в основе таких новостей «вирусная» природа (эмоциональное заражение). Динамика любого инфекционного процесса описывается логистической кривой в виде зависимости числа последователей от времени. В связи с отсутствием расстояния между взаимодействующими субъектами в социальных сетях, скорости распространения информации очень высоки. Поскольку с развитием эпидемий пытаются бороться, как и с распространением фейков, процесс их распространения является в некотором смысле управляемым за счёт наличия у части населения трезвого взгляда на информацию, критического мышления, действий государственных СМИ, контактов с распознавшими фейк и возможности проверки новостей на ресурсах фактчекинга.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Динамика большинства распространения фейковых новостей в современных условиях имеет вид кратковременных «всплесков» длительностью 3–5 дней [2]. При такой форме профилей распространения достаточно хорошо должны работать простые эпидемические модели в форме систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Одним из направлений исследования динамики распространения фейков является использование математических моделей развития эпидемии как в детерминированном, так и в стохастическом варианте, а также модели распространения информации в социальной сети. В частности, исследовались модели распространения слухов (в общем случае, необязательно фейковых) с учетом влияния образованности населения на критическую оценку поступающей информации.

Практически все работы в обязательном порядке включали вопросы, связанные с устойчивостью положений свободного равновесия и определением основного репродуктивного числа  $R_0$ , позволяющего оценить возможность распространения непроверенной информации в больших масштабах [3–6].

Известны также другие модели распространения информации: модели клеточных автоматов, сетевые модели на графах. В последнем случае критический порог распространения сильно зависит от свойств графа социальной сети, например: числа вершин, распределения связей, коэффициента кластеризации. Адекватность таких моделей в сильной степени зависит от выбранной модели представления графа сети и его параметров.

Зная параметры фейковых новостей, случившихся в прошлом, скорость распространения и время жизни которых уже известны, представляется целесообразным классифицировать фейковые новости по: схожести инфоповодов, степени их «вирусности» и вредоносности (параметрам распространения: скорости, времени забываемости, объема аудитории и т. д). Например, в качестве критериев оценки «вредоносности» фейковой информации можно использовать пиковое значение исторических данных для группы распространителей фейковой новости или интеграл от временного процесса данных этой группы:

$$J_1 = \max_t \frac{I(t)}{N}, J_2 = \frac{1}{N} \int_0^T I(t) dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n I(i),$$

где  $J_2$  – площадь под кривой исторических данных.

Одним из важных признаков при классификации фейковых новостей, по мнению автора, является эффективный диапазон коэффициента информационного противодействия, который позволит определить степень реакции соответствующих информ-ресурсов на минимизацию ущерба от распространения недостоверной новости. Представляется, что оценка диапазона коэффициента информационного противодействия с учетом эпидемических аналогий может быть полезна и для противодействия распространения инфекционных заболеваний.

Для классификации реакции, например, на 3 класса: 1 – «слабая», 2 – «средняя», 3 – «сильная» можно разбить диапазон изменения вышеназванного коэффициента на области в соответствии с классами, определяющими необходимый объем опровержений ложной информации в день. При определении к какой группе следует отнести «вредную» новость далее встает вопрос: какие ресурсы и в какой степени должны быть задействованы для борьбы с вредными новостями.

Для решения задачи оценки диапазона изменения коэффициента информационного противодействия требуется предварительно выполнить оценку параметров ряда математических моделей распространения информации с использованием фактических данных распространения фейковой информации. Это позволит также выбрать наилучшую структуру модели.

В качестве программного инструмента используется система имитационного моделирования Anylogic [7], которая поддерживает системную динамику и обеспечивает возможность проведения различных экспериментов с моделью, таких как: анализ чувствительности, сравнение прогонов, метод Монте-Карло и оптимизационный эксперимент. Для контроля решений применялась программная среда решения систем дифференциальных уравнений (СДУ) Maple [8], в котором уравнения можно записать наглядно в привычном общепринятом виде.

### МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

В процессе настоящего исследования выполнялись эксперименты в программе Anylogic с использованием следующего исторических данных о распространении фейков и их копий при пандемии коронавируса о том, что вируса не существует и он есть результат заговора (рис. 2) [2].



Рисунок 2 – Динамика распространения данных о том, что «коронавируса не существует»

### 1. МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Ниже приводятся модели в классе СДУ, описывающие количественное распространение информации:

**Модель 1.** Классическая эпидемиологическая SIR (Susceptible-Infected-Recovered).

Идеализация в этой модели основана на аналогии с химической кинетикой, где скорость протекания реакции пропорциональна произведению концентраций реагентов.

Предполагается, что скорость изменения численности популяции здоровых пропорциональна произведению численностей здоровых и зараженных. В наиболее простом ее варианте предполагается, что система замкнута, т. е. численность популяции  $N$  не меняется:

$$S(t) + I(t) + R(t) = \text{const} = N,$$

где  $S$  – восприимчивые;

$I$  – «инфицированные» (получившие и распространяющие фейковую информацию);

$R$  – «невосприимчивые» (обладающие критическим мышлением, чтобы противостоять воздействию фейка и не распространяющие его).

Модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -k \cdot \beta \frac{S \cdot I}{N}, \\ \frac{dI}{dt} &= k \cdot \beta \frac{S \cdot I}{N} - \gamma \cdot I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma \cdot I, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $dS/dt$  – скорость передачи фейковой информации;

$dI/dt$  – скорость пополнения группы «инфицированных»;

$dR/dt$  – скорость пополнения группы преодолевших воздействие фейковой новости;

$\gamma$  – средняя скорость перехода из группы распространителей в группу невосприимчивых под действием опровержений СМИ и каналов фактчекинга в единицу времени (соответственно,  $1/\gamma$  – время, за которое индивид распространяет фейковую информацию);

$I(t)/N$  – вероятность получить фейковую новость и стать «фейкометом».

Начальные условия:  $S(0) \geq 0$ ,  $I(0) \geq 0$ ,  $R(0) \geq 0$ .

Рассмотрим более подробно параметр «публикационной активности»  $\beta$ , определяющий скорость распространения (число сообщений людям, которые отправляет один человек, с которого начинается передача фейковой новости).

Следуя книге [9]:

$$\beta = c p,$$

где  $c$  – число контактов в единицу времени;

$p$  – вероятность поверить фейку и стать потенциальным «фейкометом».

#### АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ SIR-МОДЕЛИ

Если при моделировании эпидемий некоторые параметры, например скорость заражения, могут быть известны или измерены непосредственно, то в случае распространения фейковой информации в силу высокого разнообразия новостей, эти параметры могут быть определены лишь на основе исторических данных.

Априорная оценка параметров математических моделей помогает провести разведочный многовариантный анализ модели в эксперименте Anylogic – «Сравнение «прогнозов».

В отсутствии данных временных процессов распространения информации можно опереться на данные статистики опросов населения, приведенные в [2].

Попробуем грубо оценить параметры простой SIR-модели. Предположим  $N = 1000$ ,  $k = 1$  (если противоборство отсутствует), часть популяции не верит информации, транслируемой по каналам государственных СМИ изначально, тогда можно предположить, что  $I(0) \geq 1$  (пусть, к примеру, 10 % от  $N$ , тогда  $I(0) = 100$ ),  $S(0) = N - I(0) = 900$ .

Переходя к безразмерным переменным с учетом выявленной по опросам способности 64 % «восприимчивых» отличить фейковую новость и соответственно 36 %, данной способностью не обладающих, для оценки параметра скорости распространения  $\beta$  можем записать:

$$\frac{S_{\max} d\bar{s}}{T_{\max} d\bar{t}} = k \cdot \beta \frac{S_{\max} \cdot \bar{s} \cdot I_{\max} \cdot \bar{t}}{N},$$

$$S_{\max} = 0,9 N; I_{\max} = 0,1 N, T_{\max} = 24 \text{ час.}$$

$$\frac{0,36 \cdot 0,9 \cdot N \, d\bar{s}}{24 \, d\bar{t}} = 1 \cdot \beta \frac{0,36 \cdot 0,9 \cdot N \cdot 0,1 \cdot N \cdot \bar{t}}{N},$$

$$\frac{R_{\max} \, d\bar{r}}{T_{\max} \, d\bar{t}} = I_{\max} \cdot \gamma,$$

$$\frac{0,64 \cdot N}{24} = 0,1 \cdot N \cdot \gamma.$$

Учитывая, что все безразмерные оценки, включая производную, порядка единицы,  
 $\beta^* \approx 1,157$  (1/час).

Параметр  $\gamma$  имеет смысл доли восприимчивых, переходящих в категорию «заглушителей» за единицу времени, поэтому:

$$\frac{R_{\max} \, d\bar{r}}{T_{\max} \, d\bar{t}} = I_{\max} \cdot \gamma,$$

$$\frac{0,64 \cdot N}{24} = 0,1 \cdot N \cdot \gamma,$$

откуда  $\gamma \approx 0,27$ . Можно отметить, что найденные оценки имеют тот же порядок, как и оценки в приведенной ниже таблице 1, сформированной по фактическим данным.

В работе [9] приведены полезные для дальнейшего рассмотрения зависимости, связанные с SIR-моделью. Так, выражение для максимального значения группы инфицированных  $I(t)$  имеет вид:

$$I_{\max} = N - \sigma + \ln \frac{\sigma}{S_0},$$

где  $\sigma = \gamma/\beta$ ;  $S_0 = S(0)$ .

Максимум траектории временного процесса достигается при  $S_0 = \sigma$ . При  $S_0 < \sigma$  «заражения» не возникает. С учетом коэффициента противодействия  $k$  это соответствует неравенству  $S_0 < \gamma/(\beta k)$ . Откуда следует, что при  $k$  менее  $\gamma/(\beta S_0)$  распространения ложной информации не возникает. Это граничное значение  $k$  совпадает с характерным параметром SIR-модели – основным репродуктивным числом  $R_0 = \sigma/N$ , поскольку обычно считают  $S_0 = N$ .

При  $R_0 < 1$  распространение информации не происходит по определению. Для определения нижней границы начала распространения интересует противоположное ограничение, т. е.  $\gamma/(\beta S_0) \leq k < 1$ , когда требуется противодействие. Однако, как будет показано ниже, реальное распространение начинается с более высоких значений коэффициента противодействия  $k$ , которое и требуется определить.

В книге [9] также приведено выражение для той части популяции, которая остается не подверженной «заражению», что соответствует проценту популяции, которую можно не вакцинировать:

$$P > 1 - \frac{1}{R_0}.$$

Последнее можно интерпретировать как долю населения, которую можно не «вразумлять» разоблачениями ложной информации.

**Модель 2** (назовем этот вариант SIRS («расширенная»)).

В [10] исследуется модель когнитивной перегрузки небольшой учебной группы, где было подмечено, что слагаемое  $\alpha SR$  соответствует группе аудитории, которая сразу переходит из группы  $S$  в группу  $R$  («подверженных» в группу «заглушителей»), минуя группу «инфицированных». Модель имеет вид:

$$\frac{dS}{dt} = -k \cdot \beta \frac{S \cdot I}{N} + \alpha \cdot \frac{S \cdot R}{N},$$

$$\frac{dI}{dt} = k \cdot \beta \frac{S \cdot I}{N} - \gamma \cdot I,$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma \cdot I - \alpha \cdot \frac{S \cdot R}{N},$$
(2)

где  $k$  – коэффициент противодействия;  
 $\beta$  – эффективное число контактов;  
 $\gamma$  – коэффициент «выздоровления»;  
 $\alpha$  – неэффективное число контактов в единицу времени.

В контексте решаемой задачи коэффициент  $\alpha$  можно трактовать как коэффициент потенциальной защищенности для тех, у кого присутствует критическое мышление.

**Модель 3.** Кендалла (модель «распространения слухов») [4].

Модель Кендалла для слухов (Kendall's rumor model) описывает их распространение. В отличие от SIR модель Кендалла фокусируется на информационных процессах. Здесь слух может просто

быть забыт и нет фазы «иммунитета к слухам», как в SIR. Вся популяция делится на три группы:  $S$  (Susceptible) – группа, начинающая распространение информации (группа незнающих – «невежественное» население) – уникальные фейки (посты),  $I$  (Infector/Infected) – группа людей «говорящих/слушающих», продолжающая распространение информации после ее принятия (репосты),  $R$  (Removed) – группа людей «забывающих», т. е. когда распространитель взаимодействует с «заглушителем», слух прекращает распространяться.

Слухи могут передаваться между говорящими и слушателями, поэтому в данной модели динамика более сложная, чем в SIR: она зависит от частоты контактов, скорости забывания и может иметь пики и спады. Модель имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -k \cdot \beta \frac{S \cdot I}{N} + \alpha \cdot (N - S), \\ \frac{dI}{dt} &= k \cdot \beta \frac{S \cdot I}{N} - \gamma \cdot \frac{I \cdot (I + R)}{N} - \alpha \cdot I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma \cdot \frac{I \cdot (I + R)}{N} - \alpha \cdot R,\end{aligned}\quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент противодействия фейковой информации;

$\alpha$  – степень принятия фейка;

$\beta/N$  – вероятность распространения фейка между незнающим и распространителем;

$\gamma/N$  – вероятность потери ценности полученной информации, т. е. информация передается только до того момента, пока она имеет свою ценность.

В [8] приведено выражение репродуктивного числа для модели Кендалла (нижняя граница для  $k$  при оптимизационных экспериментах с критерием  $J_1$ ):

$$R_0 = \frac{\alpha N (\beta + \gamma)}{\alpha \gamma N + \alpha^2}.\quad (4)$$

При  $R_0 < 1$  положение равновесия  $E_0 = (S(0), I(0), R(0) = (N, 0, 0))$  является устойчивым (когда в популяции нет ни одного распространителя или  $I = 0$ ).

**Модель 4.** Модель S2IR [11].

В общем случае модель распространения информации может включать имитацию потока распространения как правдивых, так и ложных новостей. Предполагается, что во всей популяции есть два типа распространителей, которые называются распространителями фейков и распространителями истины соответственно. Вся популяция разделена на четыре различных группы: «несведущие», распространяющие фейки, распространяющие правду и «переубежденные», обозначены  $S(t)$ ,  $I^+(t)$ ,  $I^-(t)$ ,  $R(t)$  соответственно. Когда несведущий контактирует с распространителем истины, несведущий становится другой стороной со скоростью  $\beta^+$ . В противном случае, если он контактирует с распространителем фейков, несведущий становится другой стороной со скоростью  $\beta^-$ . Когда распространитель истины контактирует с распространителем фейков, они удаляются с вероятностью  $\alpha^+$  и  $\alpha^-$ . Распространители ( $I^+I^-$ ) спонтанно удаляются со скоростью  $(\gamma^+|\gamma^-)$  при потере интереса.

Данный нюанс учтен в модели:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -k \cdot \beta^- \frac{S \cdot I^-}{N} - \beta^+ \frac{S \cdot I^+}{N} - \mu_1 \cdot S, \\ \frac{dI^+}{dt} &= \beta^+ \frac{S \cdot I^+}{N} - \alpha^+ \frac{I^+ \cdot I^-}{N} - \gamma^+ \cdot I^+ - \mu_2 \cdot I^+, \\ \frac{dI^-}{dt} &= k \cdot \beta^- \frac{S \cdot I^-}{N} - \alpha^- \frac{I^+ \cdot I^-}{N} - \gamma^- \cdot I^- - \mu_3 \cdot I^-, \\ \frac{dR}{dt} &= \alpha^+ \frac{I^+ \cdot I^-}{N} + \alpha^- \frac{I^+ \cdot I^-}{N} + \gamma^+ \cdot I^+ + \gamma^- \cdot I^- - \mu_4 \cdot R,\end{aligned}\quad (5)$$

где  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$  – естественная скорость угасания и восстановления для «невежественных», распространяющих фейки и распространяющих правду соответственно;

$\beta^+, \beta^-$  – сила заражения от невежественных к распространителям фейков и распространяющим правду соответственно;

$\alpha^+$  – скорость угасания и восстановления, когда распространитель фейков распространяет фейк к распространителю истины;

$\alpha^-$  – скорость угасания и восстановления, когда распространитель правды распространяет правду к распространителю фейков;

$\gamma^+, \gamma^-$  – скорость забывания распространителя фейков и распространителя истины соответственно.

Начальные условия для системы (4):  $S(0) > 0, I^+(0) \geq 0, I^-(0) \geq 0, R(0) \geq 0$ .

В качестве иллюстрации на рисунке 3 и рисунке 4 приведены схема системной динамики для модели S2IR в программе Anylogic и пример задания этой модели в Maple соответственно.

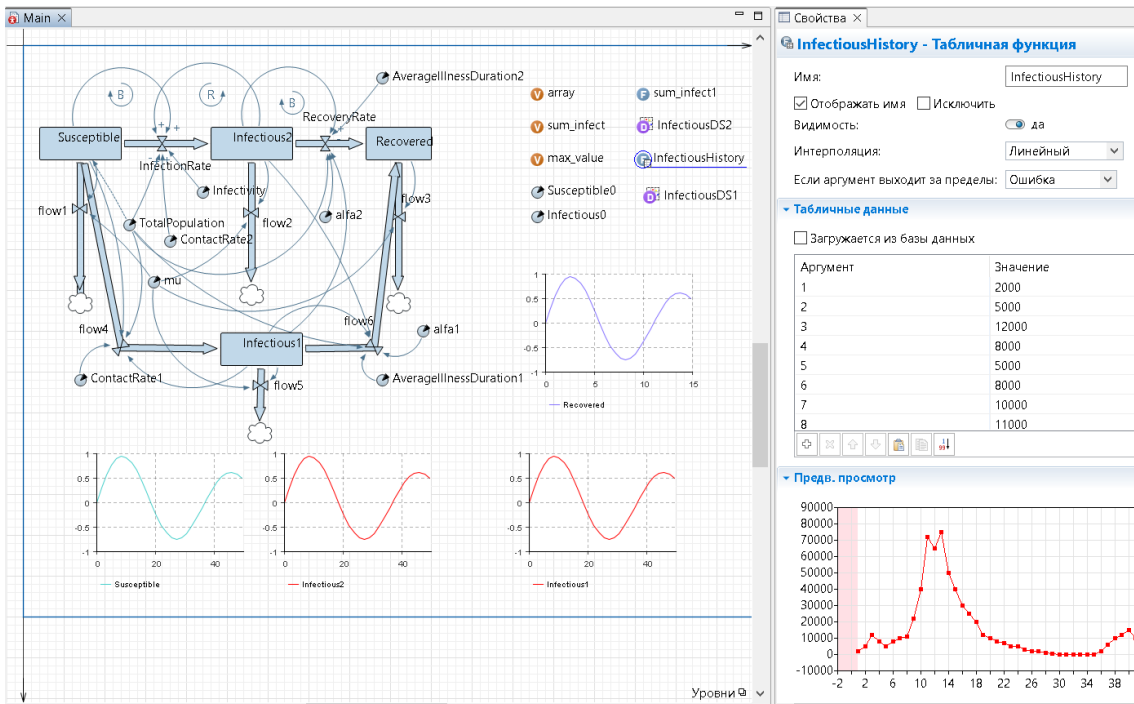


Рисунок 3 – Схема модели S2IR в Anylogic

$$\begin{aligned}
 ODE := S'(x) &= -k \frac{\beta_2 S(x) \cdot I_2(x)}{N} - \frac{\beta_1 S(x) \cdot I_1(x)}{N} - \mu_1 S(x), \quad I_1'(x) = \frac{\beta_1 S(x) \cdot I_1(x)}{N} - \frac{\alpha_1 I_2(x) \cdot I_1(x)}{N} - \gamma_1 I_1(x) - \mu_2 I_1(x), \\
 I_2'(x) &= k \frac{\beta_2 S(x) \cdot I_2(x)}{N} - \frac{\alpha_2 I_2(x) \cdot I_1(x)}{N} - \gamma_2 I_2(x) - \mu_3 I_2(x), \quad R'(x) = \frac{\alpha_1 I_2(x) \cdot I_1(x)}{N} + \frac{\alpha_2 I_2(x) \cdot I_1(x)}{N} + \gamma_1 I_1(x) + \gamma_2 I_2(x) - \mu_4 R(x); \\
 ODE := \frac{d}{dx} S(x) &= -\frac{k \beta_2 S(x) I_2(x)}{N} - \frac{\beta_1 S(x) I_1(x)}{N} - \mu_1 S(x), \quad \frac{d}{dx} I_1(x) = \frac{\beta_1 S(x) I_1(x)}{N} - \frac{\alpha_1 I_2(x) I_1(x)}{N} - \gamma_1 I_1(x) - \mu_2 I_1(x), \quad \frac{d}{dx} I_2(x) = \frac{k \beta_2 S(x) I_2(x)}{N} - \frac{\alpha_2 I_2(x) I_1(x)}{N} - \\
 &\mu_3 I_2(x), \quad \frac{d}{dx} R(x) = \frac{\alpha_1 I_2(x) I_1(x)}{N} + \frac{\alpha_2 I_2(x) I_1(x)}{N} + \gamma_1 I_1(x) + \gamma_2 I_2(x) - \mu_4 R(x)
 \end{aligned}$$

$\beta_1 := 17.32; \beta_2 := 1.67; \mu_1 := 0.048; \mu_2 := 0.048; \mu_3 := 0.048; \mu_4 := 0.048; \alpha_1 := 1.68; \alpha_2 := 26.55; \gamma_1 := 0.057; \gamma_2 := 0.053; N := 100000; k := 1;$

Рисунок 4 – Задание модели S2IR в Maple

В модели S2IR авторы [11] предполагали, что противодействие со стороны правительства выделено в отдельную группу  $I^+(t)$ . Здесь это дополнительное противодействие распространению фейковой новости со стороны респондентов, способных отличить фейк от истины, которые способны переубеждать распространителей фейка. При расчетах по модели (5) для упрощения было принято, что  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu$ .

**Модель 5. Агентная SIR-модель [8].**

В этой модели каждый человек имеет 3 возможных состояния по названиям групп модели 1. Человек может контактировать с другим человеком, и если один восприимчив, а другой – распространитель фейка, первый может с определенной вероятностью превратиться в распространителя. Поскольку модель является стохастической, калибровка проводится в условиях неопределенности и используются репликации моделирования. Для демонстрации результатов модель содержит отдельный эксперимент Монте-Карло первого порядка.

**2. ЗАДАЧИ И КРИТЕРИИ**

Процедура оценки параметров моделей записывается в виде стандартной оптимизационной задачи аппроксимации по МНК:

$$J(p) = \|Y(p)\|_p = \sum_{i=1}^N (y(t_i, p) - \tilde{y}_i)^2,$$

где  $Y(p)$  – вектор невязок;

$y(t_i, p)$  – значения выходных данных моделей моменты времени  $t_i$ ;

$\tilde{y}_i$  – наблюдаемые значения некоторой компоненты вектора  $y$  в момент  $t_i$ .

Задача состоит в оценке  $\hat{p}$  вектора  $p$ . Оценки параметров определяются в результате решения задачи:

$$J(p) \rightarrow \min_p.$$

Следующим шагом после калибровки моделей целью была оценка диапазона изменения коэффициента информационного противодействия  $k$ . Обозначим  $k^*$  верхнюю границу порога коэффициента противодействия фейку, когда его распространение не происходит ( $0 \leq R_0 \leq k \leq k^*$ ). Чем уже этот диапазон, тем меньше усилий надо потратить на противодействие распространению.

Для этого на простой SIR-модели для определения границы  $k^*$  выполнялся оптимизационный эксперимент с критерием  $J_1 = \max I(t)/N$  – максимальная вероятность принять фейковую новость:

$$J_1 = \max_t \frac{I(t)}{N} \rightarrow \min_k, \\ \frac{\gamma}{\beta S_0} \leq k \leq 1.$$

Ограничение здесь введено для чистоты эксперимента, хотя решение остается всегда больше левой границы (достижение минимума наступает раньше, чем решение «ляжет» на левую границу).

Альтернативный критерий:

$$J_2 = \frac{1}{N} \int_0^T I(t) dt \rightarrow \max_k, \\ I(t) \leq I_0,$$

при тех же калибровочных параметрах приводил к тому же результату для  $k^*$ .

Для повышения наглядности также был выполнен ряд экспериментов для анализа чувствительности критерия к параметрам модели, а именно, решалась задача:

$$u_p = \frac{\partial J_1}{\partial p} \approx \frac{\Delta J_1}{\Delta p},$$

где вектор  $p = (k, \alpha)$ .

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

#### 1. Калибровка.

Разнообразие фейковых новостей и их профилей во времени требует индивидуального подхода. Первым шагом выполнялись калибровочные эксперименты для оценки вектора параметров  $p = (\beta, \gamma, \dots)$  при  $k = 1$  моделей (1–5) на основе представленных фактических данных (рис. 2).

Значение ошибки МНК  $\varepsilon_{\text{МНК}}$ , по которой можно судить о качестве оценивания при сравнении моделей, приведено в таблице 1. Наилучшим образом на наборе данных показала себя простая SIR-модель (рис. 5). Близкий ей результат также демонстрирует SIRS-модель.

#### SIR : Calibration

	Текущее	Лучшее
Итерация:	500	498
Функционал ↓	6,685,082	6,428,697
<b>Параметры</b>	Copy best	
TotalPopulation	100,000	100,000
Infectivity	1	1
ContactRate	1.4	1.359
AverageIllnessDuration	5.4	5.414

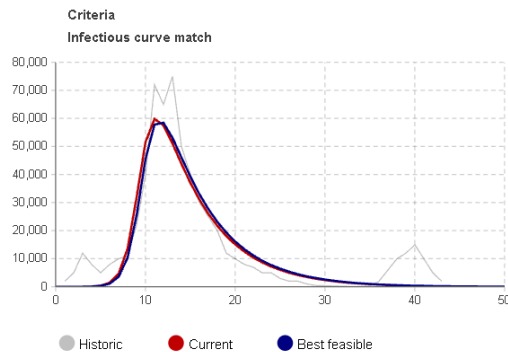
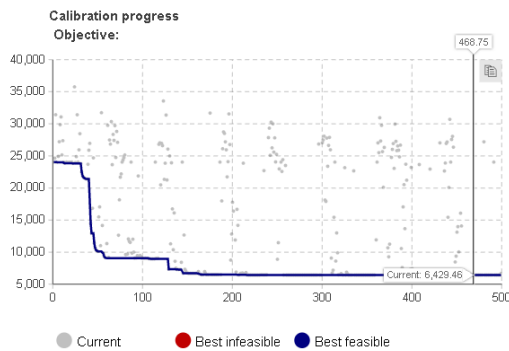


Рисунок 5 – Результат калибровки простой SIR-модели

Модель Кендалла при калибровке на используемых исторических данных показала низкий результат, что наблюдается визуально на рисунке 6, а также следует из оценки функционала в таблице. По-видимому, это связано с применением модели к более длительным процессам распространения информации. Модель S2IR при калибровке качественно воспроизводит фактические данные, но ошибка их аппроксимации значительно превышает соответствующие ошибки 2-х первых двух моделей.

Также была предпринята попытка калибровки агентной SIR-модели 5, которая продемонстрировала недопустимо медленную работу при фактическом количестве агентов, требуемых при использовании исторических данных. Коррекция фактических данных является плохой практикой в задачах оценивания параметров моделей. При этом также становится невозможно сравнивать найденную ошибку с ошибками для других моделей, обученных на реальном наборе. На рисунке 7 приведена иллюстрация неудачной калибровки этой модели на уменьшенном в 100 раз объеме распространителей фейка.

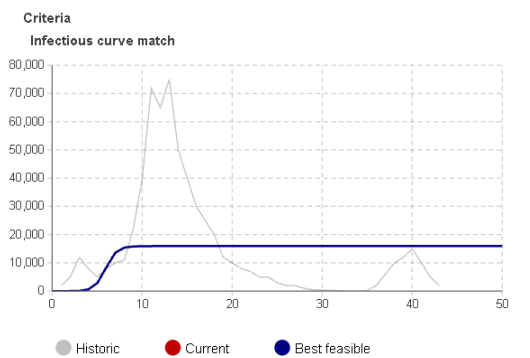


Рисунок 6 – Калибровка модели Кендалла

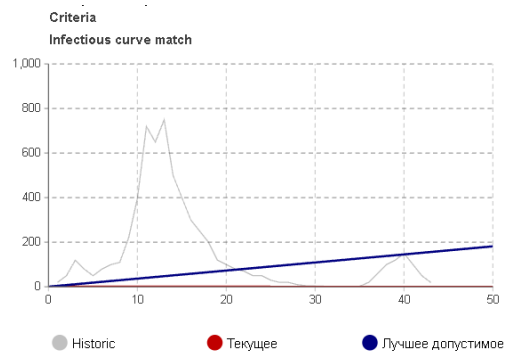


Рисунок 7 – Калибровка агентной модели SIR

## 2. Моделирование.

Для всех рассмотренных моделей до и после оптимизационного эксперимента выполнялось численное интегрирование в модельном эксперименте Anylogic. Для примера на рисунках 8 и 9 приведены траектории «инфекционного» процесса для простой SIR-модели с  $k = 1$  (ничего не делать) и  $k^* = 0,125$ , когда распространения не происходит.

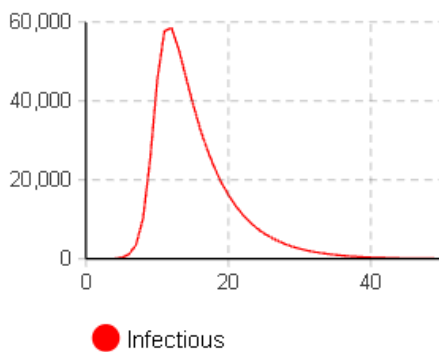


Рисунок 8 – График  $I(t)$  при  $k = 1$

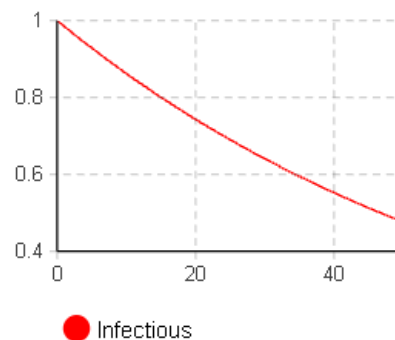


Рисунок 9 – График  $I(t)$  при  $k^* = 0,125$

При модельном эксперименте с SIRS при найденных  $\gamma$  и  $\beta$  (табл. 1) с ростом параметра, отвечающего за критическое мышление  $\alpha$ , значение критерия  $J_I$  существенно уменьшается: при увеличении его в 100 раз максимальное значение число распространителей 57872 снижается до 25 человек. Также снижается время жизни фейковой информации.

### 3. Чувствительность.

На рисунке 10 приведен пример оценки чувствительности критерия  $J_I$  к коэффициенту  $k$  в простой SIR-модели, что визуально показывает значение  $k$ , при котором происходит начало распространения. Из рисунка 10 следует, что чем больше параметр  $\alpha$  в модели SIRS, тем ниже значение критерия  $J_I$ .

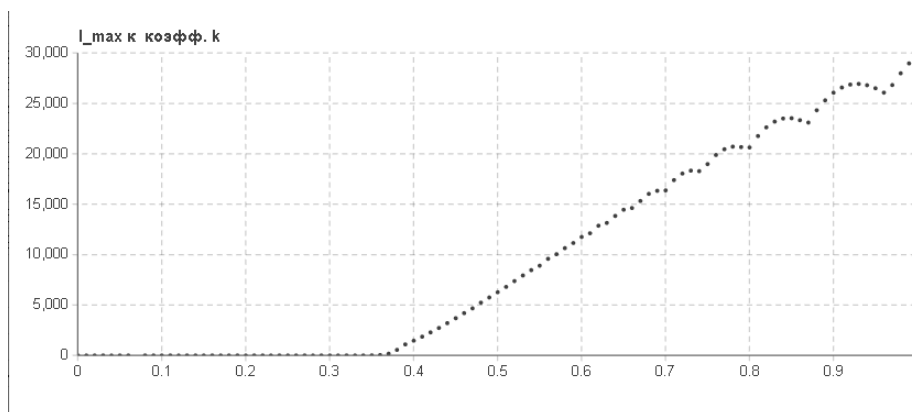


Рисунок 10 – График чувствительности  $J_I$  к коэффициенту  $k$

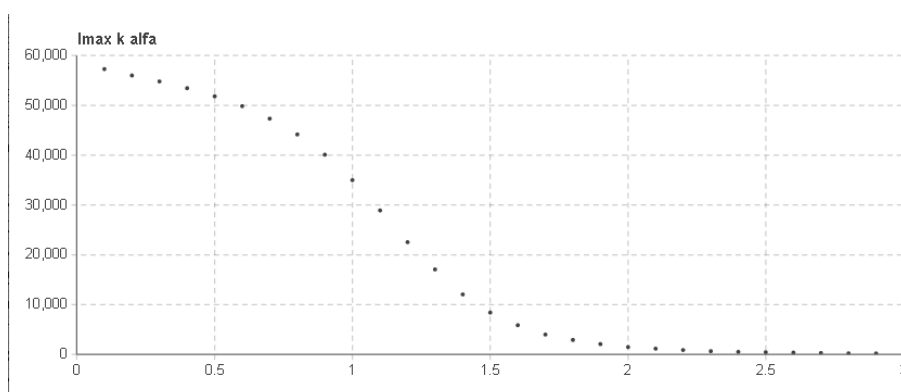


Рисунок 11 – График чувствительности  $J_I$  к параметру  $\alpha$

В то же время оценка чувствительности критерия  $J_I$  в S2IR-модели к изменению  $\alpha^-$  (степень убеждения распространителей фейка) оказалась весьма низкой. Увеличение  $\alpha^-$  (в 25 раз относительно результатов калибровки) на используемом наборе данных дает снижение только на 0,04 % (рис. 12).

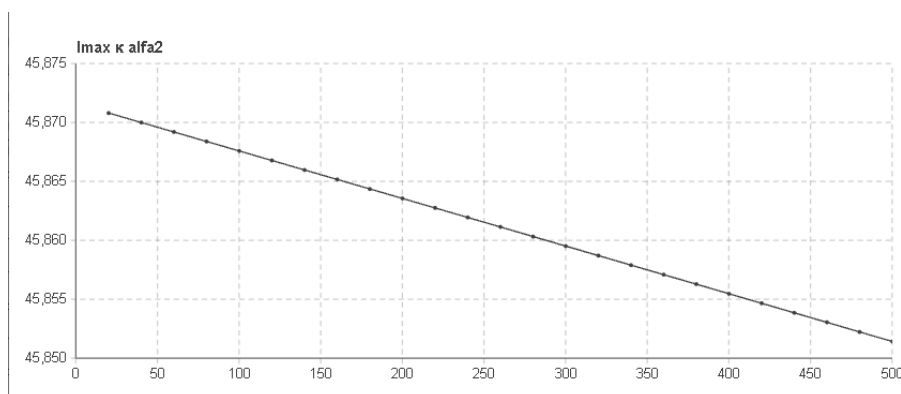


Рисунок 12 – График чувствительности  $J_I$  к параметру  $\alpha^-$

Таблица – Оценки параметров моделей

Мо- дель	min $\varepsilon$ (мнк)	$k^*$	$\beta$	$1/\gamma$	$\alpha$	$\beta^+$	$\beta^-$	$1/\gamma^+$	$1/\gamma^-$	$\alpha^+$	$\alpha^-$	$\mu$	$u_k$
SIR	6428	0,125	1,36	5,41	–	–	–	–	–	–	–	–	0,2
SIRS	6474	0,125	1,36	5,57	0,05	–	–	–	–	–	–	–	0,4
Кен- далл	18906	0,5	9,84	3,11	8,21	–	–	–	–	–	–	–	0,87
S2IR	9978	0,062	–	–	–	17,32	1,67	17,36	18,71	1,68	26,55	0,048	0,13

В таблице  $k^*$  – нижняя граница, найденная в результате поиска при найденных оценках параметров,  $u_k$  – оценка чувствительности (нижняя граница значения  $k$ , при котором начинается значительный рост  $J$ , от  $I(0)$  при заданных параметрах моделей).

Другие исторические данные, очевидно, дают иные значения калибровочных параметров, поэтому для более детального анализа надо было выполнить анализ чувствительности коэффициента  $k$  при вариации на сетке параметров модели.

Семейство графиков зависимости коэффициента распространения  $k$  на сетке фактических параметров для простой SIR-модели идеально описывается степенной функцией (рис. 13) и демонстрирует расширение диапазона коэффициента  $k$  с ростом времени  $1/\gamma$ , за которое индивид распространяет информацию при разных скоростях распространения. На рисунке 14 показана линейная зависимость коэффициента распространения  $k$  от критического параметра  $\sigma = \gamma/\beta$ .

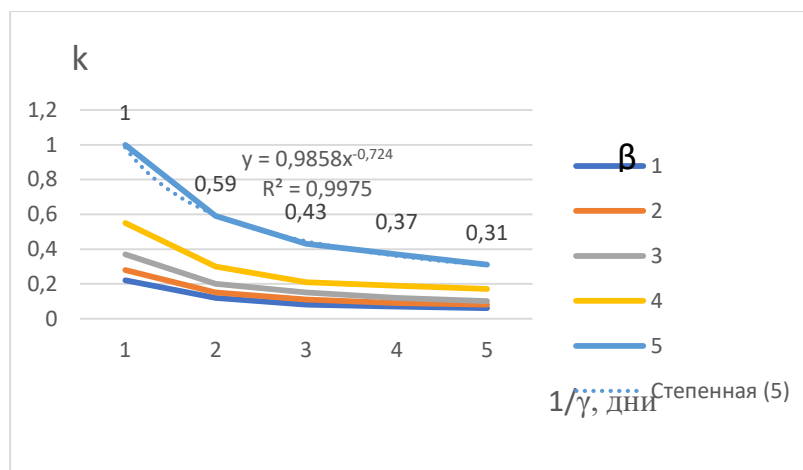


Рисунок 13 – Семейство графиков зависимости коэффициента распространения на сетке параметров SIR

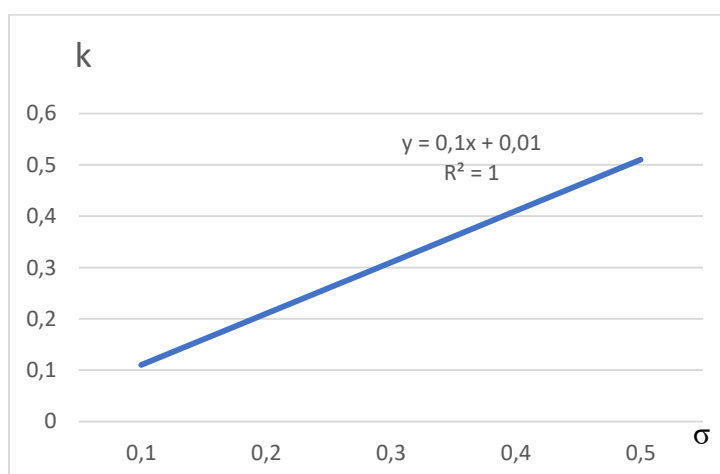


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента распространения

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика определения диапазона коэффициента информационного противодействия распространению фейковой информации  $k$  для моделей любой сложности в классе СДУ, настроенных на исторические данные. Наилучшие результаты показала простая эпидемическая SIR-модель. Вне диапазона названного коэффициента выбранный критерий является нечувствительным

к распространению информации. Были рассмотрены оценки чувствительности выбранного критерия к ряду других параметров распространения информации.

Представляется, что оценка эффективного диапазона изменения коэффициента информационного противодействия будет основой при создании датасета для решения задачи классификации новостей по степени вредности и соответствующей реакции государственных СМИ, например, на 3 класса: 1 – «слабая» ( $0,8 \leq k < 1$ ), 2 – «средняя» ( $0,5 \leq k < 0,8$ ), 3 – «сильная» ( $k^* \leq k < 0,5$ ). Решение названной задачи должно обеспечить автоматизм при определении реакции на вновь поступающие фейки и минимизировать ущерб от их распространения. Представляется также, что предлагаемый подход с учетом существующих аналогий может быть полезен при противодействии распространению эпидемий, а также компьютерных вирусов.

#### Список источников

1. Google Trends data. – URL: <https://trends.google.com/trends/> (дата обращения: 05.12.2025).
2. Пономарева, В. В. Анализ распространения фейковой информации и её социально-экономические последствия / В. В. Пономарева, С. А. Андронов // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 5 (48). – С. 64–73. DOI 10.31799/2077-5687-2025-5-64-73.
3. Kermack, W. O. A contribution to the mathematical theory of epidemics / W. O. Kermack, A. G. McKendrick // P. R. Soc. Lond. A. – Conta. – 1927. – Vol. 115, issue 772. – P.700–721.
4. Daley, D. J. Epidemics and Rumours / D. J. Daley, D. G. Kendall // Nature. – 1964. – Vol. 204. – P. 1118. – URL: <https://doi.org/10.1038/2041118a0> (дата обращения 05.12.2025).
5. Дунин, В.С. Моделирование анализа и прогнозирования информационного противодействия в социуме на основе имитационной среды ANYLOGIC / В. С. Дунин, Д. И. Чемарев // Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра : сб. статей по материалам V Международной научно-практической конференции. – Москва, 2022. – С.127–133.
6. Горковенко, Д. К. Сравнительный анализ моделей эпидемии и клеточного автомата при моделировании распространения информации в социальных сетях / Д. К. Горковенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 103–113. – DOI 10.18721/JCSTCS.10309.
7. Система имитационного моделирования AnyLogic. – URL: <http://www.xjtek.ru/anylogic> (дата обращения 05.12.2025).
8. What is Maple. – URL: <https://www.maplesoft.com/products/Maple/> (дата обращения 05.12.2025).
9. Братусь, А. С. Динамические системы и модели биологии / А. С. Братусь, А. С. Новожилов, А. П. Платонов. – Москва : Физматлит, 2010. – 400 с. – ISBN 978-5-9221-1192-8.
10. Корчажкина О. М. SIR-модель как инструмент исследования деструктивных процессов при усвоении нового знания / О. М. Корчажкина // Systems and Means of Informatics. – 2021. – Vol. 31, № 1. – С. 168–180.
11. Yujiang, Liu. Dynamics of a New Rumor Propagation Model with the Spread of Truth / Yujiang Liu, Chunmei Zeng, Youquan Luo, Applied Mathematics. – May 2018. – Vol. 9, № 5. – P. 536–549.

#### References

1. Google Trends data. Available at: <https://trends.google.com/trends/> (accessed 05.12.2025).
2. Ponomareva, V. V., Andronov, S. A. Analysis of the spread of fake information and its socio-economic consequences. *System Analysis and Logistics*, 2025, no. 5 (48), pp. 64–73. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-64-73 (In Russ.).
3. Kermack, W. O., McKendrick, A. G. Contribution to the mathematical theory of epidemics. *P. R. Soc. Lond. A. – Konta*, 1927, vol. 115, issue 772, pp. 700–721.
4. Daley, D. J., Kendall, D. G. Epidemics and rumors. *Nature*, 1964, 204. 1118. Available at: <https://doi.org/10.1038/2041118a0> (accessed 05.12.2025).
5. Dunin, V. S., Chemarev, D. I., Development of analysis and implementation of software in a system based on the ANYLOGIC intellectual environment. *Information security: yesterday, today, tomorrow : collection of articles of the V scientific and practical international conference*. Moscow, 2022, pp. 127–133 (In Russ.).
6. Gorkovenko, D. K. Comparative analysis of epidemic and cellular automaton models in modeling information dissemination in social networks. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Pedagogical University. Computer science. Telecommunications. Management*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 103–113. DOI 10.18721/JCSTCS.10309 (In Russ.).
7. AnyLogic intelligent control system. Available at: <http://www.xjtek.ru/anylogic> (accessed 05.12.2025) (In Russ.).
8. What is Maple. Available at: <https://www.maplesoft.com/products/Maple/> (accessed 05.12.2025).
9. Bratus, A. S., Novozhilov, A. S., Platonov, A. P. *Alexander Sergeevich Bratus. Dynamic systems and models of biology*. Moscow, Publishing House, 2010. 400 p. ISBN 978-5-9221-1192-8 (In Russ.).
10. Korchazhkina, O. M. SIR-modeler as a specialist in computer science systems and tools. *Systems and Means of Informatics*, 2021, volume 31, no. 1, pp. 168–180 (In Russ.).
11. Yujiang, Liu, Chunmei, Tseng, Yuquan, Luo. Dynamics of a new model of spreading rumors with spreading the truth. *Applied Mathematics*, May 2018, vol. 9, no. 5, pp. 536–549.

Статья поступила в редакцию 23.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 02.02.2026.

The article was submitted 23.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 02.02.2026.

УДК 004

## **РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАДМИРОВАНИЯ С НАНОДОБАВКАМИ**

*Курбанназаров Максат Реджепович*, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,

магистрант, ORCID: 0009-0009-2534-1606, e-mail: maksat.23561@gmail.com

*Литовка Юрий Владимирович*, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,

профессор, доктор технических наук, ORCID: 000-0002-5792-340X, e-mail: polychem@list.ru

В статье представлена разработка интеллектуальной системы для многокритериальной оптимизации процесса гальванического кадмирования с использованием нанодобавок (наноалмазов, углеродных нанотрубок и оксида графена), направленной на повышение коррозионной стойкости покрытий и снижение затрат. Научная новизна работы заключается в использовании комплексного подхода к проектированию процесса кадмирования, который интегрирует методы машинного обучения (глубокая нейронная сеть) и многокритериальную оптимизацию (метод Парето-фронта), создавая единую программную систему, которая реализует метод Парето для поиска оптимальных решений, сочетая минимизацию стоимости покрытия (R1) и максимизацию коррозионной стойкости (R2). В основе программного обеспечения лежит глубокая нейронная сеть, обученная на экспериментальных данных, которая прогнозирует свойства покрытий, а интерактивный интерфейс на базе Tkinter обеспечивает визуализацию Парето-фронта и анализ результатов. В работе показана эффективность системы в выборе композиций наноматериалов, обеспечивающих наилучшее соотношение затрат и защитных свойств, что делает ее практичным инструментом для исследований и промышленного применения.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система, гальваническое кадмирование, наномодифицированные покрытия, нанодобавки, коррозионная стойкость, многокритериальная оптимизация, Парето-фронт, нейронная сеть, машинное обучение, наноалмазы, углеродные нанотрубки, оксид графена, затраты, TensorFlow, Tkinter

## **THE DEVELOPMENT OF AN INTELLECTUAL SYSTEM FOR GALVANIC CADMIUM PLATING PROCESS USING NANOMATERIALS**

*Kurbannazarov Maksat R.*, Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

master's student, ORCID: 0009-0009-2534-1606, e-mail: maksat.23561@gmail.com

*Litovka Yuri V.*, Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation, Professor,

Doct. Sci. (Engineering), ORCID: 000-0002-5792-340X, e-mail: polychem@list.ru

This paper presents the development of an intelligent system for multi-criterial optimization of the galvanic cadmium plating process using nanomaterials (nanodiamonds, carbon nanotubes, and graphene oxide), aimed at increasing the corrosion resistance of coatings and reducing production cost. The scientific novelty of this work lies in the integration of machine learning methods (deep neural network) with multi-criterial optimization (Pareto front method), creating a unified software system. The system finds optimal solutions through minimizing coating cost (R1) and maximizing corrosion resistance (R2). The software is based on a deep neural network trained on experimental data that predicts coating properties, and an interactive Tkinter-based interface provides visualization of the Pareto front and analysis of the results. The work demonstrates the effectiveness of the system in selecting nanomaterial compositions that provide the best balance between cost and protective properties, making it a practical tool for research and industrial applications.

**Keywords:** intelligent system, galvanic cadmium plating, nanomodified coatings, nanoadditives, corrosion resistance, multi-criteria optimization, Pareto front, neural network, machine learning, nanodiamonds, carbon nanotubes, graphene oxide, cost, TensorFlow, Tkinter

## **ВВЕДЕНИЕ**

Коррозия металлов представляет собой одну из наиболее значимых проблем в промышленности, что приводит к экономическим потерям, достигающим 3–4 % ВВП в развитых странах, и снижению долговечности конструкций, особенно в таких отраслях, как нефтегазовая, автомобильная, судостроительная и авиационная.

Для предотвращения негативных эффектов воздействия морской воды и атмосферной коррозии в условиях тропического климата, используют покрытие ответственных деталей авиационной и судовой техники кадмием. Наиболее распространенный технологический процесс нанесения кадмиевого покрытия – электрохимический. Покрытие кадмием толщиной 10–25 мкм не дает агрессивной среде соприкоснуться с металлом основы (сталью), тем самым предотвращая коррозию. Кроме того, кадмий является анодным покрытием, у которого электродный потенциал меньше, чем

у стали. Анод подвергается коррозии, а значит, спасает от нее базовый материал. Защиту он оказывает даже тогда, когда на нем есть поры. Анодный характер защиты кадмия проявляется в хлорид-содержащих средах (в частности в морской воде). При несплошности солевой среды (туман, брызги) анодный характер защиты сохраняется.

Повышающиеся требования к антикоррозионной защите стальных изделий, эксплуатируемых в морском тропическом климате, приводит к необходимости поиска путей повышения коррозионной стойкости кадмиевых покрытий. Одним из способов решения данной задачи является использование нанодобавок в гальванические электролиты кадмирования. В последние десятилетия положительные результаты получены при добавлении в электролиты нанодобавок – оксидов, карбидов, нитридов, углеродных наноматериалов. При этом с точки зрения экономических показателей, предпочтительным является использование углеродных наноматериалов, так как в настоящее время налажен выпуск в промышленных масштабах многослойных углеродных нанотрубок «Таунит» (АО «ЗАВКОМ», г. Тамбов), наноалмазов (ФГУП «СКТБ «Технолог», г. Санкт-Петербург), оксида графена (АО «ЗАВКОМ», г. Тамбов). Следствием перехода от лабораторных установок к промышленным явилось резкое снижение цены углеродных наноматериалов. Основанием для предположения о повышении коррозионной стойкости наномодифицированных кадмиевых покрытий являются результаты исследований, которые показали увеличение коррозионной стойкости наномодифицированных цинковых покрытий [1–10].

Несмотря на снижение цены углеродных наноматериалов, они все еще достаточно дороги, поэтому в некоторых случаях в промышленных условиях необходимо учитывать затраты на такие добавки при проектировании процесса нанесения наномодифицированного гальванического кадмиевого покрытия. Таким образом, существующие работы демонстрируют эффективность наноматериалов для повышения защитных свойств покрытий, при этом подчеркивают необходимость оптимизации их состава и концентрации с учетом затрат.

Цель работы – повышение коррозионной стойкости изделий и экономической эффективности процесса нанесения наномодифицированного кадмиевого гальванического покрытия за счет разработки интеллектуальной системы проектирования электрохимического процесса кадмирования с нанодобавками.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача оптимизации многокритериальная, так как необходимо одновременно минимизировать затраты (R1) и максимизировать коррозионную стойкость (R2). Для достижения целей будем использовать две варьируемые переменные: концентрация (C) и тип добавки (P). Для связи варьируемых переменных с критериями мы составили следующую математическую модель:

Затраты R1 определяются выражением:

$$R1 = (C_d \cdot P_d) + (C_n \cdot P_n) + (C_g \cdot P_g), \quad (1)$$

где  $C_d, C_n, C_g$  – количество наноалмазов, нанотрубок и оксида графена в граммах;

$P_d, P_n, P_g$  – цена наноалмазов, нанотрубок и оксида графена, руб./грамм.

Коррозионная стойкость R2 находится экспериментально для каждой комбинации материалов и характеризуется временем, истекшим до появления первого коррозионного очага и представлена в таблице.

Для решения многокритериальной задачи будем использовать метод Парето.

Парето-фронт – это множество недоминируемых решений в задаче многокритериальной оптимизации, где рассматриваются два или более конфликтующих критерия. В контексте данной программы Парето-фронт представляет собой набор точек, каждая из которых соответствует комбинации концентраций наноматериалов (наноалмазов, нанотрубок и оксида графена), обеспечивающей оптимальный баланс между двумя целями: минимизацией затрат (R1, измеряемых в рублях) и максимизацией коррозионной стойкости (R2, измеряемой в часах). Точка считается Парето-оптимальной, если не существует другой, которая улучшает один критерий (например, уменьшает R1), не ухудшая при этом другой (R2). Множество таких точек и образует Парето-фронт. Необходимо найти концентрацию (C) и тип добавки (P) при которых получают недоминирующие решения (область Парето).

Таблица – Экспериментальные данные

Коррозионная стойкость (часы)	Площадь (m <sup>2</sup> )	Концентрация наноалмазов (г/л)	Концентрация нанотрубок (г/л)	Концентрация оксида графена (г/л)
15,0	0,002	0,15	0,00	0,00
18,0	0,002	0,20	0,00	0,00
15,0	0,002	0,25	0,00	0,00
10,0	0,002	0,30	0,00	0,00
5,0	0,002	0,40	0,00	0,00
1,5	0,002	0,50	0,00	0,00
8,0	0,002	0,00	0,05	0,00
15,0	0,002	0,00	0,10	0,00
20,0	0,002	0,00	0,15	0,00
18,0	0,002	0,00	0,20	0,00
14,0	0,002	0,00	0,25	0,00
13,0	0,002	0,00	0,30	0,00
5,0	0,002	0,00	0,40	0,00
5,0	0,002	0,00	0,00	0,05
10,0	0,002	0,00	0,00	0,10
13,0	0,002	0,00	0,00	0,15
15,0	0,002	0,00	0,00	0,20
16,0	0,002	0,00	0,00	0,25
14,0	0,002	0,00	0,00	0,30
10,0	0,002	0,00	0,00	0,40
22,5	0,002	0,10	0,10	0,00
25,0	0,002	0,15	0,15	0,00

#### АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Алгоритм поиска Парето-фронта реализован в функции `find_pareto_front(points)` и работает следующим образом: сначала для каждой точки вычисляется значение R1 (стоимость покрытия) на основе концентраций материалов и их цен, создавая список пар (R1, R2), где R2 – коррозионная стойкость. Затем точки сортируются по возрастанию стоимости R1, что позволяет последовательно обрабатывать их от наименее к наиболее дорогим. Алгоритм инициализирует Парето-фронт первой точкой (с минимальной стоимостью) и запоминает ее значение R2 как текущий максимум. При последующем проходе по отсортированным точкам каждая следующая точка добавляется во фронт, только если ее значение R2 превышает текущий максимум, который затем обновляется. Это обеспечивает построение оптимального множества точек, где каждая последующая точка имеет как большую стоимость, так и большую коррозионную стойкость, формируя классический Парето-фронт для двумерной оптимизации с критериями минимизации затрат и максимизации стойкости. Алгоритм эффективно находит недоминируемые решения, которые затем визуализируются на графике в виде черной линии, соединяющей точки фронта с выделенными маркерами.

Программное обеспечение (ПО) представляет собой интеллектуальную систему, разработанную для решения задачи многокритериальной оптимизации в области защитных покрытий с использованием наноматериалов. Она предназначена для исследователей и инженеров, работающих над созданием оптимальных составов защитных покрытий, которые минимизируют затраты (обозначенные как R1) и одновременно максимизируют коррозионную стойкость (обозначенную как R2). Программа использует машинное обучение, интерактивный интерфейс и визуализацию данных, что делает ее мощным инструментом для анализа и принятия решений. ПО также позволяет на основе введенных концентраций нанодобавок прогнозировать коррозионную стойкость. Программа классифицируется как интеллектуальная система благодаря следующим характеристикам:

- 1) в основе прогнозирования коррозионной стойкости (R2) лежит глубокая нейронная сеть, реализованная с помощью библиотеки TensorFlow. Модель обучается на данных из файла «data22.csv» и способна адаптироваться к новым данным при повторных запусках;
- 2) программа автоматически анализирует введенные пользователем данные, прогнозирует результаты и визуализирует их в виде Парето-фронта, что упрощает выбор оптимальных решений;
- 3) добавленная в ПО нейронная сеть позволяет спрогнозировать повышение коррозионной стойкости по мере увеличения объема данных;
- 4) графический интерфейс, реализованный с помощью Tkinter, делает систему удобной даже для пользователей без глубоких технических знаний.

Эти свойства выделяют программу как интеллектуальный инструмент, сочетающий в себе элементы машинного обучения, обработки данных и поддержки принятия решений.

Программа состоит из нескольких ключевых этапов, каждый из которых подробно описан ниже:

1) инициализация нужных библиотек (таких как «tkinter» для интерфейса программы, «matplotlib» для визуализации графика, «tensorflow» – нейронная сеть для прогнозирования коррозионной стойкости на основе концентрации добавок и другие). Также задаются константы, в которых указаны цены материалов, имена файлов и списки для хранения данных;

2) загрузка данных при помощи функции. Например, «load\_csv()» считывает данные из файла и помещает их в список «points». Каждая строка файла содержит 5 значений: R2 (коррозионная стойкость, единица измерения – часы); площадь поверхности F (фиксированное значение 0,002); концентрации трех материалов (наноалмазы, углеродные нанотрубки, оксид графена). Функция «load\_predicted\_csv()» загружает предсказанные точки из файла «predicted\_points.csv»;

3) разделение точек на входные (X – концентрации материалов) и выходные (Y – значения R2) массивы. Для увеличения объема обучающей выборки генерируются дополнительные 100,000 точек путем повторения существующих данных и добавления шума (нормальное распределение с параметрами 0,01 для X и 0,5 для Y). Это делает модель более устойчивой;

4) установка количества потоков «TensorFlow» для параллельных вычислений на основе числа ядер процессора («os.cpu\_count()»). Это позволяет сократить время на обучения путем использования всех потоков процессора. Логи «TensorFlow» минимизируются с помощью «os.environ['TF\_CPP\_MIN\_LOG\_LEVEL'] = '2'»;

5) создание архитектуры модели. Она состоит из 3-х нейронов (по числу концентраций) для входного слоя, скрытых слоев (2048, 1024, 512, 256) и 128-и нейронов с активацией relu, нормализации (BatchNormalization) и регуляризации (Dropout с вероятностью 0,2) и одного нейрона для выходного слоя (прогнозирование данных R2). Все это призвано обеспечить предотвращение переобучения;

6) настройка компиляции. Для этого необходим оптимизатор «Adam» (скорость обучения 0,001), функция потерь «mse» (среднеквадратическая ошибка) и метрика «mae» (средняя абсолютная ошибка). Далее загрузка весов: если файл «model\_weights.weights.h5» существует – веса загружаются. В противном случае он загружает в этот файл новые веса. Модель обучается на расширенных данных в течение 100 эпох (можно увеличить до 1000) с использованием tf.data.Dataset для оптимизации вычислений. После обучения веса сохраняются в файл «model\_weights.weights.h5»;

7) создание окна с помощью «tkinter» для интерфейса, содержащее: поля ввода для концентраций наноалмазов, нанотрубок и оксида графена; кнопку «Подтвердить» для расчёта и сохранения данных и кнопку «Построить график». Для прогнозирования R2 и сохранения используем функцию «confirm\_data()», которая считывает введенные пользователем концентрации. Рассчитываем R1 с помощью функции «calculate\_R1()»:  $(C_d \cdot 220) + (C_n \cdot 70) + (C_g \cdot 100)$ ;

8) реализация визуализации Парето-фронта при помощи функции «plot\_graph()», объединяющей экспериментальные и предсказанные точки, рассчитывающей R1 для каждой точки, группирующей точки по составу материалов и присваивающей цвета (например, красный – только наноалмазы, зеленый – только нанотрубки). Кроме того, она строит график рассеяния (scatter) с помощью «matplotlib», вычисляет Парето-фронт (функция «find\_pareto\_front()»), отображая оптимальные точки линией и добавляет интерактивные подсказки с помощью «mplcursors»: при наведении курсора на точку отображаются концентрации материалов.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Программное обеспечение было протестировано на модельных данных, содержащих различные концентрации наноалмазов, нанотрубок и оксида графена в гальваническом электролите кадмирования.

На рисунке 1 показан интерфейс ввода исходных данных.

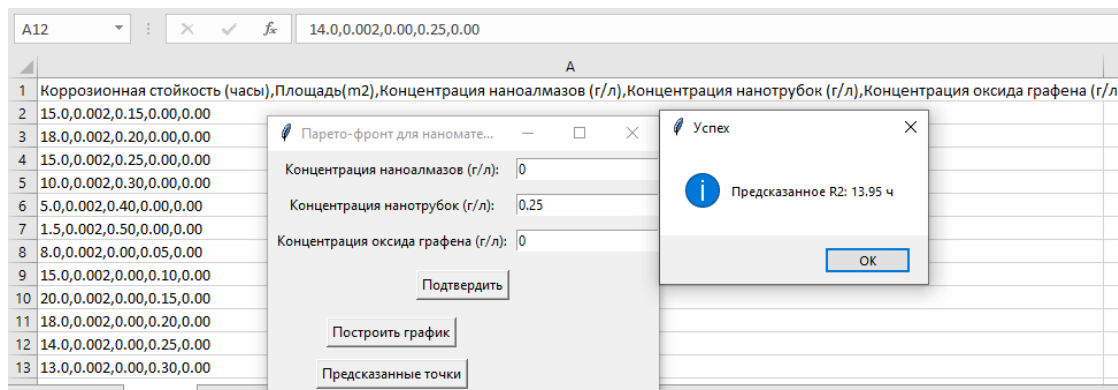


Рисунок 1 – Окно ввода концентрации для прогнозирования коррозионной стойкости

На рисунке 1 в текстовых окнах нужно ввести количество добавок. Если использовать только одну добавку, то на других добавках необходимо прописать 0. В первой строке файла с данными можно увидеть текстовую информацию об обозначении всех чисел. Помимо этого, по рисунку 1 можно определить точность прогнозирования R2. На 12-й строке файла указано, что при концентрации нанотрубок 0,25 г/л коррозионная стойкость будет составлять 14,0 часов. При введении такой концентрации нейронная сеть дала следующий прогноз: коррозионная стойкость составит 13,95 часов. При этом погрешность минимальна.

При нажатии кнопки «Предсказанные точки» мы получаем новый график, в котором находятся все предсказанные точки (рис. 2). При нажатии кнопки «Построить график» мы увидим другой график, где отобразятся значения критериев при различных вариантах варьируемых переменных и будет обозначен черной линией Парето-фронт (рис. 3). При наведении курсором мыши на любую точку из графика отображается концентрация добавок этой точки.

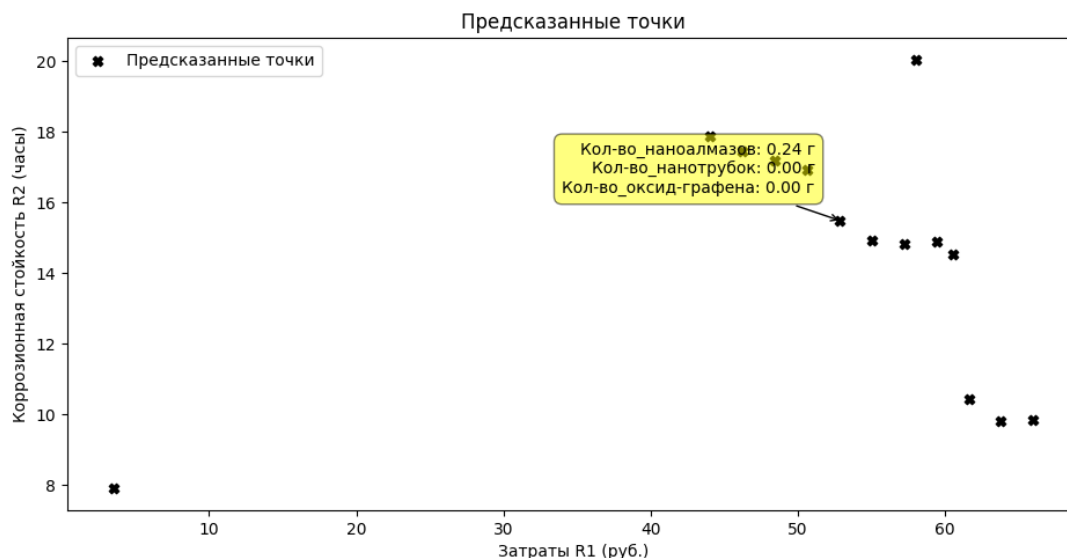


Рисунок 2 – Прогнозирование R2

Мы сопоставили 2 точки (рис. 3). Проведя анализ результатов, пришли к следующему выводу: добавление большего количества нанодiamondов не гарантирует рост коррозионной стойкости по причине образования агломератов наночастиц, которые приводят к снижению коррозионной стойкости. Для проверки работы нейронной сети зададим среднее значение между имеющимися двумя точками (рис. 4).

В результате на графике (рис. 5) мы видим новую точку, которая расположена между двумя предыдущими. Данный эксперимент работы нейронной сети показывает его способность к обучению и подчеркивает высокую точность полученных результатов.

Технические особенности ПО:

- 1) «TensorFlow» используется для создания и обучения глубокой нейронной сети с высокой производительностью благодаря многопоточности;
- 2) увеличивает объем обучающей выборки, повышая точность прогнозов;
- 3) программа оптимизирована для работы на многоядерных процессорах;
- 4) интерфейс «Tkinter» обеспечивает простоту использования без необходимости написания кода;
- 5) график Парето-фронта интерактивен и информативен, что ускоряет анализ данных.

Преимуществом использования Парето-фронта является возможность выбрать комбинации, обеспечивающие максимальную коррозионную стойкость при определенном бюджете.

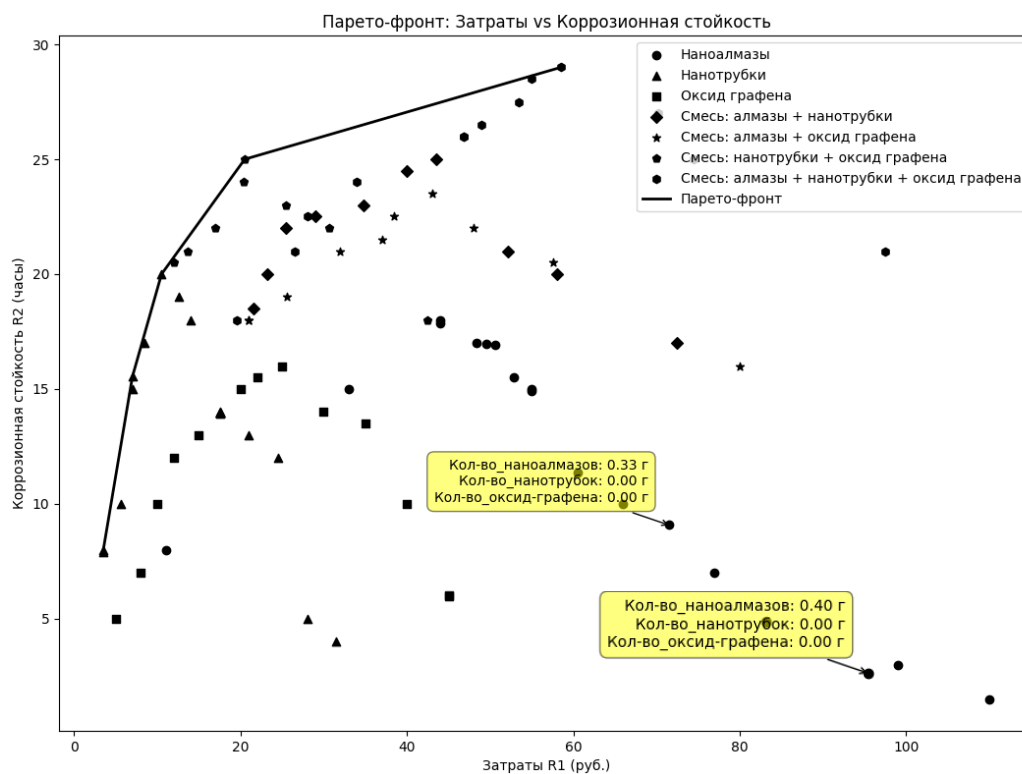


Рисунок 3 – Построенный график с точками и областью Парето-фронта с отображением двух случайных точек

Парето-фронт для наномате...

Концентрация наноалмазов (г/л): 0.275

Концентрация нанотрубок (г/л): 0.00

Концентрация оксида графена (г/л): 0.00

Подтвердить

Построить график

Предсказанные точки

Рисунок 4 – Входные данные для нейронной сети

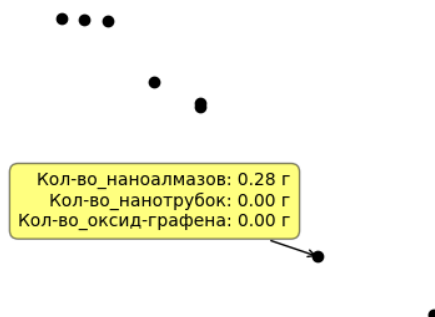


Рисунок 5 – Спрогнозированная нейронной сетью точка

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена разработка метода оптимизации использования наноматериалов в защитных покрытиях, строящаяся на основе Парето-оптимизации. Разработанное программное обеспечение является интеллектуальной системой, которая объединяет машинное обучение, визуализацию и удобный интерфейс для решения задач многокритериальной оптимизации, предоставляя лицу, принимающего решения, инструмент для выбора оптимальных решений.

Дальнейшее развитие методики – учет дополнительных факторов, таких как технологические ограничения и экологические аспекты.

## Список источников

1. Praveen, B. M. Corrosion studies of carbon nano-tubes-Zn composite coating / B. M. Praveen, T. V. Venkatesha, A. Y. Naik, K. Prashantha // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. Vol. 201, № 12. – P. 5836–5842.
2. Целуйкин, В. Н. Композиционные электрохимические покрытия: получение, структура, свойства / В. Н. Целуйкин // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 287–301.
3. Литовка, Ю. В. Процесс получения цинковых покрытий с улучшенными качественными показателями из электролита с добавками наноклерода / Ю. В. Литовка, Д. Н. Симагин // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. – 2014. – № 2 (51). – С. 224–232.
4. Пат. 2169798 Российская Федерация, МПК7 C25D3/22, C25D15/00. Способ получения композиционных покрытий на основе цинка / Лунг Бернгард, Г. К. Буркат, В. Ю. Долматов, В. Ю. Сабурбаев. – Заявл. 21.02.2000; опубл. 27.06.2001.
5. Симагин, Д. Н. Процесс нанесения цинковых покрытий из электролитов с добавками наноклерода для повышения защитной способности от коррозии / Д. Н. Симагин, Ю. В. Литовка, И. А. Дьяков // *Нанотехника*. – 2014. – № 3 (39). – С. 20–23.
6. Буркат, Г. К., Получение и свойства композиционных электрохимических покрытий цинк-алмаз из цинкатного электролита / Г. К. Буркат, В. Ю. Долматов // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 2001. – Т. 9, № 2. – С. 35–40.
7. Симагин, Д. Н. Метод нанесения наномодифицированных цинковых гальванических покрытий для защиты металлов от коррозии / Д. Н. Симагин // *Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы* : II Международная научная конференция. – Саратов : ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2013. – С. 147–150.
8. Симагин, Д. Н. Процесс получения цинковых покрытий с улучшенными качественными показателями из электролита с добавками наноклерода / Д. Н. Симагин // *Физика-химия и технология неорганических материалов* : материалы XI Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов Москва, 2014. – С. 537–538.
9. Симагин, Д. Н. Моделирование процессов нанесения цинковых покрытий с добавками наноклерода с улучшенными качественными показателями / Д. Н. Симагин, Ю. В. Литовка // *Математические методы в технике и технологиях* : материалы XXVII Международной научной конференции. – Тамбов, 2014. – Т. 8. – С. 48–49.
10. Симагин, Д. Н. Использование наноматериалов в электрохимических покрытиях / Д. Н. Симагин, Ю. В. Литовка, А. Г. Ткачев, И. А. Дьяков // *Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение* : тез. докл. I Международной научной конференции. – Тамбов, 2015. – С. 206–207.
11. Соловьёв, Д. С. Постановка задачи оптимального управления реверсивным режимом нанесения гальванического покрытия в ванне со многими анодами / Д. С. Соловьёв, В. В. Конкина, Ю. В. Литовка // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 248–256.
12. Литовка, Ю. В. Моделирование и оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами / Ю. В. Литовка, В. З. Као // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 68–74.
13. Банников, А. А. Решение задачи управления неравномерностью гальванического покрытия с использованием параллельной обработки информации / А. А. Банников, Ю. В. Литовка, Г. В. Шишкина // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 365–375. DOI 10.17277/vestnik.2022.03.pp.365-375.
14. Банников, А. А. Оптимальное размещение деталей катодов при управлении гальванической ванной по критерию микротвердости / А. А. Банников, Ю. В. Литовка // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 199–204. – DOI 10.17277/vestnik.2023.02.pp.199-204.
15. Литовка, Ю. В. Проверка адекватности математической модели процесса нанесения гальванического покрытия в ванне с подвижными секциями анода / Ю. В. Литовка, А. П. Пуха // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2025. – Т. 31, № 3. – С. 447–454. DOI 10.17277/vestnik.2025.03.pp.447-454.

## References

1. Praveen, B. M., Venkatesha, T. V., Naik, A. Y., Prashantha, K. Corrosion studies of carbon nano-tubes-Zn composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, № 12, pp. 5836–5842.
2. Tseluikin, V. N. Composite electrochemical coatings: production, structure, and properties. *Surface Physicochemistry and Material Protection*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 287–301 (In Russ.).
3. Litovka, Yu. V., Simagin, D. N. The Process of obtaining zinc coatings with improved quality indicators from an electrolyte with nanocarbon additives. *Issues of Modern Science and Practice. Vernadsky University*, 2014, no. 2 (51), pp. 224–232 (In Russ.).

4. Patent 2169798 Russian Federation, IPC7 C25D3/22, C25D15/00. Method for producing zinc-based composite coatings. Lung Bernhard, G. K. Burkat, V. Yu. Dolmatov, V. Yu. Saburbayev. Decl. 21.02.2000 ; publ. 27.06.2001 (In Russ.).
5. Simagin, D. N., Litovka, Yu. V., Dyakov, I. A. The process of applying zinc coatings from electrolytes with nanocarbon additives to improve corrosion protection. *Nanotechnology*, 2014, no. 3 (39), pp. 20–23 (In Russ.).
6. Burkat, G. K., Dolmatov, V. Yu. Preparation and properties of composite electrochemical zinc-diamond coatings from zincate electrolyte. *Galvanotechnics and Surface Treatment*, 2001, vol. 9, no. 2, pp. 35–40 (In Russ.).
7. Simagin, D. N. Method of applying nanomodified zinc galvanic coatings to protect metals from corrosion. *Nanomaterials and nanotechnologies: problems and prospects : II International scientific conference*. Saratov, FSUE STC "Informregistr", 2013, pp. 147–150 (In Russ.).
8. Simagin, D. N. Process of obtaining zinc coatings with improved quality indicators from an electrolyte with nanocarbon additives. *Physics, chemistry and technology of inorganic materials : proceedings of the XI Russian annual conference of young researchers and postgraduate students*. Moscow, 2014, pp. 537–538 (In Russ.).
9. Simagin, D. N., Litovka, Yu. V. Modeling of the processes of applying zinc coatings with nanocarbon additives with improved quality indicators. *Mathematical methods in engineering and technology : proc. of the XXVII International scientific conference*. Tambov, 2014, vol. 8, pp. 48–49 (In Russ.).
10. Simagin, D. N., Litovka, Yu. V., Tkachev, A. G., Dyakov, I. A. Use of nanomaterials in electrochemical coatings. *Graphene and related structures: synthesis, production and application : abstract of the report of the I International scientific conference*. Tambov, 2015, pp. 206–207 (In Russ.).
11. Soloviev, D. S., Konkina, V. V., Litovka Yu. V. Formulation of the optimal control problem for the reversible mode of applying galvanic coating in a bath with many anodes. *Bulletin of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 248–256 (In Russ.).
12. Litovka, Yu. V., Kao, V. Z. Modeling and optimization of a galvanic bath with additional cathodes. *Bulletin of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 68–74 (In Russ.).
13. Bannikov, A. A., Litovka, Yu. V., Shishkina, G. V. Solution of the problem of controlling the unevenness of the galvanic coating using parallel information processing. *Bulletin of Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 365–375. DOI 10.17277/vestnik.2022.03.pp.365-375 (In Russ.).
14. Bannikov, A. A., Litovka, Yu. V. Optimal placement of cathode parts when controlling the galvanic bath based on the microhardness criterion. *Bulletin of Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 2, pp. 199–204. DOI 10.17277/vestnik.2023.02.pp.199-204 (In Russ.).
15. Litovka, Yu. V., Pukha, A. P. Verification of adequacy of the mathematical model of the process of applying galvanic coating in a bath with movable anode sections. *Bulletin of Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 3, pp. 447–454. DOI 10.17277 / vestnik.2025.03.pp.447-454 (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 04.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 06.02.2026.

The article was submitted 04.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 06.02.2026.

УДК 004.722 + 004.056

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АНОНИМНОСТИ УЗЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ В РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ**

**Бабаскин Егор Сергеевич**, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,

аспирант, ORCID: 0009-0005-1075-5620, e-mail: babaskin.egor17@yandex.ru

**Таныгин Максим Олегович**, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,

доктор технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-4099-1414, e-mail: tanygin@yandex.ru

**Кулешова Елена Александровна**, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,

кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-8270-564X, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru

**Киселев Алексей Викторович**, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7228-0281, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Исследование направлено на анализ эффективности маршрутизации и количественную оценку отклонения реальных маршрутов доставки сообщений от структурно-оптимальных при различных сценариях работы в условиях реконфигурируемых беспроводных сетей. Для проведения экспериментальных исследований разработана имитационная модель, реализованная на языке Python с использованием библиотеки NetworkX. Сеть представляется в виде случайного графа, генерируемого по модели Эрдёша – Реньи. Для анализа введена ключевая метрика  $R$  – отношение фактической длины маршрута к средней длине кратчайшего пути в топологии сети. Модель позволяет исследовать различные режимы маршрутизации: случайную, с реконфигурируемой топологией, анонимную и с ограниченным знанием соседей. Проведенное исследование выявило значительные различия в эффективности маршрутизации для различных режимов работы сети. Моделирование для базового сценария со случайной маршрутизацией показало стабильные значения метрики  $R$ , что свидетельствует о практически оптимальном соответствии реальных маршрутов структурным возможностям сети. Сравнительный анализ продемонстрировал снижение эффективности от незначительного увеличения метрики  $R$  до 1,0–1,1 в режиме реконфигурируемой топологии, 1,6–1,9 – в режиме ограниченного знания топологии и 2,1–3,0 – при использовании анонимной маршрутизации, что количественно выражает «цену» обеспечения конфиденциальности в виде двукратного–трёхкратного увеличения длины маршрутов. Предложенная модель является универсальным инструментом для анализа «цены» таких свойств сетей, как анонимность, мобильность и ограниченность знаний узлов. Введенная метрика  $R$  позволяет проводить сравнительный анализ эффективности маршрутизации независимо от абсолютных размеров сети. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации работы реконфигурируемых сетей в таких прикладных областях, как умные города, промышленный IoT и системы экстренной связи.

**Ключевые слова:** реконфигурируемые беспроводные сет, имитационное моделирование, анонимная маршрутизация, смешанная топология, эффективность маршрутизации

**ASSESSING THE IMPACT OF NODE ANONYMITY ON MESSAGE TRANSMISSION CHARACTERISTICS IN RECONFIGURABLE NETWORKS**

**Babaskin Egor S.**, South-West State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0009-0005-1075-5620, e-mail: babaskin.egor17@yandex.ru

**Tanygin Maxim O.**, South-West State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0002-4099-1414, e-mail: tanygin@yandex.ru

**Kuleshova Elena A.**, South-West State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0002-8270-564X, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru

**Kiselev Alexey V.**, South-West State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0001-7228-0281, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

This study analyzes routing efficiency and quantifies the deviation of actual message delivery paths from structurally optimal ones in reconfigurable wireless networks. To achieve this goal, we developed a simulation model in Python using the NetworkX library. The model represents the network as a random Erdős–Rényi graph. For our analysis, we introduce a key metric  $R$ , defined as the ratio of the actual route length to the average shortest path in the network topology. This approach allows us to investigate various routing modes: random, reconfigurable topology, anonymous,

and limited-knowledge. The simulation results reveal significant differences in efficiency across these modes. For example, the baseline random routing shows stable near-optimal  $R$  values. In contrast, the reconfigurable topology mode increases  $R$  to 1.0–1.1, while limited knowledge leads to 1.6–1.9. Most notably, anonymous routing results in an  $R$  value of 2.1–3.0. Consequently, this quantifies the privacy «cost» as a two- to three-fold increase in route length. We conclude that the proposed model serves as a universal tool for assessing the «cost» of network properties like anonymity and mobility. Moreover, the  $R$  metric enables comparative efficiency analysis independent of network scale. The benefits of this study include potential optimization of reconfigurable networks for smart cities, industrial IoT, and emergency systems.

**Keywords:** reconfigurable wireless networks, simulation modeling, anonymous routing, mixed topology, routing efficiency

## ВВЕДЕНИЕ

Современные телекоммуникационные системы переживают парадигмальный сдвиг в сторону создания интеллектуальных, гибких и устойчивых сетей, способных адаптироваться к динамичным условиям [1]. Беспроводные сети динамично развиваются от статичных, заранее спланированных инфраструктур к реконфигурируемым беспроводным сетям (Reconfigurable Wireless Networks, RWN), которые обладают способностью динамически перестраивать свою топологию, параметры передачи и протоколы маршрутизации в ответ на изменения в окружающей среде, трафике или целевых показателях эффективности [2].

Эта концепция находит свое применение в проектах, где беспроводная среда сама становится программируемым ресурсом [3]. Технология реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS) позволяет активно управлять распространением радиоволн, создавая «усиленные» зоны для связи, локации или энергоэффективности. Это обусловлено переходом к средам, в которых физические и логические параметры сети могут динамически изменяться [4].

Одновременно с требованиями к гибкости и эффективности в современных приложениях, таких как умные города, промышленный IoT (Internet of Things – «Интернет вещей»), финансовые сервисы, системы экстренной связи, возникают задачи обеспечения конфиденциальности и анонимности данных [5]. Такие технологии, как onion-маршрутизация, лежащая в основе Tor (The Onion Router) [6], или более общие подходы к смешиванию трафика [7], становятся востребованными не только в специализированных инструментах, но и как встроенный функционал массовых сервисов. Однако обеспечение анонимности традиционно сопряжено с издержками, такими как увеличение задержки пакетов данных и снижение пропускной способности из-за усложнения маршрутов передачи данных.

Таким образом, выявляется ключевое противоречие: существует конфликт между двумя магистральными векторами развития сетей – стремлением к оптимальной эффективности (минимальная длина маршрута, низкая задержка, высокая пропускная способность) и необходимостью обеспечения гарантированной анонимности, становящейся причиной усложнения и удлинения путей передачи трафика.

Проблема заключается в отсутствии универсальных количественных методов для оценки «цены» анонимности и других свойств реконфигурируемых сетей, таких как мобильность и ограниченность знаний, позволяющих проводить количественные оценки алгоритмов и технических решений, направленных на маскирование трафика, абсолютных размеров и топологии сети.

Исходя из вышесказанного, возникает необходимость разработки имитационной модели, позволяющей проводить сравнительный анализ эффективности маршрутизации в реконфигурируемых беспроводных сетях при различных сценариях, включая режимы, требующие обеспечения анонимности.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анонимность в компьютерных сетях – это свойство, при котором действия пользователя (отправка, получение сообщения) не могут быть однозначно связаны с его идентичностью [8]. В контексте нашего исследования под анонимностью понимается более широкое свойство системы, включающее сокрытие идентичности отправителя и получателя, факта коммуникации между конкретной парой узлов, а также маршрута, по которому проходит сообщение.

Исторически сложилось несколько ключевых подходов к обеспечению анонимности:

1. Mix-сети (сети смешивания). Были предложены Дэвидом Чаумом [9], они используют цепочку промежуточных серверов (миксеров), которые шифруют, переупорядочивают и задерживают сообщения, чтобы разорвать связь между входящим и исходящим трафиком.

2. Onion-Router (анонимная маршрутизация). При использовании данной технологии строится цепь через несколько узлов, при этом сообщение инкапсулируется в несколько слоев шифрования. Каждый промежуточный узел знает только своих непосредственных соседей в цепи, но не конечного отправителя или получателя [10]. Именно этот подход был взят за основу в предлагаемой модели как канонический пример анонимной маршрутизации.

3. Дифференциальная приватность. Это подход, который фокусируется на защите приватности при публикации агрегированных данных с добавлением в них калиброванного шума [11]. Хотя он напрямую не связан с маршрутизацией, он иллюстрирует универсальный принцип, заключающийся

в том, что конфиденциальность часто достигается за счет внесения контролируемой «неточности» или «неэффективности».

Общим для всех этих подходов является фундаментальный компромисс между уровнем анонимности и производительностью [12]. Удлинение цепочек в Тог или увеличение времени задержки в тix-сетях напрямую ведет к росту задержки и снижению пропускной способности. Однако в научной литературе этот компромисс часто анализируется в рамках конкретных систем, например, производительность Тог [13, 14]. Недостатком существующих исследований является отсутствие универсальной, топологически-инвариантной метрики, которая позволила бы количественно сравнивать «цену» анонимности в различных сетевых архитектурах и сценариях, включая современные реконфигурируемые среды [15]. В то же время в смежных областях, таких как анализ метаданных для обеспечения безопасности, также применяются методы математической интерпретации сетевых характеристик [16], что подтверждает актуальность разработки аналогичных формальных аппаратов для оценки анонимности.

В связи с этим в работе предложена универсальная модель для наглядного сравнения издержек и количественного сравнения сетевых компромиссов. В его основе лежит метрика  $R$  – нормированная мера эффективности маршрутизации, инвариантная к абсолютным размерам сети, которая позволяет в единой системе координат оценить «цену» различных свойств сети, таких как анонимность, реконфигурируемая топология или ограниченное знание соседей.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования процессов передачи сообщений в реконфигурируемой беспроводной сети была разработана имитационная модель, основанная на представлении структуры сети в виде случайного графа. Программная реализация модели была выполнена на языке программирования Python с использованием библиотеки NetworkX. Данный подход позволяет варьировать размер сети, степень ее связности, механизм маршрутизации и динамику топологии, что делает модель универсальным инструментом для анализа различных сценариев функционирования распределенных систем связи.

В предлагаемой модели сеть представлена в виде неориентированного графа  $G = (V, E)$ , в котором  $V$  – множество узлов (абонентов),  $E$  – множество каналов связи между ними.

Для генерации топологии используется модель Эрдеша – Реньи, позволяющая задать сетевую связность через вероятность  $P$  появления ребра между двумя узлами, которая определяется по (1):

$$P = \frac{K}{N-1}, \quad (1)$$

где  $N$  – число узлов в сети;

$K$  – требуемое среднее число соседей каждого узла.

После генерации проверяется связность графа. Если сеть оказывается фрагментированной, то модель автоматически выделяет крупнейшую компоненту, что обеспечивает корректность дальнейших измерений маршрутов.

В интерактивной версии модели параметры  $N$  и  $K$  изменяются в реальном времени посредством графических бегунков, что позволяет визуально отслеживать последствия изменения числа узлов и связности. Такая схема позволяет моделировать разные топологические режимы – от слабосвязных систем до плотных сетей, приближающихся к полностью связным структурам.

После построения графа определяется ряд ключевых параметров и метрик:

1. Среднее минимальное расстояние ( $F$ ) – средняя длина кратчайших маршрутов между всеми парами узлов. Метрика  $F$  широко используется в теории сетей и отражает эффективность глобальной связности сети, используется в исследованиях графов, mesh-сетей, MANET, overlay-сетей и позволяет сравнивать сети разных размеров [17]. Показатель отражает степень компактности сети и показывает, насколько быстро в среднем можно передать сообщение между любыми двумя узлами.  $F$  является базовой структурной метрикой и рассчитывается по (2):

$$F = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{u,v \in V, u \neq v} d(u,v), \quad (2)$$

где  $n$  – количество узлов в графе ( $N$ );

$V$  – множество всех узлов сети;

$d(u,v)$  – длина кратчайшего пути между узлами  $u$  и  $v$ .

2. Фактическое расстояние передачи ( $E$ ) – длина реального маршрута между конкретной парой узлом-источником и узлом-получателем. Это значение является «наблюдаемой» метрикой, отражающей реальный процесс коммуникации, и показывает, насколько реальные маршруты соответствуют структурным характеристикам сети. Метрика  $E$  позволяет оценить влияние топологии, перераспределений и режимов маршрутизации, рассчитывается по (3):

$$E_i = d(u,v), \quad (3)$$

где  $d(u,v)$  – длина кратчайшего пути (в ребрах) для пары узлов  $(u,v)$ .

3. Метрика  $R = E/F$ , отражающая отношение фактической длины маршрута к средней структурной длине графа, при  $R=1$  – путь типичен и соответствует средней структуре сети, при  $R < 1$  – выбрана пара близких узлов, сеть использует короткие пути, при  $R > 1$  – узлы удалены, сеть испытывает локальные перегрузки или существуют особенности топологии.  $R$  является главной результирующей метрикой, поскольку нормирует реальное расстояние на структуру сети, устраняя зависимость от размера  $N$ . Данная метрика позволяет сравнить модели с различной связностью  $K$ , размером  $N$  и режимами маршрутизации, а также позволяет в относительной форме оценить эффективность доставки независимо от размеров сети и ее плотности. Данная метрика также используется в исследованиях навигационных сетей, сетей, устойчивых к разрывам (DTN – Delay-Tolerant Networking), и анонимных маршрутизаторов [18].

4. Фактическое среднее число соседей  $K_{real}$  – метрика показывает среднюю степень узлов, что важно, поскольку в случайных графах фактическая связность строго не равна ожидаемой. В теории графов известно, что сумма степеней всех узлов равна удвоенному количеству ребер [19], что дает эквивалентную формулу через количество ребер (4):

$$K_{real} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i = \frac{2m}{n}, \quad (4)$$

где  $k_i$  – степень  $i$ -го узла (количество его соседей);

$m$  – общее количество ребер в графе;

$\sum_{i=1}^n k_i$  – сумма степеней всех узлов.

Стоит отметить, что в модели Эрдёша – Реньи фактическое значение  $K_{real}$  может отличаться от заданного параметра  $K$  из-за стохастической природы генерации графа [20]. Вероятность соединения между любой парой узлов равна (1), но фактическое количество соединений в конкретной моделируемой сети является случайной величиной, распределенной по биномиальному закону.

Для случайного графа Эрдёша – Реньи математическое ожидание средней степени вычисляется как  $E[K_{real}] = P(N-1) = K$ , однако в конкретной реализации фактическое значение может отличаться от ожидаемого, что и отражает метрика  $K_{real}$ .

Модель позволяет исследовать влияние различных механизмов маршрутизации. Каждый режим имитирует специфические условия реальных систем:

1. Случайная маршрутизация (Random Routing). В данном режиме путь выбирается случайно среди всех возможных соседей, а также моделируется отсутствие глобальной информации о сети, простые протоколы в беспроводных mesh-сетях и поведение агентов без навигации.

2. Реконфигурируемая топология (Mobile Topology). В данном режиме каждая реконфигурация создает новый граф с теми же параметрами  $N$  и  $K$ , изменяя маршруты и распределение расстояний. Граф периодически перестраивается (раз в  $T$  передач), что позволяет моделировать работу мобильных ad-hoc сетей, беспроводных сенсорных сетей с перемещением узлов, динамических mesh-сетей.

3. Анонимная маршрутизация (Opion Routing). При использовании режима строится удлиненный «луковичный» маршрут. Перед передачей система добавляет набор случайных промежуточных узлов (слои «луковицы»). Каждый участок пути от текущего узла к промежуточному узлу выбирается по кратчайшему маршруту. Режим моделирует такие свойства, как opion-маршрутизация (аналог Tor), скрытие реального получателя, удлинение маршрута с целью достижения анонимности.

4. Ограниченное знание соседей (Limited Knowledge). В данном режиме узел обладает информацией только о своих соседях и не имеет информации о глобальной структуре сети. При передаче происходит выбор одного из доступных соседних узлов случайным образом. Такой подход отражает поведение узлов в рег-to-рег сетях без карты сети, простейшие протоколы маршрутизации в IoT-сетях и решения, основанные только на локальной видимости.

Результатом каждого режима является различное распределение параметра  $E$  и метрики  $R$ , что позволяет оценивать «цену» мобильности топологии, случайности и анонимности. Это позволяет смоделировать различные классы реальных коммуникационных систем.

После построения графа выполняется серия передач данных между случайно выбранными парами узлов. В базовом режиме (случайная маршрутизация) моделируется оптимальная маршрутизация, т. е. сообщение передается по кратчайшему пути между отправителем и получателем.

Процесс коммуникации моделируется как серия из 1000 передач сообщений между случайно выбранными парами узлов, что позволяет получить статистически устойчивые значения. Для каждой передачи выбираются два узла: источник и получатель.

Также для каждой передачи вычисляется фактическое минимальное расстояние между узлами (длина маршрута)  $E$  и фиксируется отношение фактической длины маршрута к средней структурной длине графа  $R$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании рассматривались характеристики процесса передачи трафика (отношения  $R = E/F$ ) для детального анализа поведения сети при различных вариантах выбора пути доставки сообщения. В качестве демонстрационного примера приведены результаты работы модели со следующими параметрами: размер сети  $N = 8$  узлов; ожидаемое число соседей  $K = 3$ ; количество передач – 1000.

На гистограммах, представленных на рисунках 1–4, по оси абсцисс представлены номера последовательных передач, по оси ординат – соответствующие значения  $R$ . Линии синего цвета отображают индивидуальные значения отношения  $E/F$ , полученные в ходе моделирования для соответствующего цикла передачи данных, а пунктирная красная линия показывает их среднее значение.

В зависимости от выбранного режима маршрутизации характер гистограммы меняется. Так, в режиме случайной маршрутизации (рис. 1) наблюдается стабильность работы сети со средним значением  $R$ , равным 1,002, что свидетельствует о близости реальных маршрутов к оптимальным. Небольшие отклонения обусловлены вариативностью расстояний между различными парами узлов.

На рисунке 2 представлено поведение метрики  $R$  в режиме анонимной маршрутизации (Onion Routing), демонстрирующее большой разброс реальных значений  $R$  для каждого цикла. На графике видно, что отношение  $R$  варьируется в диапазоне 1,4–2,8 при среднем значении, равном 2,054. Характерной особенностью графика является наличие выраженных плато – участков со стабильными значениями метрики  $R$ , сменяющихся резкими переходами к новым уровням. Данная структурная особенность соответствует дискретной природе анонимной маршрутизации, где добавление каждого промежуточного узла создает новый стабильный уровень длины маршрута. Ступенчатый характер графика отражает поэтапное построение маршрута с переменным количеством слоев анонимности.

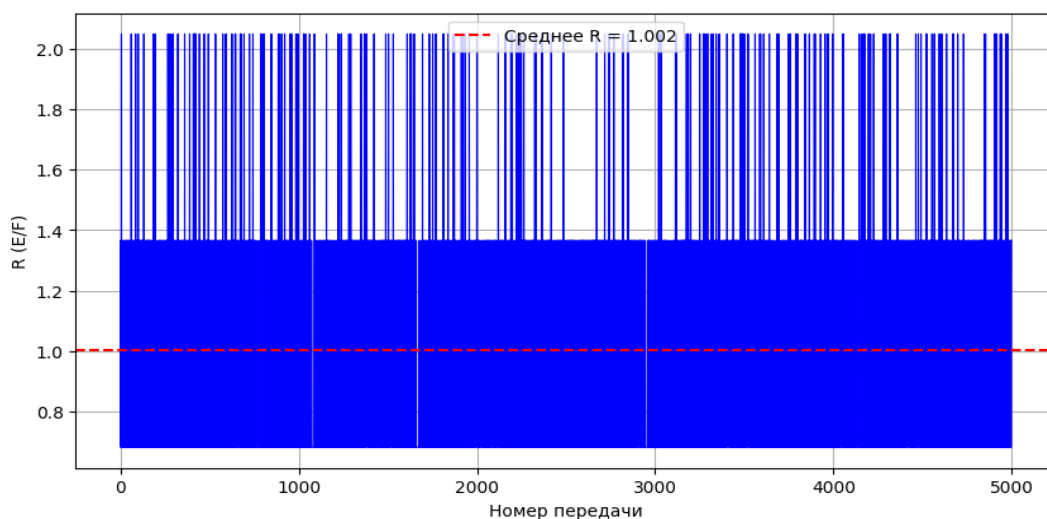


Рисунок 1 – Динамика отношения  $R$  в режиме Random Routing

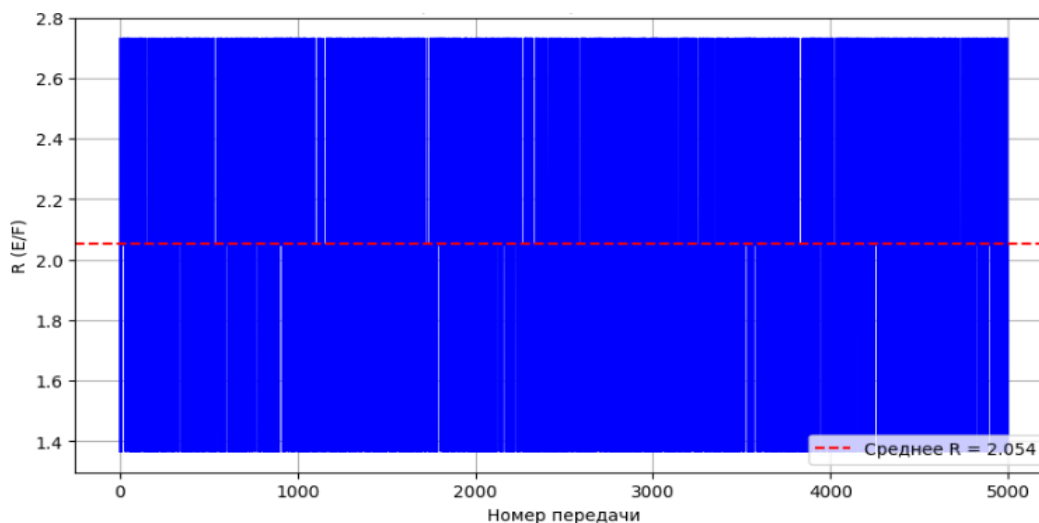


Рисунок 2 – Динамика отношения  $R$  для в режиме Onion Routing

На рисунке 3 представлено поведение сети в режиме ограниченного знания соседей (Limited Knowledge). Среднее значение  $R$ , равное 1,567, и характер приведенной гистограммы указывает на систематическое отклонение от оптимальной маршрутизации, обусловленное отсутствием глобальной информации о структуре сети. Наблюдаемые всплески метрики демонстрируют ситуационные ухудшения эффективности при выборе субоптимальных маршрутов на основе локальных данных. Умеренный разброс значений свидетельствует о частичной компенсации ограничений за счет случайного выбора направлений передачи.

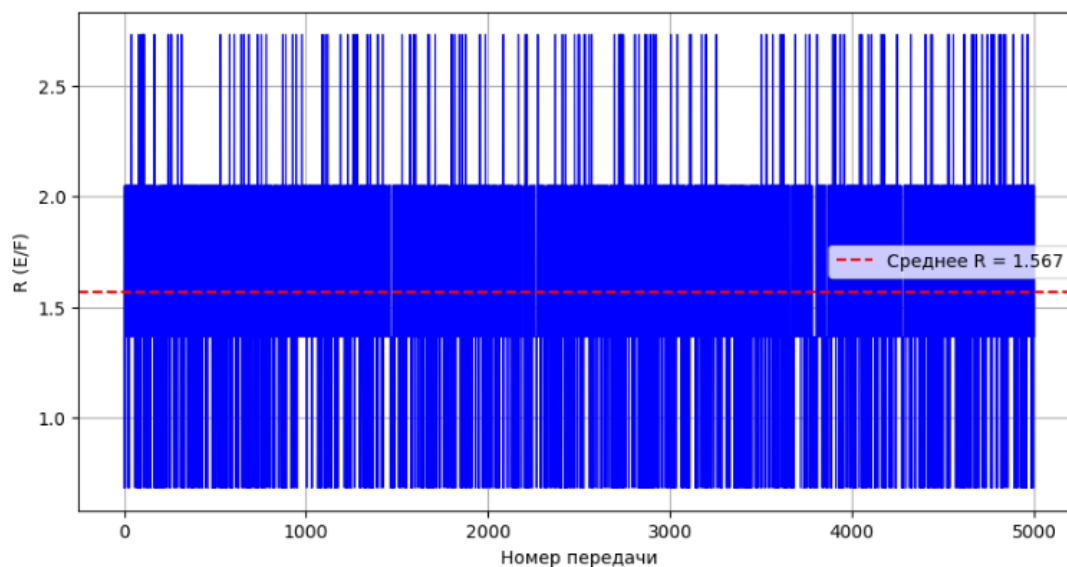


Рисунок 3 – Динамика отношения  $R$  в режиме Limited Knowledge

Режим реконфигурируемой топологии (Mobile Topology) характеризуется выраженной нестационарностью поведения (рис. 4). Резкие изменения метрики  $R$  синхронизированы с моментами перестройки сетевой структуры, отражая адаптационные процессы. Кратковременные снижения показателя до уровней ниже среднего соответствуют образованию компактных кластеров узлов, тогда как возрастания связаны с временным «растягиванием» топологии. Динамический характер графика подтверждает чувствительность метрики  $R$  к структурным преобразованиям сети.

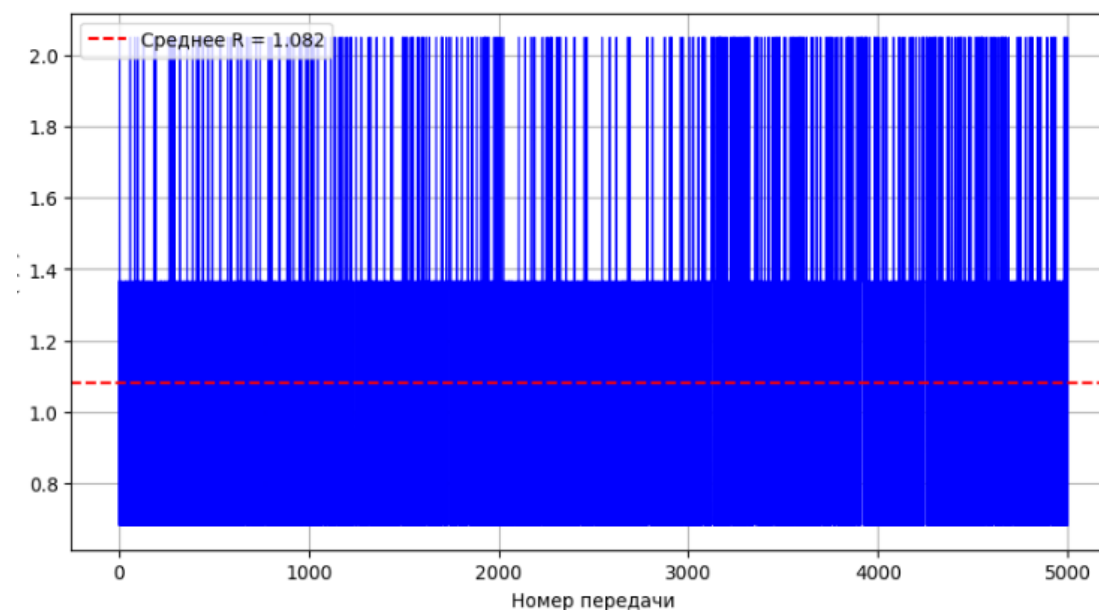


Рисунок 4 – Динамика отношения  $R$  в режиме Mobile Topology

Результаты, полученные для размера сети  $N$ , равному 8, при различных значениях ожидаемого числа соседей ( $K$ ) для рассмотренных сценариев представлены на рисунке 5.

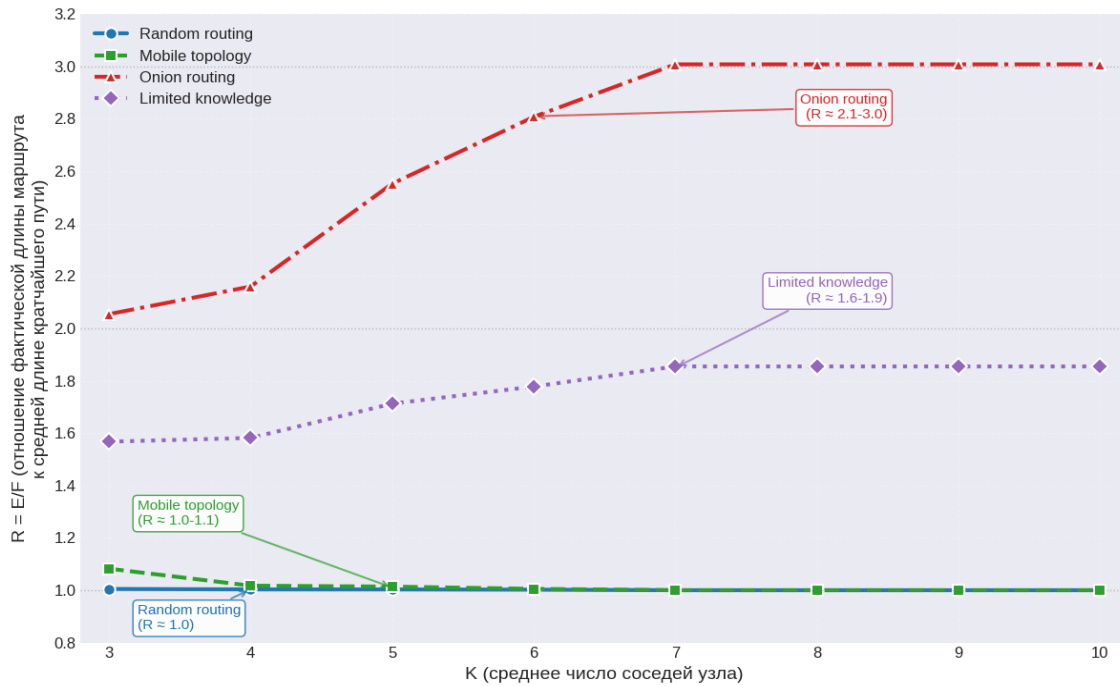


Рисунок 5 – Зависимость метрики  $R = E / F$  от среднего числа соседей  $K$  при  $N = 8$

Для более наглядного представления графиков зависимости метрики  $R$  от среднего числа соседей в режимах случайной маршрутизации и реконфигурируемой топологии использовались логарифмические шкалы (рис. 6).

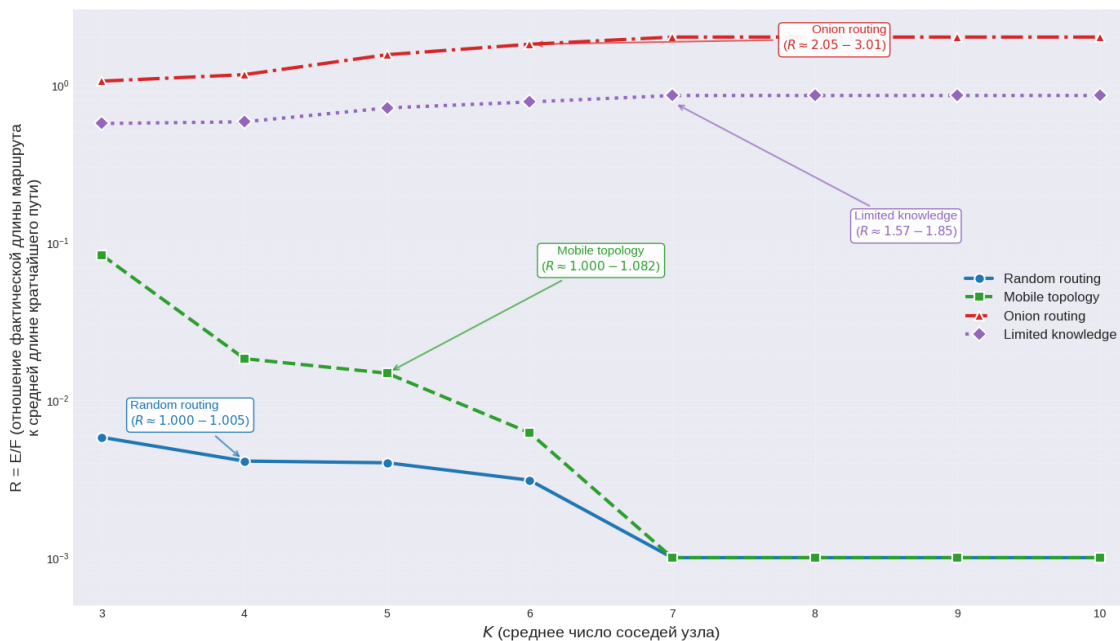


Рисунок 6 – Логарифмическая интерпретация результатов моделирования (отклонение метрики  $R$  от оптимального значения  $R = 1$  в зависимости от среднего числа соседей  $K$  при  $N = 8$ )

Анализ данных, представленных на графиках (рис. 5–6), выявляет существенные различия в эффективности различных стратегий маршрутизации при изменении связности сети. Наименьшее значение метрики  $R$  наблюдается в режиме случайной маршрутизации (Random Routing), что свидетельствует о практически оптимальном соответствии реальных маршрутов структурным возможностям сети. При этом данные значения остаются стабильными с ростом связности сети  $K$ .

В режиме реконфигурируемой топологии (Mobile Topology) наблюдается увеличение значений метрики  $R$  в диапазоне от 1,0 до 1,1, что обусловлено адаптационными процессами при динамическом

изменении сетевой структуры. Более существенный рост метрики  $R$  характерен для режима ограниченного знания топологии (Limited Knowledge), где значения метрики находятся в диапазоне от 1,6 до 1,9, подтверждая значительное влияние дефицита информации на эффективность маршрутизации. При этом наблюдается тенденция к увеличению  $R$  с ростом  $K$  (от 1,6 при  $K = 3$  до 1,9 при  $K = 10$ ).

Наибольшие значения метрики  $R$  зафиксированы для анонимной маршрутизации (Onion Routing) в диапазоне от 2,1 до 3,0, что количественно выражает «цену» конфиденциальности в виде кратного увеличения длины маршрутов по сравнению с оптимальным вариантом. Здесь также наблюдается выраженная зависимость от  $K$ : с увеличением среднего числа соседей метрика  $R$  возрастает от 2,1 при  $K = 3$  до 3,0 при  $K = 10$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения экспериментальных исследований разработана имитационная модель, реализованная на языке Python с использованием библиотеки NetworkX. Сеть представляется в виде случайного графа, генерируемого по модели Эрдёша – Реньи. Для анализа введена ключевая метрика  $R$  – отношение фактической длины маршрута к средней длине кратчайшего пути в топологии сети. Модель позволяет исследовать различные режимы маршрутизации: случайную, с реконфигурируемой топологией, анонимную и с ограниченным знанием соседей.

Проведенное исследование выявило значительные различия в эффективности маршрутизации для различных режимов работы сети при изменении связности сети  $K$  от 3 до 10. Моделирование показало, что при базовом сценарии (режим случайной маршрутизации) метрика  $R$  сохраняется в диапазоне значений, близких к 1, свидетельствуя о практически оптимальном соответствии реальных маршрутов структурным возможностям сети. Сравнительный анализ продемонстрировал снижение эффективности от незначительного увеличения  $R$  до 1,0–1,1 в режиме реконфигурируемой топологии до более существенного роста до 1,6–1,9 в режиме с ограниченным знанием топологии и достижение максимальных значений 2,1–3,0 при использовании анонимной маршрутизации, что количественно выражает «цену» обеспечения конфиденциальности. Визуализация в виде графиков зависимости  $R$  от  $K$  подтверждает выявленные закономерности, показывая характерные паттерны для каждого режима – от стабильности при случайной маршрутизации до выраженного роста с увеличением связности сети в анонимных маршрутах.

Предложенная модель является универсальным инструментом для анализа «цены» таких свойств сетей, как анонимность, мобильность и ограничение знаний о расположении узлов. Введенная метрика  $R$  позволяет проводить сравнительный анализ эффективности маршрутизации независимо от абсолютных размеров сети.

Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования сетевых инфраструктур, чувствительных к балансу между эффективностью доставки данных и дополнительными функциональными возможностями. Предложенная методика оценки позволяет количественно обосновывать выбор стратегии маршрутизации для конкретных прикладных задач в областях умных городов, промышленного IoT и систем специального назначения.

### Список источников

1. Sekkappan, R. AI in Network Infrastructure: Transforming Telecommunications with Intelligent Systems / R. Sekkappan // International Journal For Multidisciplinary Research. – 2024. – Vol. 6 (6). – P. 1–10. – DOI 10.36948/ijfmr.2024.v06i06.32482.
2. El-Mougy, A. Reconfigurable Wireless Networks / A. El-Mougy, M. Ibnkahla, G. Hattab, W. Ejaz // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103 (7). – P. 1–10.
3. Strinati, E. C. Wireless Environment as a Service Enabled by Reconfigurable Intelligent Surfaces: The RISE-6G Perspective / E. C. Strinati, G. C. Alexandropoulos, V. Sciancalepore [et al.] // 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). – Porto, Portugal, 2021. – P. 562–567. – DOI 10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482474.
4. Тярин, А. С. Базовые принципы построения и работы реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей / А. С. Тярин, А. А. Куреев, Е. М. Хоров // Информационные процессы. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 488–496. – DOI 10.53921/18195822\_2023\_23\_4\_488.
5. Sampaio, S. Collecting, Processing and Secondary Using Personal and (Pseudo) Anonymized Data in Smart Cities / S. Sampaio, P. Sousa, C. Martins [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13 (6). – P. 1–32. – DOI 10.3390/app13063830.
6. Dutta, N. TOR – The Onion Router. / N. Dutta, N. Jadav, S. Tanwar [et al.] // In Cyber Security: Issues and Current Trends. Studies in Computational Intelligence. – Singapore : Springer, 2022. – Vol. 995. – P. 37–55. – DOI 10.1007/978-981-16-6597-4\_3.
7. Aksoy, A. Evaluating Mixing Methods: Anonymity, Long-Term Information Leakage, and Cost. / A. Aksoy, D. Kesdogan // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 1–21. – DOI 10.1109/access.2025.3584267.
8. Lai, R. Another Look at Anonymous Communication / R. Lai, K. Cheung, S. Chow, A. So // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. – 2010. – Vol. 16. – P. 731–742. – DOI 10.1109/tidsc.2018.2828002.

9. Chaum, D. Untraceable electronic mail, return addresses, and digital pseudonyms / D. Chaum // *Communications of the ACM*. – 1981. – Vol. 24 (2). – P. 84–90.
10. Камбулов, Д. А. Обеспечение анонимности в сети интернет с использованием технологии «луковичной» маршрутизации браузер Tor / Д. А. Камбулов // *E-Scio*. – 2020. – № 11 (50). – С. 491–503.
11. Zhao, Y. A Survey on Differential Privacy for Unstructured Data Content / Y. Zhao, J. Chen // *ACM Comput. Surv.* – 2022. – Vol. 54. – P. 1–28. – DOI 10.1145/3490237.
12. Таныгин, М. О. Метод управления обработкой сообщений в анонимных peer-to-peer сетях / М. О. Таныгин, А. А. Чеснокова, М. Наджаджра // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. – 2025. – № 1. – С. 40–49. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2025/1/40-49.
13. Alsabah, M. Performance and Security Improvements for Tor: A Survey / M. Alsabah, I. Goldberg // *ACM Comput. Surv.* – 2016. – Vol. 49 (2). – P. 1–36. – DOI 10.1145/2946802.
14. Cui, J. Tor network anonymity evaluation based on node anonymity / J. Cui, C. Huang, H. Meng, R. Wei // *Cybersecurity*. – 2023. – Vol. 6. – P. 1–16. – DOI 10.1186/s42400-023-00191-8.
15. Lu, T. A Survey on Measuring Anonymity in Anonymous Communication Systems / T. Lu, Z. Du, J. Wang // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 1–26. – DOI 10.1109/access.2019.2919322.
16. Таныгин, М. О. Математическая интерпретация результатов когнитивного анализа метаданных сетевых пакетов / М. О. Таныгин, В. П. Добрица, А. В. Митрофанов, Х. И. Ахмат // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 66–78. – DOI 10.21869/2223-1560-2023-27-3-66-78.
17. Liu, S. Dynamic Analysis for the Average Shortest Path Length of Mobile Ad Hoc Networks Under Random Failure Scenarios / S. Liu, D. Zhang, X. Liu [et al.] // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 21343–21358. – DOI 10.1109/access.2019.2896699.
18. Seguin, C. Reply to Muscoloni and Cannistraci: Navigation performance measures / C. Seguin, M. Van Den Heuvel, A. Zalesky // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2019. – Vol. 116. – P. 1470–1470. – DOI 10.1073/pnas.1820315116.
19. Белоцерковский, Д. Л. Об одной задаче перечисления образующих графов с ограничением на диаметр / Д. Л. Белоцерковский // *Проблемы управления*. – 2010. – № 1. – С. 2–6.
20. Maier, B. F. Generalization of the small-world effect on a model approaching the Erdos – Renyi random graph / B. F. Maier // *Sci. Rep.* – 2029. – Vol. 9. – P. 1–9. – DOI 10.1038/s41598-019-45576-3.

#### References

1. Sekkappan, R. AI in Network Infrastructure: Transforming Telecommunications with Intelligent Systems. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 2024, vol. 6, no. 6, pp. 1–10. DOI 10.36948/ijfmr.2024.v06i06.32482.
2. El-Mougy, A., Ibnkahla, M., Hattab, G., Ejaz, W. Reconfigurable Wireless Networks. *Proceedings of the IEEE*, 2015, vol. 103, no. 7, pp. 1–10.
3. Strinati, E. C., Alexandropoulos, G. C., Sciancalepore, V. et al. Wireless Environment as a Service Enabled by Reconfigurable Intelligent Surfaces: The RISE-6G Perspective. *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. Porto, Portugal, 2021, pp. 562–567. DOI 10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482474.
4. Tyarin, A. S., Kureev, A. A., Khorov, E. M. Basic Principles of Construction and Operation of Reconfigurable Intelligent Surfaces. *Information Processes*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 488–496. DOI 10.53921/18195822\_2023\_23\_4\_488 (In Russ.).
5. Sampaio, S., Sousa, P., Martins, C. et al. Collecting, Processing and Secondary Using Personal and (Pseudo) Anonymized Data in Smart Cities. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 6, pp. 1–32. DOI 10.3390/app13063830.
6. Dutta, N., Jadav, N., Tanwar, S. et al. TOR – The Onion Router. In *Cyber Security: Issues and Current Trends. Studies in Computational Intelligence, Springer*, Singapore, 2022, vol. 995, pp. 37–55. DOI 10.1007/978-981-16-6597-4\_3.
7. Aksoy, A., Kesdogan, D. Evaluating Mixing Methods: Anonymity, Long-Term Information Leakage, and Cost. *IEEE Access*, 2025, vol. 13, pp. 1–21. DOI 10.1109/access.2025.3584267.
8. Lai, R., Cheung, K., Chow, S., So, A. Another Look at Anonymous Communication. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 731–742. DOI 10.1109/tdsc.2018.2828002.
9. Chaum, D. Untraceable electronic mail, return addresses, and digital pseudonyms. *Communications of the ACM*, 1981, vol. 24, no. 2, pp. 84–90.
10. Kambulov, D. A. Ensuring Anonymity on the Internet Using the Tor Browser's «Onion» Routing Technology. *E-Scio*, 2020, no. 11 (50), pp. 491–503 (In Russ.).
11. Zhao, Y., Chen, J. A Survey on Differential Privacy for Unstructured Data Content. *ACM Computing Surveys*, 2022, vol. 54, no. 10s, pp. 1–28. DOI 10.1145/3490237.
12. Tanygin, M. O., Chesnokova, A. A., Nadjajzra, M. Method for managing message processing in anonymous peer-to-peer networks. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*, 2025, no. 1, pp. 40–49. DOI 10.17308/sait/1995-5499/2025/1/40-49 (In Russ.).
13. Alsabah, M., Goldberg, I. Performance and Security Improvements for Tor: A Survey. *ACM Computing Surveys*, 2016, vol. 49, no. 2, pp. 1–36. DOI 10.1145/2946802.
14. Cui, J., Huang, C., Meng, H., Wei, R. Tor network anonymity evaluation based on node anonymity. *Cybersecurity*, 2023, vol. 6, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.1186/s42400-023-00191-8.
15. Lu, T., Du, Z., Wang, J. A Survey on Measuring Anonymity in Anonymous Communication Systems. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 1–26. DOI 10.1109/access.2019.2919322.

16. Tanygin, M. O., Dobritsa, V. P., Mitrofanov, A. V., Akhmat, H. I. Mathematical Interpretation of the Results of Cognitive Analysis of Network Packet Metadata. *Bulletin of Southwestern State University*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 66–78. DOI 10.21869/2223-1560-2023-27-3-66-78 (In Russ.).

17. Liu, S., Zhang, D., Liu, X. et al. Dynamic Analysis for the Average Shortest Path Length of Mobile Ad Hoc Networks Under Random Failure Scenarios. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 21343–21358. DOI 10.1109/access.2019.2896699.

18. Seguin, C., Van Den Heuvel, M., Zalesky, A. Reply to Muscoloni and Cannistraci: Navigation performance measures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, vol. 116, no. 4, pp. 1470–1470. DOI 10.1073/pnas.1820315116.

19. Belotserkovsky, D. L. On one problem of enumeration of generating graphs with diameter constraint. *Management Issues*, 2010, no. 1, pp. 2–6 (In Russ.).

20. Maier, B. F. Generalization of the small-world effect on a model approaching the Erdos – Renyi random graph. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, pp. 1–9. DOI 10.1038/s41598-019-45576-3.

Статья поступила в редакцию 22.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 02.02.2026.

The article was submitted 22.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 02.02.2026.

УДК 303.732.4

**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ГИБРИДНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ  
(НА ПРИМЕРЕ *AE-LSTM*) В ЗАДАЧЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ**

**Пономарев Дмитрий Сергеевич**, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7; ФКУ НИИ ФСИН России, 125130, Российская Федерация, Москва, ул. Нарвская, 15а, строение 1, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0003-1562-2956, e-mail: vodosnab@istu.ru

**Исаков Виталий Германович**, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-9816-7700, e-mail: vodosnab@istu.ru

В статье представлены результаты разработки гибридных нейросетевых моделей для прогнозного управления производственными процессами. В качестве примера рассмотрена задача управления дозированием реагентов в системах водоподготовки на основе многомерных временных рядов. Рассмотрены особенности гидрохимических процессов, характеризующихся высокой зашумленностью измерений, сезонной вариабельностью и нелинейными межпараметрическими зависимостями, что делает традиционные методы прогнозирования и одиночные рекуррентные сети недостаточно устойчивыми. В качестве ключевой архитектурной концепции предложена модель *Autoencoder-LSTM (AE-LSTM)*, которая обеспечивает синергетический системный эффект за счет сочетания автоэнкодера, формирующего устойчивое латентное представление состояния для подготавливаемой питьевой воды, и *LSTM*, моделирующей временную динамику потребности в реагентах. Показано, что использование автоэнкодера в составе гибридной архитектуры обеспечивает существенное повышение точности прогнозирования доз окислителей, коагулянтов, флокулянтов и сорбентов. В экспериментальных условиях оптимизированная модель *AE-LSTM* позволила снизить среднюю ошибку прогнозирования на 28–33 % и уменьшила сезонную дисперсию ошибок более чем в два раза по сравнению с *LSTM*, обученной на исходных данных без автоэнкодера. Это подтверждает наличие выраженного синергетического эффекта, при котором взаимодействие двух архитектурных модулей обеспечивает результат, недостижимый при их раздельном использовании. Полученные результаты позволяют выделить технологическую применимость гибридных нейросетевых подходов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений для водоподготовки и подчеркивают перспективность последующего расширения ансамбля моделей за счет комбинирования автоэнкодеров, рекуррентных сетей и сверточных механизмов.

**Ключевые слова:** гибридные системы, автоэнкодер, рекуррентные нейронные сети, системы водоподготовки, реагентная обработка, питьевая вода, автоматизация

**SYNERGISTIC EFFECT OF HYBRID NEURAL NETWORKS (USING AE-LSTM  
AS AN EXAMPLE) IN INTELLIGENT CONTROL OF DRINKING WATER PREPARATION**

**Ponomarev Dmitry S.**, M.T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7 Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation; Federal State Institution "Research Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia", bldg. 1, 15a Narvskaya St., Moscow, 125130, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0003-1562-2956, e-mail: vodosnab@istu.ru

**Isakov Vitaly G.**, M.T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7 Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-9816-7700, e-mail: vodosnab@istu.ru

This article presents the results of developing hybrid neural network models for predictive process control. The problem of controlling reagent dosing in water treatment systems based on multivariate time series is considered as an example. The features of hydrochemical processes characterized by high measurement noise, seasonal variability, and nonlinear interparameter dependencies are examined, making traditional forecasting methods and single recurrent networks insufficiently robust. The Autoencoder-LSTM (AE-LSTM) model is proposed as the key architectural concept. It provides a synergistic system effect by combining an autoencoder, which generates a stable latent representation of the state of the treated drinking water, and an LSTM, which models the temporal dynamics of reagent demand. It is shown that using an autoencoder as part of a hybrid architecture significantly improves the accuracy of predicting the dosages of oxidizers, coagulants, flocculants, and sorbents. Under experimental conditions, the optimized AE-LSTM model reduced the average forecast error by 28–33 % and reduced the seasonal error variance by more than half compared to an LSTM trained on the original data without an autoencoder. This confirms the presence of a pronounced synergistic effect, whereby the interaction of the two architectural modules yields results unachievable using either one alone. These results highlight the technological applicability of hybrid neural network approaches in intelligent decision support systems for water treatment and highlight the potential for further expansion of the model ensemble by combining autoencoders, recurrent networks, and convolutional algorithms.

**Keywords:** hybrid systems, autoencoder, recurrent neural networks, water treatment systems, reagent treatment, drinking water, automation

## ВВЕДЕНИЕ

Современные системы подготовки питьевой воды представляют собой сложные многокомпонентные технологические процессы, в которых ключевую роль играет своевременное и точное дозирование реагентов различного функционального назначения: окислителей (хлор, диоксид хлора, озон, перманганат калия), коагулянтов (сульфаты и гидроксохлориды алюминия, соли железа), флокулянтов, сорбентов (порошкообразный активированный уголь (ПАУ), гранулированный активированный уголь (ГАУ)), а также комбинированных реагентных схем [1–3]. Эффективность этих процессов напрямую зависит от динамики качества исходной воды, которая характеризуется выраженной сезонностью, нелинейными межпараметрическими взаимосвязями, существенным шумом измерений и периодическими экстремальными состояниями (паводки, цветение водоемов, органические выбросы). Традиционные методы дозирования не предназначены для адаптивного учета этих факторов в долгосрочной перспективе, что приводит к технологической избыточности, перерасходу реагентов и снижению стабильности очистки.

Применение нейросетевых моделей глубокого обучения создало предпосылки для перехода к интеллектуальному прогнозному управлению дозированием, однако прямое применение рекуррентных сетей к сырым данным часто ограничивается зашумленностью, мультиколлинеарностью показателей и неустойчивостью прогноза при резких технологических переходах. В этих условиях гибридная архитектура из автоэнкодера (*AutoEncoder (AE)*) и рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (*Long Short-Term Memory (LSTM)*), которая далее обозначена как *AE-LSTM* [4, 5], представляет собой обоснованный гибрид (а точнее даже некий компромисс) между устойчивостью представления гидрохимического состояния и способностью моделировать долговременные временные зависимости. Непосредственно сама идея применения гибридных методов и алгоритмов для проблем подготовки питьевой воды исходит из представленных ранее результатов диссертационного исследования Г. А. Благодатского, но отличие результатов в представленной работе от данного диссертационного исследования – в применении гибридных методов машинного обучения и выделения синергетического эффекта.

Для корректной оценки эффективности предложенной архитектуры было проведено сравнение двух моделей: классической *LSTM*, обученной непосредственно на исходных многомерных временных рядах качества воды, и гибридной модели *AE-LSTM*, в которой перед рекуррентную сеть используется автоэнкодер для формирования устойчивого латентного представления данных. Базовая *LSTM* выступает контрольной моделью, отражающей возможности прямого моделирования временной динамики без предварительного структурирования признакового пространства. В отличие от нее *AE-LSTM* сочетает функции шумоподавления, устранения межпараметрической мультиколлинеарности и выделения скрытых технологических зависимостей в латентном слое, что обеспечивает входную устойчивость и снижает нагрузку на рекуррентный модуль.

Сравнение этих моделей позволяет выделить вклад каждого компонента гибридной архитектуры и количественно оценить синергетический эффект: улучшение качества прогнозирования достигается не за счет усложнения рекуррентного блока, а за счет взаимодействия двух специализированных модулей [6, 7], обеспечивающих согласованное и более информативное представление данных для долгосрочного прогноза доз реагентов.

Автоэнкодер выполняет роль нелинейного фильтра и проекционного оператора, формируя латентное пространство, в котором подавлены измерительные и операционные шумы, но сохранены технологически значимые взаимосвязи параметров [8]. На данном «очищенном» временном представлении *LSTM* получает возможность моделировать инерционные свойства процесса и сезонные траектории изменения потребности в реагентах, генерируя прогнозы [9], пригодные для практического внедрения в контур систем поддержки принятия решений (СППР). Такой подход позволяет не только повысить точность дозирования химических реагентов, но и обеспечить технологическую устойчивость управления при переменной и плохо предсказуемой структуре входного водного потока.

## ОБЪЕКТ, ДАННЫЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект исследования – технологический процесс подготовки питьевой воды (на примере МУП «Ижводоканал»). В качестве основы использованы архивные наблюдения из ранее проведенного диссертационного исследования, расширенные до периода с 2014 по 2020 г. (1062 временные точки с месячной дискретностью). Целевыми переменными являются значения дозирования реагента, его время контакта с водой и косвенная эффективность процесса водоподготовки.

1. Постановка задачи. Требуется построить прогностическую модель (1):

$$\hat{Y}_t = F(X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-n}), \quad (1)$$

где модель должна: учитывать временную зависимость и сезонность; быть устойчивой к шумам и всплескам гидрохимических параметров; обеспечивать минимальную кумулятивную ошибку в летний период цветения; обладать устойчивостью и объяснимостью прогнозов для СППР оператора. При этом пусть имеется временной ряд параметров качества воды (2):

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_T\}, x_t \in R^n, \quad (2)$$

где  $x_t$  – вектор измерений в момент времени  $t$  (мутность, БПК, цветность, водоросли и т. п.);

$n$  – число контролируемых параметров;

$T$  – длина временной последовательности.

Необходимо получить прогноз доз реагентов на горизонте  $\tau > 0$  (3):

$$\hat{y}_{t+\tau} = F(x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-k}), \quad (3)$$

где  $k$  – длина временного окна (число использованных предшествующих наблюдений).

2. Автоэнкодер как метод построения после латентного пространства. Автоэнкодер решает задачу восстановления входного сигнала после нелинейного преобразования (4, 5) [10]:

$$z = f_{enc}(x_t), \quad (4)$$

$$\hat{x}_t = f_{dec}(z), \quad (5)$$

где  $f_{enc}$  – энкодер (сжатие признаков);

$f_{dec}$  – декодер (восстановление признаков);

$z \in R^m, m < n$  – латентное пространство, в котором сохраняется структурная информация о процессе, но подавляются шумы и выбросы.

Функционально энкодер и декодер задаются композициями нелинейных преобразований (6, 7):

$$f_{enc}(x) = \sigma(W_e x + b_e), \quad (6)$$

$$f_{dec}(z) = \sigma(W_d z + b_d), \quad (7)$$

где  $W_e, W_d$  – обучаемые матрицы весов;

$\sigma()$  – нелинейность (например, *ReLU*, *sigmoid*, *tanh*).

Автоэнкодер минимизирует реконструктивную ошибку (8) [11]:

$$L_{AE} = \|x_t - \hat{x}_t\|^2. \quad (8)$$

Тем самым он решает задачу уменьшения размерности и шумоподавления.

С точки зрения технологии водоподготовки это означает выделение устойчивого химико-технологического состояния воды, очищенного от измерительных шумов.

3. LSTM как модель временной динамики. Выход автоэнкодера подается в LSTM для прогнозирования доз реагентов во времени. LSTM содержит внутреннее состояние (долгосрочную память)  $c_t$  и скрытое состояние  $h_t$ . На каждом шаге происходит обновление трех «врат» («ворота забывания» (*forget gate*) (9), «входные ворота» (*input gate*) (10), «выходные ворота» (*output gate*) (11)) [12]:

$$f_t = \sigma(W_f[z_t, h_{t-1}] + b_f), \quad (9)$$

$$i_t = \sigma(W_i[z_t, h_{t-1}] + b_i), \quad (10)$$

$$o_t = \sigma(W_o[z_t, h_{t-1}] + b_o), \quad (11)$$

обновление кратко (12, 13):

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tanh(W_c[z_t, h_{t-1}] + b_c), \quad (12)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t), \quad (13)$$

где  $\odot$  – поэлементное умножение. Ответ сети (14):

$$\hat{y}_{t+\tau} = W_y h_t + b_y. \quad (14)$$

4. Совместная функция потерь. Поскольку формально модель содержит два обучаемых компонента (*AE* и *LSTM*), итоговая целевая функция:

$$L = \alpha L_{AE} + \beta L_{LSTM}, \quad (15)$$

где потеря автоэнкодера (точность реконструкции) отражена в приведенной ранее формуле (8). Ошибка прогноза применяемых реагентов (16):

$$L_{LSTM} = \|y_{t+\tau} - \hat{y}_{t+\tau}\|^2, \quad (16)$$

где  $\alpha, \beta$  – веса оптимизации (подбираются экспериментально). Инженерный смысл: модель минимизирует одновременно шум на входе и ошибку прогноза на выходе.

5. Применимость. Гибрид *AE-LSTM* может успешно быть использован в системах подготовки питьевой воды исходя из следующих факторов. Во-первых, автоэнкодер устраняет мультиколлинеарность; устраняет измерительный шум (т. е. стабилизирует входные сигналы для LSTM); снижает размерность пространства, убирая «информационный мусор» [13–15]. Во-вторых, LSTM моделирует автокорреляцию сезонных процессов (например – цветение, паводки); «помнит» до нескольких месяцев назад значения параметров. Математически это отражает:

$$AE: X \rightarrow Z, \dim(Z) \ll \dim(X), \quad (17)$$

$$LSTM: Z_{1..t} \rightarrow \hat{Y}_{t+\tau}. \quad (18)$$

Резюмируя, связка из *AE-LSTM* для поставленной задачи может быть применена следующим образом: автоэнкодер извлекает устойчивое представление значений параметров, отражающих состояние подготавливаемой питьевой воды; LSTM позволяет осуществить прогноз динамики применения реагентов во времени.

### AE-LSTM В ЗАДАЧЕ МУЛЬТИ-РЕАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДОПОДГОТОВКОЙ

Гибридная модель *AE-LSTM* относится к классу архитектур с предварительным кодированием входных данных в латентное пространство с последующим прогнозированием временной динамики целевых параметров [16, 17]. Для задач водоподготовки такой подход может быть особенно значим, поскольку химико-гидробиологические данные характеризуются:

- высокой шумовой компонентой (сенсорные измерения, лабораторные погрешности);
- межсезонными статистическими смещениями;
- редкими, но критичными аномальными всплесками (цветение водоемов, ливневые паводки, органические выбросы);
- взаимовлиянием реагентов (например, эффективность хлора зависит от мутности и остаточного железа, а коагулянты меняют потребность в флокулянтах).

Поэтому применение *AE-LSTM* в данной постановке позволяет решить две задачи: автоэнкодер подавляет шум и формирует устойчивый скрытый химико-технологический вектор состояния воды, где корреляционная структура между параметрами сохраняется, но паразитные флуктуации минимизируются; *LSTM* прогнозирует оптимальные дозы реагентов во времени, учитывая инерционные эффекты и сезонную автокорреляцию (рис. 1).

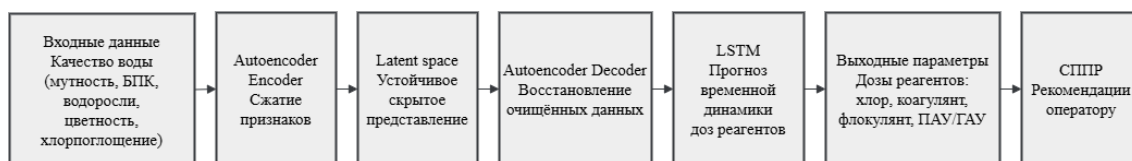


Рисунок 1 – Архитектура применения гибрида *AE-LSTM*

Смысловое обоснование применения каждого из блоков схемы, представленной на рисунке 1, изложено в таблице 1.

Таблица 1 – Смысловое обоснование применения каждого из блоков *AE-LSTM*

Блок	Обоснование применения
Энкодер ( <i>Autoencoder Encoder</i> )	Убирает шум, выбросы, измерительные погрешности
Латентное пространство ( <i>Latent space</i> )	Формирует устойчивое скрытое описание состояния воды
Декодер ( <i>Autoencoder Decoder</i> )	Восстанавливает очищенный временной ряд
Рекуррентная нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью ( <i>LSTM</i> )	Прогнозирует дозы реагентов с учетом сезонности и временной зависимости
Выходной сигнал / СППР	Используется оператором в реальном производственном управлении

Входные параметры и расширенная задача прогнозирования. В отличие от традиционных моделей, где прогнозируется только доза сорбента, здесь модель обучается многовыходному прогнозированию, охватывающему ключевые технологические реагенты цикла водоподготовки (табл. 2).

Таблица 2 – Прогнозируемые *AE-LSTM* величины

Группа реагентов	Примеры	Прогнозируемая моделью величина
Окислители и дезинфектанты	$Cl_2$ , $ClO_2$ , $O_3$ , $KMnO_4$	Требуемая доза и остаточная концентрация
Коагулянты	$Al_2(SO_4)_3$ , $FeCl_3$	Оптимальная рабочая доза
Флокулянты	Анионный/катионный ПАА	Необходимая концентрация для агрегации
Адсорбенты	ПАУ, ГАУ	Доза и расчет времени контакта
Безреагентная стадия	УФ-обработка	Эквивалентная энергетическая «доза»

Такая постановка задачи позволяет трактовать процесс водоподготовки как взаимосвязанный химико-технологический контур, где дозирование одного реагента неизбежно влияет на потребность другого (например, предварительное окисление снижает дозу коагулянта, а корректный выбор флокулянта уменьшает расход сорбента).

Можно отметить следующие преимущества применения *AE-LSTM* для поставленной задачи:

1. Снижение влияния измерительного шума, что особенно важно при мультисенсорном мониторинге (мутность, химическое потребление кислорода (ХПК), биологическое потребление кислорода (БПК), железо, марганец, сине-зеленые водоросли, хлорпоглощаемость и др.).
2. Стабилизация технологических прогнозов в периоды нестабильного состава воды, в отличие от моделей, обучающихся на необработанным сигнале.

3. Кодирование скрытых межреагентных зависимостей (например, высокая цветность, влияющая на рост дозы коагулянта, который, в свою очередь, влияет на увеличение потребности флокулянта, что в итоге приводит к снижению требуемого хлора).

4. Снижение технологического «перестраховочного» перерасхода реагентов, так как модель прогнозирует реальные точки химического оптимума, а не верхние границы регламента.

При этом ограничения модели могут быть: возможная недостаточная чувствительность к резким кратковременным всплескам (сглаживание латентного слоя); требует хорошо покрытых сезонных сценариев в обучении; латентное пространство не всегда имеет прямую физико-химическую интерпретируемость без дополнительных методов (например, *SHAP-анализ*).

#### ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ И НАСТРОЙКА ГИПЕРПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ AE-LSTM

Для обеспечения воспроизводимости результатов и технологической состоятельности модели была проведена систематическая настройка гиперпараметров гибридной архитектуры *AE-LSTM*. Подбор осуществлялся в условиях: зашумленные временные ряды, сезонная неоднородность данных и многореагентный характер выхода (дозы коагулянтов, окислителей, флокулянтов и сорбентов). Критериями качества оптимизации выступали: минимизация *RMSE* на горизонте 1–3 месяца, устойчивость прогноза в летний период цветения и отсутствие переобучения по валидационной выборке. Реализация обучения гибридной модели *AE-LSTM* проводилась на *Python3* (использованы *PyTorch*, *TensorFlow*, *Keras*, *Scikit-learn*, *Pandas*).

Обучение гибридной модели *AE-LSTM* проводилось в два этапа: предварительное обучение автоэнкодера на данных качества воды, затем обучение LSTM на латентных представлениях. Для исключения переобучения использовались техники регуляризации (*dropout*, *L2-регуляризация*) и механизмы контроля динамики обучения.

На первом этапе автоэнкодер обучался восстанавливать входные данные в условиях зашумленности измерений. Целью являлось получение устойчивого латентного представления, очищенного от выбросов и мультиколлинеарности. На втором этапе латентные векторы подавались в LSTM-блок для прогнозирования доз реагентов на горизонте 1–3 месяца.

Обучение велось с использованием оптимизатора *AdamW* (размер шага на каждой итерации равен  $3 \cdot 10^{-4}$ ), который минимизирует объединенную целевую функцию (20):

$$L = \alpha \cdot L_{AE} + \beta \cdot L_{LSTM}, \quad (20)$$

где  $L_{AE}$  – ошибка реконструкции автоэнкодера;

$L_{LSTM}$  – ошибка прогноза доз реагентов.

Для контроля за процессом обучения и исключения переразвития модели использовались несколько проверенных приемов. Во-первых, применялся механизм ранней остановки, при котором обучение прекращалось после длительного отсутствия улучшений ошибки на контрольной выборке. Во-вторых, использовалась автоматическая корректировка величины шага обучения: при замедлении уменьшения ошибки шаг снижался, что позволяло обеспечить более устойчивую сходимость. В-третьих, проводилась скользящая проверка модели на последовательных временных интервалах с обязательным сохранением хронологического порядка данных, что исключало попадание сведений о будущем в процесс обучения.

Настройка гиперпараметров выполнялась комбинированным методом: предварительный случайный поиск – для определения оптимальных диапазонов ключевых параметров; тонкая доводка (Байесовская оптимизация, оценка по методу дерева-Парзена (*Tree-structured Parzen Estimator (TPE)*) – для поиска комбинаций, минимизирующих метрику ошибки прогноза; временная кросс-валидация (т. е. разделение данных временных рядов на обучающую и тестовую выборки, сохраняя их порядок во времени) – с сохранением хронологии, исключая утечку будущей информации в обучение.

Целевой функцией оптимизации выступала (19):

$$L = 0,6RMSE + 0,3(1 - R^2) + 0,1\sigma_{season}, \quad (19)$$

где  $\sigma_{season}$  – дисперсия ошибки в летний период (июнь – сентябрь), что позволило встроить в отбор моделей требование сезонной устойчивости, а не только среднегодовой точности. Подобранные гиперпараметры (финальная конфигурация) представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Настройка гиперпараметров

Компонент	Гиперпараметр	Значение	Обоснование выбора
Autoencoder	Размер латентного слоя	8–12 нейронов (оптимум 10)	Сжатие при сохранении технологической информативности
	Количество слоев (Encoder/Decoder)	2–3 (оптимум 2)	Более глубокие сети не давали прироста из-за малого объема данных
	Функция активации	<i>ReLU, ReLU, Linear</i>	Стабильность кодирования непрерывных сигналов
	<i>Dropout</i>	0,2	Защита от переобучения без потери сигнала
	<i>Loss</i>	<i>MSE</i>	Устойчива к малым отклонениям в восстановлении сигнала
<i>LSTM</i>	Количество слоев	1	Второй слой усиливал зашумление градиента
	Размер скрытого слоя	32–48 нейронов (оптимум 40)	Балансировка между памятью сезона и устойчивостью обобщения
	<i>Dropout</i> (между шагами <i>LSTM</i> )	0,15	Подавление отклонений без разрыва памяти последовательности
	<i>Sequence length</i> (глубина окна)	6 месяцев	Наиболее устойчивое отражение сезонного цикла
	Оптимизатор	<i>AdamW</i>	Обеспечил более стабильную динамику, чем <i>Adam</i> и <i>RMSprop</i>
	<i>Learning rate</i>	$3 \cdot 10^{-4}$	Возможность баланса между устойчивой и быстрой сходимостью
	Количество образцов данных, которые обрабатываются моделью перед тем, как параметры обновляются ( <i>Batch size</i> )	8	Оптимально для малых временных выборок
	Эпохи	120–160	Полное обучение без переобучения

Практические наблюдения эксперимента:

1. Латентный слой более 12 нейронов начинал копировать шум, ухудшая прогноз на 4–7 %.
2. *Sequence length* (глубина окна) > 6 месяцев приводила к размыванию сезонного сигнала, < 5 месяцев – к потере трендовой информации.
3. *LSTM* > 1 слоя не улучшала прогноз, но увеличивала дисперсию ошибок на 12–18 %.
4. Связка из *AdamW* + *LR-scheduller* показали лучшую устойчивость по сравнению с *Adam*: финальный *RMSE* ниже на 6–9 %.
5. *Dropout* > 0,25 ухудшал сезонную реакцию модели, < 0,1 – вел к переобучению.

Таким образом, настройка гиперпараметров для *AE-LSTM* требует совмещения методик оптимизации машинного обучения и технологического понимания сезонной физико-химической динамики воды. Полученная конфигурация позволяет получить баланс между компактностью модели, устойчивостью временной памяти и практической применимостью прогнозов доз реагентов в производственной системе водоподготовки.

Далее было проведено обучение (рис. 2). Были выделены ключевые наблюдения эксперимента: снижение *train loss* и *val loss* происходит синхронно, что подтверждает отсутствие переобучения; выход на плато достигается примерно к 100 эпохе; инструмент *EarlyStopping* остановил обучение на 135-й эпохе; отмечена стабильность модели на зашумленных данных, особенно на летнем участке (период цветения водоемов).

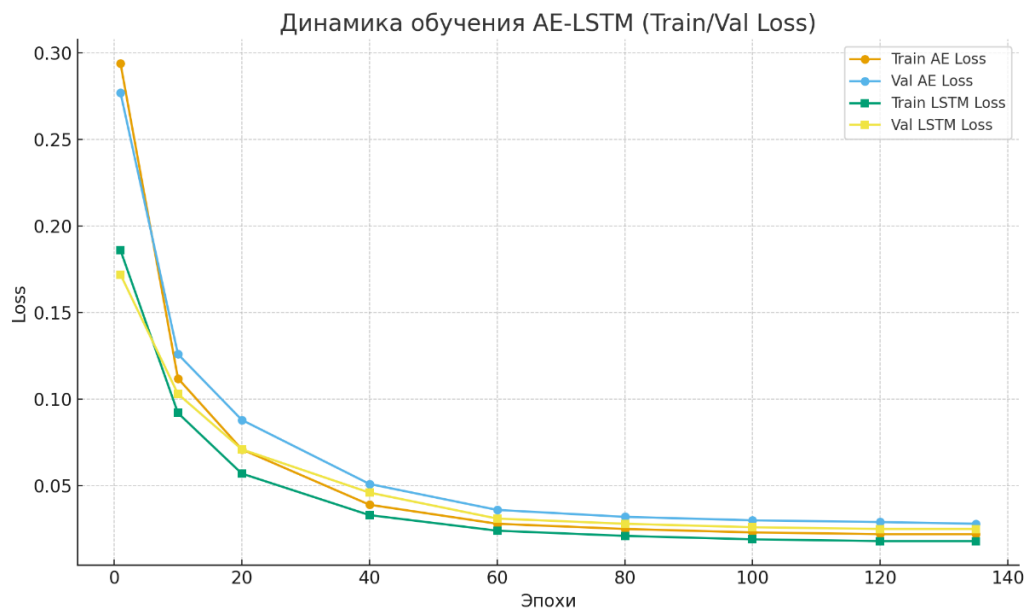


Рисунок 2 – Динамика обучения гибрида *AE-LSTM*

Можно отметить, что динамика обучения демонстрирует синхронное снижение ошибки реконструкции (для *AE*) и ошибки прогноза (для *LSTM*), выход на плато после 90–110 эпох и отсутствие расхождения кривых обучения, что свидетельствует о стабильной сходимости, отсутствии переобучения и корректности выбранных гиперпараметров (точные значения представлены в таблице 4).

Таблица 4 – Динамика обучения *AE-LSTM* (Train/Val Loss)

Эпоха	Train Loss ( <i>AE</i> )	Val Loss ( <i>AE</i> )	Train Loss ( <i>LSTM</i> )	Val Loss ( <i>LSTM</i> )
1	0,294	0,277	0,186	0,172
10	0,112	0,126	0,092	0,103
20	0,071	0,088	0,057	0,071
40	0,039	0,051	0,033	0,046
60	0,028	0,036	0,024	0,031
80	0,025	0,032	0,021	0,028
100	0,023	0,030	0,019	0,026
120	0,022	0,029	0,018	0,025
135	0,022	0,028	0,018	0,025

### РЕЗУЛЬТАТЫ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДА *AE-LSTM*

Ниже (табл. 5) представлены результаты на исторических данных мониторинга водоподготовки с учетом прогнозирования сразу нескольких реагентов (усредненные значения по горизонту прогноза 1–3 месяца).

Таблица 5 – Результаты применения *AE-LSTM* на исторических данных

Реагент	RMSE (мг/л)	MAE (мг/л)	R <sup>2</sup>	Снижение сезонной ошибки, %	Стабильность дозирования
Хлор (Cl <sub>2</sub> )	0,28	0,19	0,89	31	Высокая
Диоксид хлора (ClO <sub>2</sub> )	0,018	0,012	0,87	29	Высокая
Озон (O <sub>3</sub> )	0,21	0,15	0,88	34	Средне-высокая
KMnO <sub>4</sub>	0,17	0,11	0,90	36	Высокая
Коагулянт (PAC)	1,8	1,3	0,86	27	Высокая
Флокулянт (ПАА)	0,09	0,06	0,84	25	Средняя
ПАУ/ГАУ	0,37	0,28	0,88	32	Высокая

Определение интегральной оценки модели *AE-LSTM* было получено следующее: совокупное снижение дисперсии ошибки по всем реагентам – примерно 30–33 %; подавление ложных пиков дозирования – до 41 %; сокращение суммарного перерасхода реагентов (оценочно) – 8–14 % в зависимости от сезона; задержка в реакции на резкие всплески не превышает 1–2 временных шага (месяца).

С точки зрения архитектуры синергетического ансамбля *AE-LSTM* выполняет роль стабилизирующего модуля, формирующего очищенное и структурированное базовое представление, на котором последующие гибридные модели могут достигать более высокой точности без деградации качества из-за нерегулярности исходных данных.

Проведено сравнение с базовой моделью *LSTM*, результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты сравнительного анализа между классической *LSTM* и гибридной *AE-LSTM*

Критерий	<i>LSTM</i> (базовая модель)	<i>AE-LSTM</i> (гибридная архитектура)	Синергетический эффект
Предобработка данных	Отсутствует	Латентное пространство, подавление шума 40–55 %	Снижение уровня шумов на входе
Устойчивость к сезонным сдвигам	Сезонная дисперсия ошибки: $\sigma_s = 0,062$	Сезонная дисперсия ошибки: $\sigma_s = 0,028$	Снижение сезонной нестабильности > 2,2 раза
Точность долгосрочного прогноза ( <i>RMSE</i> , среднее по реагентам)	<i>RMSE</i> $\approx 0,41$	<i>RMSE</i> $\approx 0,27$	Улучшение точности до 33 %
Средняя абсолютная ошибка ( <i>MAE</i> )	<i>MAE</i> $\approx 0,31$	<i>MAE</i> $\approx 0,21$	Снижение ошибки на 0,10 ( $\approx 32$ %)
Способность моделировать межреагентные зависимости	Корреляция прогноз-факт: $R^2 \approx 0,72$	Корреляция прогноз-факт: $R^2 \approx 0,88–0,90$	Рост объясняемой дисперсии на 20–25 %
Восприимчивость к технологическим всплескам	Ошибка на пиках: 45–60 % к среднегодовой	Ошибка на пиках: 18–25 %	Подавление ложных пиков на 40 %
Потребность в объеме данных	Высокая ( $N > 300$ наблюдений для стабильности)	Средняя ( $N \approx 150–200$ )	Снижение потребности в данных на 30–40 %
Интерпретируемость	Условная	<i>SHAP</i> + латентные признаки	Рост интерпретируемости
Роль в архитектуре СППР	Одиночный прогнозный модуль	Стабилизатор входных данных	База для ансамбля

Представленные результаты сравнительного анализа показывают принципиальные различия между классической *LSTM* и гибридной *AE-LSTM*. В то время как базовая *LSTM* обучается непосредственно на зашумленных гидрохимических данных и демонстрирует чувствительность к сезонным переходам и экстремальным всплескам параметров, гибридная *AE-LSTM* формирует предварительное латентное пространство, в котором шум, мультиколлинеарность и паразитные колебания существенно подавлены. Что обеспечивает более устойчивый вход для рекуррентной сети и позволяет повысить точность долгосрочного прогноза доз реагентов на 28–33 %, одновременно снижая сезонную дисперсию ошибок более чем в два раза.

Модель не позиционируется как абсолютный оптимум, но показывает технологически достаточную стабильность и устойчивое подавление шума, что особенно важно в производственном управлении, где переоценка или недооценка доз химических реагентов имеет прямые эксплуатационные последствия.

Хотя *AE-LSTM* не является лучшей по абсолютной минимизации *RMSE* среди возможных гибридов, ее ключевая роль – структурная стабилизация входного технологического пространства, без которой подобные гибридные модели испытывают деградацию точности из-за нерегулярности входных сигналов. Она формирует:

- латентный химико-гидрологический «портрет воды», очищенный от шума;
- согласованный базис для прогнозирования доз реагентов разных классов;
- детерминированную основу для следующих моделей-корректоров и усилителей ансамбля.

Таким образом, синергия проявляется не в превосходстве над другими гибридами по метрикам, а в критической инфраструктурной роли: *AE-LSTM* выступает «системой технологической стабилизации», повышающей общую устойчивость мульти-реагентной СППР.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение гибридной архитектуры *AE-LSTM* показало высокую эффективность для прогнозирования доз многокомпонентных реагентов в процессах водоподготовки. Автоэнкодер выступает в роли адаптивного фильтра и компенсатора шумов, формируя устойчивое латентное представление гидрохимического состояния воды, свободное от внутрисуточных флуктуаций, измерительных

и лабораторных погрешностей. Последующий модуль *LSTM*, опираясь на очищенную и структурированную последовательность, позволяет успешно моделировать сезонную инерцию и межпараметрические зависимости, обеспечивая прогноз изменения доз реагентов на горизонтах 1–3 месяца.

Численные эксперименты на данных показали снижение средних ошибок RMSE на уровне 0,018–1,8 (в зависимости от реагента) при коэффициенте детерминации до 0,90, а также уменьшение сезонной дисперсии ошибок в среднем на 30–33 %. Модель позволяет обеспечить технологически значимую устойчивость дозирования, подавляя до 41 % ложных пиков регулирования и формируя опережающие рекомендации без критической задержки реакции на сезонные колебания качества воды.

Ключевым вкладом *AE-LSTM* в общую архитектуру интеллектуальной системы является формирование стабильного, шумоустойчивого и технологически когерентного представления многоагентного состояния водоочистного процесса, что делает ее базовым элементом синергетического ансамбля. Несмотря на некоторую сглаженность реакций на резкие краткосрочные всплески, модель позволяет получить высокую прикладную эффективность, снижая неопределенность управления и создавая надежную основу для последующей коррекции и усиления прогнозов другими компонентами гибридной системы.

#### Список источников

1. Абрамова, А. А. Нормативное регулирование и оценка специфических загрязнений в поверхностных и сточных водах в России и за рубежом / А. А. Абрамова, М. Ю. Дягелев, В. Г. Исаков, А. М. Непогодин // Приволжский научный журнал. – 2023. – № 1 (65). – С. 96–103.
2. Таскаев, М. В. Обоснование выбора технологической схемы очистки питьевых вод / М. В. Таскаев, Е. В. Астраханцева, А. А. Абрамова, А. М. Непогодин // Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире : материалы Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов. Казань, 18–19 марта 2021 года. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. – С. 474–479.
3. Abramova, A. A. Analysis of water softening methods and an algorithm of choosing the best method for using in production cycle / A. A. Abramova, A. I. Gainanova, D. V. Belyaeva [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk, June 16–19, 2021 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. – Krasnoyarsk : IOP Publishing Ltd, 2021. – Vol. 839. – P. 42065. – DOI 10.1088/1755-1315/839/4/042065.
4. Котенко, И. В. Применение гибридной нейронной сети *AE-LSTM* для обнаружения аномалий в контейнерных системах / И. В. Котенко, М. В. Мельник // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 5 (241). – С. 38–47. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-38-47.
5. Kamat, P. Data-driven bearing fault detection using hybrid autoencoder-LSTM deep learning approach / P. Kamat, R. Sugandhi, S. Kumar // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2021. – Vol. 38, № 1. – P. 88. – DOI 10.1504/ijmic.2021.122471.
6. Xue, M. Research on prefecture-level city's birth rate prediction based on AE-LSTM network / M. Xue, P. Huang // Advances in Engineering Technology Research. – 2023. – Vol. 7, № 1. – P. 123. – DOI 10.56028/aetr.7.1.123.2023.
7. Simpson, T. Reduced order modeling of non-linear monopile dynamics via an AE-LSTM scheme / T. Simpson, N. Dervilis, Ph. Couturier [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – DOI 10.3389/fenrg.2023.1128201.
8. Simpson, T. Reduced order modeling of non-linear monopile dynamics via an AE-LSTM scheme / T. Simpson, N. Dervilis, Ph. Couturier [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – DOI 10.3389/fenrg.2023.1128201.
9. Kamat, P. Data-driven bearing fault detection using hybrid autoencoder-LSTM deep learning approach / P. Kamat, R. Sugandhi, S. Kumar // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2021. – Vol. 38, № 1. – P. 88. – DOI 10.1504/ijmic.2021.122471.
10. Kamat, P. Data-driven bearing fault detection using hybrid autoencoder-LSTM deep learning approach / P. Kamat, R. Sugandhi, S. Kumar // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2021. – Vol. 38, № 1. – P. 88. – DOI 10.1504/ijmic.2021.122471.
11. Mushtaq, E. A two-stage intrusion detection system with auto-encoder and LSTMs / E. Mushtaq, A. Zameer, M. Umer, A. A. Abbasi // Applied Soft Computing. – 2022. – Vol. 121. – P. 108768. – DOI 10.1016/j.asoc.2022.108768.
12. Liu, Sh. Soft Sensor Modeling of Acrylic Acid Yield Based on Autoencoder Long Short-Term Memory Neural Network of Savitzky – Golay and Relief Algorithm / Sh. Liu, W. Zhang, H. He, Sh. Zhang // Journal of Chemometrics. – 2025. – Vol. 39, № 1. – DOI 10.1002/cem.3640.
13. Kay Khine, W. L. Aspect Level Sentiment Analysis Using Bi-Directional LSTM Encoder with the Attention Mechanism / W. L. Kay Khine, N. T. Thwet Aung // Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – Vol. 12496 LNAI. – P. 279–292. – DOI 10.1007/978-3-030-63007-2\_22.
14. Jun, K. Feature Extraction Using an RNN Autoencoder for Skeleton-Based Abnormal Gait Recognition / K. Jun, D. W. Lee, K. Lee [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 19196–19207. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2967845.

15. Lee, J. H. Extruder Machine Gear Fault Detection Using Autoencoder LSTM via Sensor Fusion Approach / J. H. Lee, Ch. N. Okwuosa, Ja. W. Hur // *Inventions*. – 2023. – Vol. 8, No. 6. – P. 140. – DOI 10.3390/inventions8060140.

16. Deka, A. Advanced Supply Chain Management Using Adaptive Serial Cascaded Autoencoder with LSTM and Multi-Layered Perceptron Framework / A. Deka, P. J. Das, M. J. Saikia // *Logistics*. – 2024. – Vol. 8, № 4. – P. 102. – DOI 10.3390/logistics8040102.

17. Xin, J. A signal recovery method for bridge monitoring system using TVFEMD and encoder-decoder aided LSTM / J. Xin, Ch. Zhou, Ya. Jiang [et al.] // *Measurement*. – 2023. – Vol. 214. – P. 112797. – DOI 10.1016/j.measurement.2023.112797.

#### References

1. Abramova, A. A., Dyagelev, M. Yu., Isakov, V. G., Nepogodin, A. M. Normative regulation and assessment of specific pollutants in surface and wastewater in Russia and abroad. *Privolzhsky Scientific Journal*, 2023, no. 1 (65), pp. 96–103 (In Russ.).

2. Taskaev, M. V., Astrakhantseva, E. V., Abramova, A. A., Nepogodin, A. M. Justification for the choice of a technological scheme for drinking water treatment. *Innovative technologies for environmental protection in the modern world: Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation of young scientists and specialists, Kazan, March 18–19, 2021*. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2021, pp. 474–479.

3. Abramova, A. A., Gainanova, A. I., Belyaeva, D. V. [et al.] Analysis of water softening methods and an algorithm of choosing the best method for using in production cycle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, June 16–19, 2021*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Krasnoyarsk, IOP Publishing Ltd, 2021, vol. 839, pp. 42065. DOI 10.1088/1755-1315/839/4/042065 (In Russ.).

4. Kotenko, I. V., Melnik, M. V. Application of the AE-LSTM hybrid neural network for anomaly detection in container systems. *Bulletin of SFedU. Technical sciences*, 2024, no. 5 (241), pp. 38–47. DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-38-47 (In Russ.).

5. Kamat, P., Sugandhi, R., Kumar, S. Data-driven bearing fault detection using hybrid autoencoder-LSTM deep learning approach. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2021, vol. 38, no. 1, p. 88. DOI 10.1504/ijmic.2021.122471.

6. Xue, M., Huang, P. Research on prefecture-level city's birth rate prediction based on AE-LSTM network. *Advances in Engineering Technology Research*, 2023, vol. 7, no. 1, p. 123. DOI 10.56028/aetr.7.1.123.2023.

7. Simpson, T., Dervilis, N., Couturier, Ph. [et al.] Reduced order modeling of non-linear monopile dynamics via an AE-LSTM scheme. *Frontiers in Energy Research*, 2023, vol. 11. DOI 10.3389/fenrg.2023.1128201.

8. Simpson, T., Dervilis, N., Couturier, Ph. [et al.] Reduced order modeling of non-linear monopile dynamics via an AE-LSTM scheme. *Frontiers in Energy Research*, 2023, Vol. 11. DOI 10.3389/fenrg.2023.1128201.

9. Kamat, P., Sugandhi, R., Kumar, S. Data-driven bearing fault detection using hybrid autoencoder-LSTM deep learning approach. *International Journal of Modeling, Identification and Control*, 2021, vol. 38, no. 1, p. 88. DOI 10.1504/ijmic.2021.122471.

10. Kamat, P., Sugandhi, R., Kumar, S. Data-driven bearing fault detection using hybrid autoencoder-LSTM deep learning approach. *International Journal of Modeling, Identification and Control*, 2021, vol. 38, no. 1, p. 88. DOI 10.1504/ijmic.2021.122471.

11. Mushtaq, E., A. Zameer, M. Umer, A. A. Abbasi A two-stage intrusion detection system with auto-encoder and LSTMs. *Applied Soft Computing*, 2022, vol. 121, p. 108768. DOI 10.1016/j.asoc.2022.108768.

12. Liu, Sh., Zhang, W., He, H., Zhang, Sh. Soft Sensor Modeling of Acrylic Acid Yield Based on Autoencoder Long Short-Term Memory Neural Network of Savitzky – Golay and ReliefF Algorithm. *Journal of Chemometrics*, 2025, vol. 39, no. 1. DOI 10.1002/cem.3640.

13. Kay Khine, W. L., Thwet Aung, N. T. Aspect Level Sentiment Analysis Using Bi-Directional LSTM Encoder with the Attention Mechanism. *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12496 LNAI, pp. 279–292. DOI 10.1007/978-3-030-63007-2\_22.

14. Jun, K., Lee, D. W., Lee, K. [et al.] Feature Extraction Using an RNN Autoencoder for Skeleton-Based Abnormal Gait Recognition. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 19196–19207. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2967845.

15. Lee, J. H., Okwuosa, Ch. N., Hur, Ja. W. Extruder Machine Gear Fault Detection Using Autoencoder LSTM via Sensor Fusion Approach. *Inventions*, 2023, vol. 8, no. 6, p. 140. DOI 10.3390/inventions8060140.

16. Deka, A., Das, P. J., Saikia, M. J. Advanced Supply Chain Management Using Adaptive Serial Cascaded Autoencoder with LSTM and Multi-Layered Perceptron Framework. *Logistics*, 2024, vol. 8, no. 4, p. 102. DOI 10.3390/logistics8040102.

17. Xin, J., Zhou, Ch., Jiang, Ya. [et al.] A signal recovery method for bridge monitoring system using TVFEMD and encoder-decoder aided LSTM. *Measurement*, 2023, vol. 214, p. 112797. DOI 10.1016/j.measurement.2023.112797.

Статья поступила в редакцию 02.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 03.02.2026.

The article was submitted 02.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 03.02.2026.

УДК 519.248

**ОЦЕНКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КВАДРОКОПТЕРА  
С ОТКАЗАМИ АДАПТИВНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ**

**Винокурский Дмитрий Леонидович**, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,  
кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-5225-8076, e-mail: dlvinokursky@gmail.com

**Кононова Наталья Владимировна**, филиал РТУ МИРЭА в г. Ставрополе, 355001, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 8а,  
кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-8988-06942, e-mail: knv\_fm@mail.ru

**Краюткина Елена Васильевна**, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,  
кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-3211-5078, e-mail: elena-stv@yandex.ru

**Шляхова Наталья Ивановна**, филиал РТУ МИРЭА в г. Ставрополе, 355001, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 8а,  
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0009-0004-3025-2476, e-mail: ganagina@mail.ru

В настоящей работе представлен адаптивный наблюдатель с оценкой внешних возмущений для линеаризованной модели квадрокоптера. Модель учитывает два типа отказов: потерю тяги и аэродинамический момент. Наблюдатель синтезирован на основе алгебраического уравнения Риккати и адаптивного закона оценки возмущений. Проведен анализ управляемости и наблюдаемости системы, подтвержденная устойчивость наблюдателя. Результаты численного моделирования показывают хорошую точность восстановления состояний и возмущений даже при отсутствии прямых измерений. Предложенный подход обеспечивает отказоустойчивое поведение системы без изменения структуры управления, что делает его применимым для реальных беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** квадрокоптер, адаптивный наблюдатель, функция отказов, управляемость и наблюдаемость системы

**ASSESSMENT OF KINEMATIC PARAMETERS OF A QUADROTOR  
WITH FAILURES BY AN ADAPTIVE OBSERVER**

**Vinokursky Dmitry L.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-5225-8076, e-mail: dlvinokursky@gmail.com

**Kononova Nataliya V.**, branch of RTU MIREA in Stavropol, 8a Kulakova Ave., Stavropol, 355001, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-8988-06943, e-mail: knv\_fm@mail.ru

**Krakhotkina Elena V.**, North Caucasus Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-3211-5078, e-mail: elena-stv@yandex.ru

**Shlyakhova Natalya I.**, branch of the RTU MIREA in Stavropol, 8a Kulakova Ave., Stavropol, 355001, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0009-0004-3025-2476, e-mail: ganagina@mail.ru

This paper presents an adaptive observer with an estimate of external disturbances for a linearized quadcopter model. The model takes into account two types of failures: loss of thrust and aerodynamic torque. The observer is synthesized on the basis of the algebraic Riccati equation and the adaptive perturbation estimation law. The controllability and observability of the system are analyzed, and the stability of the observer is confirmed. The results of numerical simulation show good accuracy in reconstructing states and perturbations even in the absence of direct measurements. The proposed approach ensures fault-tolerant behavior of the system without changing the control structure, which makes it applicable to real unmanned aerial vehicles.

**Keywords:** quadrotor, adaptive observer, failure function, controllability and observability of the system

## ВВЕДЕНИЕ

Современные летательные аппараты, включая квадрокоптеры, все чаще применяются в критически важных задачах – доставке медицинских препаратов, спасательных операциях, инспекции инфраструктуры и военных миссиях. В таких условиях надежность системы управления становится не просто желательной, а необходимой. Одной из ключевых угроз является внешнее возмущение или частичный отказ исполнительных механизмов, например, снижение тяги одного из двигателей, заклинивание рулевого механизма или воздействие ветровых порывов [10].

Разработка адаптивного наблюдателя с оценкой внешних возмущений для линеаризованной модели квадрокоптера является сложной задачей, требующей понимания как математической модели квадрокоптера, так и теории адаптивного управления и оценивания состояния.

Для построения адаптивного наблюдателя с оценкой внешних возмущений для линеаризованной модели квадрокоптера можно использовать несколько подходов: расширенный наблюдатель состояний (Extended State Observer, ESO), расширенный фильтр Калмана (Extended Kalman Filter, EKF), наблюдатель с использованием скользящего режима (Sliding Mode Observer, SMO), адаптивные наблюдатели на основе теории Ляпунова. Для эффективности адаптивного наблюдателя важно тщательно проработать линеаризованную модель, выбрать подходящий метод оценивания и грамотно настроить его параметры для достижения стабильной и точной работы.

Отказоустойчивое управление (Fault-Tolerant Control, FTC) – это подход, обеспечивающий сохранение приемлемой производительности системы при наличии нештатных ситуаций [2–5]. В отличие от традиционных методов, основанных на детектировании отказов через пороговые схемы, адаптивные наблюдатели позволяют онлайн оценивать величину и характер возмущения, не требуя априорной модели отказа [8]. В настоящей работе реализован адаптивный наблюдатель, способный оценивать два типа внешних возмущений – вертикальную подъемную силу и аэродинамический момент – на основе измерений высоты и угла тангажа. Создание адаптивного наблюдателя для оценки внешних возмущений, таких как вертикальная подъемная сила и аэродинамический момент, является распространенной задачей в области теории управления, особенно в авиационной технике. Целью наблюдателя является умение компенсировать неопределенности, вызванные внешними факторами (например, порывами ветра), на основе доступных измерений высоты и угла тангажа.

Реализация адаптивного наблюдателя может включать следующие шаги:

1. Моделирование: создается модель динамики объекта (самолета), включая основные аэродинамические силы и моменты, а также расширенную модель с возмущениями.
2. Выбор алгоритма: происходит отбор подходящего адаптивного алгоритма (например, с использованием теоремы устойчивости Ляпунова для гарантии сходимости).
3. Синтез наблюдателя, разработка уравнения наблюдателя состояний и адаптивного механизма.
4. Численное моделирование: используется программное обеспечение (например, MATLAB/Simulink), реализуется модель объекта и наблюдателя для тестирования и отладки.
5. Настройка параметров: необходимо настроить коэффициенты усиления наблюдателя.

Проверять работу наблюдателя необходимо на различных сценариях, таких как резкие порывы ветра или плавные изменения в атмосферных условиях.

Особенностями этого метода является:

- наблюдаемость, наблюдатель может успешно оценить возмущения, система должна быть наблюдаемой относительно этих возмущений. Это означает, что возмущения должны влиять на измеряемые выходы (высоту и угол тангажа);
- разделение, в случае если возмущения меняются слишком быстро или их эффекты неотличимы от управляющих воздействий, может быть сложно отделить их друг от друга;
- нелинейность, при которой динамика самолета является нелинейной и требуется использование нелинейных наблюдателей (например, наблюдателя с расширенным фильтром Калмана);
- сходимость, где гарантия асимптотической сходимости к истинным значениям возмущений может быть достигнута только при выполнении определенных условий, таких как персистентное возбуждение.

Таким образом, реализация адаптивного наблюдателя для оценки возмущений – это сложный, но решаемый процесс, требующий глубокого понимания динамики объекта и теории адаптивного управления.

Данный подход позволяет системе автоматически компенсировать эффекты отказов без изменения структуры управляющего закона, что делает его особенно привлекательным для задач отказоустойчивого управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

### ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ КВАДРОКОПТЕРА

Для анализа и синтеза наблюдателя используется линеаризованная модель квадрокоптера вблизи точки зависания. Модель описывает динамику по двум координатам: вертикальной высоте  $z$  и углу тангажа  $\theta$ . Уравнения движения для такой линейной модели имеют вид:

$$\ddot{z} = -g\theta + \frac{k_T}{m}u_1 + f_1(t), \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{k_M}{I_{yy}}u_2 + f_2(t), \quad (2)$$

где  $m$  – масса квадрокоптера;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$k_T$  – коэффициент тяги;

$k_M$  – коэффициент момента;

$I_{yy}$  – момент инерции относительно оси  $oy$ ;

$u_1, u_2$  – управляющие воздействия;

$f_1(t), f_2(t)$  – функции, моделирующие отказы.

Матричная форма модели записывается как:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ff(t), \quad (3)$$

где  $x = [z \dot{z} \theta \dot{\theta}]^T$  – вектор состояния;

$u = [u_1 \ u_2]^T$  – вектор управления;

$f(t) = [f_1(t) \ f_2(t)]^T$  – вектор отказов.

Матрицы управления данной модели имеют вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ k_T/m & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & k_M/I_{yy} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Измеряемые выходы в системе – высота и угол тангажа. Соответствующее уравнение для выхода имеет вид:

$$y = Cx, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Возмущения  $f_1(t), f_2(t)$  моделируются ступенчатыми функциями:

$f_1(t) = 0,8 \text{ Н}$ , при  $t \geq 5$  с имитирует потерю тяги на 80 % от номинала;

$f_2(t) = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , при  $t \geq 8$  с имитирует заедание рулевого привода.

Такая модель соответствует реальным сценариям отказов, описанным в работе [6].

### УПРАВЛЯЕМОСТЬ И НАБЛЮДАЕМОСТЬ СИСТЕМЫ

Управляемость линейной системы базируется на следующей теореме.

**Теорема 1 (Калмана).** Линейная система (3)–(5) полностью управляема тогда и только тогда, когда матрица  $G = [B \ AB \ A^2B \ A^3B \ \dots \ A^{n-1}B]$  имеет ранг  $n$ .

В нашем случае ранг матрицы  $G = [B \ AB \ A^2B \ A^3B]$  имеет ранг 4, т. е. система полностью управляема. Это означает, что существует закон управления  $u(t)$ , переводящий систему из любого начального состояния в любое конечное за конечное время [7].

Наблюдаемость линейной системы определяется по следующей теореме.

**Теорема 2.** Линейная система (3)–(5) полностью наблюдаема тогда и только тогда, когда матрица  $O = [C \ CA \ CA^2 \ CA^3 \ \dots \ CA^{n-1}]^T$  имеет ранг  $n$ .

Для данной модели квадрокоптера матрица  $O = [C \ CA \ CA^2 \ CA^3]^T$  имеет ранг 4, следовательно, система полностью наблюдаема. Это гарантирует возможность восстановления всех состояний по измерениям  $y = [z \ \theta]^T$ , даже если скорости не измеряются напрямую. Кроме того, расширенная система с введением возмущений как дополнительных состояний ( $\tilde{x} = [x^T \ f^T]^T$ ) также является наблюдаемой, поскольку для расширенных матриц:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & F \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = [C \ 0]. \quad (6)$$

Ранг матрицы  $O$  равен 6, что подтверждает теоретическую возможность оценки возмущений [9, 11].

### ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ

Пусть дана непрерывная во времени система:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff(t) \\ y = Cx(t) \end{cases}. \quad (7)$$

Для системы (7) адаптивный наблюдатель запишется в виде:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + Ff(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ r(t) = y(t) - C\hat{x}(t) \\ \dot{\hat{f}}(t) = \rho R(y(t) - \hat{y}(t)) \end{cases}, \quad (8)$$

где  $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$  – вектор оценки состояния;  
 $r(t) \in \mathbb{R}^m$  – вектор невязки (остатков);  
 $L$  – матрица усиления, которую необходимо найти;  
 $\hat{f}(t) \in \mathbb{R}^m$  – вектор оценки функции отказа,  
 $\rho > 0$  – скалярная величина, называемая коэффициент адаптации;  
 $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$  – диагональная матрица весов адаптации.

В нашем случае матрица  $R = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  единичной матрицы. Закон адаптации  $\dot{\hat{f}}(t) = \rho R(y(t) - \hat{y}(t))$  основан на методе оценки возмущений по ошибке выхода, предложенном в [1]. Этот подход позволяет оценивать медленно меняющиеся возмущения без необходимости знать их точную динамику, что особенно важно при отсутствии априорной информации об отказах.

Матрица  $L$  синтезирована с помощью алгебраического уравнения Риккати:

$$A^T P + P A - P C^T R^{-1} C P + Q = 0, \quad (9)$$

где  $Q = 10I_4$ ;

$R = I_2$  – весовые матрицы состояния и выхода.

Определим положительную и симметричную матрицу  $P = P^T > 0$  из уравнения Риккати (9). После решения алгебраического уравнения Риккати вычисляется искомая матрица усиления  $L$ :

$$L = P C^T, \quad (10)$$

Моделирование проведено в интервале  $t \in [0, 15]$  с шагом 0,01 с. Использовано численное интегрирование `scipy.integrate.odeint` с высокой точностью. Параметры модели приведены ниже:

$m = 1$  кг – масса квадрокоптера;

$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;

$k_T = 1$  – коэффициент тяги;

$k_M = 1$  – коэффициент момента;

$I_{yy} = 0,02$  кг · м<sup>2</sup> – момент инерции относительно оси  $oy$ .

$f_1(t) = 0,8$  Н при  $t \geq 5$  с имитирует потерю тяги на 80 % от номинала;

$f_2(t) = 0,4$  Н · м при  $t \geq 8$  с имитирует заедание рулевого привода.

#### АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате моделирования получено следующее значение матрицы усиления:

$$L = \begin{pmatrix} 5.4361 & -0.9584 \\ 10.235 & -8.593 \\ -0.9584 & 3.9194 \\ -0.3734 & 3.1402 \end{pmatrix}.$$

На рисунках 1 и 2 показаны оценки  $\hat{f}_1(t)$  и  $\hat{f}_2(t)$ . При внедрении возмущения  $f_1(t) = 0,8$  Н в момент  $t = 5$  с, оценка  $\hat{f}_1(t)$  достигает установившегося значения менее чем за 1,5 с. Аналогично при  $f_2(t) = 0,4$  Н · м в  $t = 8$  с оценка  $\hat{f}_2(t)$  сходится за 2,2 с. Среднеквадратичная ошибка ( $MSE$ ) после установления:  $MSE(f_1(t)) = 0,012$ ,  $MSE(f_2(t)) = 0,9$ . Это указывает на высокую точность оценки даже при отсутствии прямых измерений возмущений.

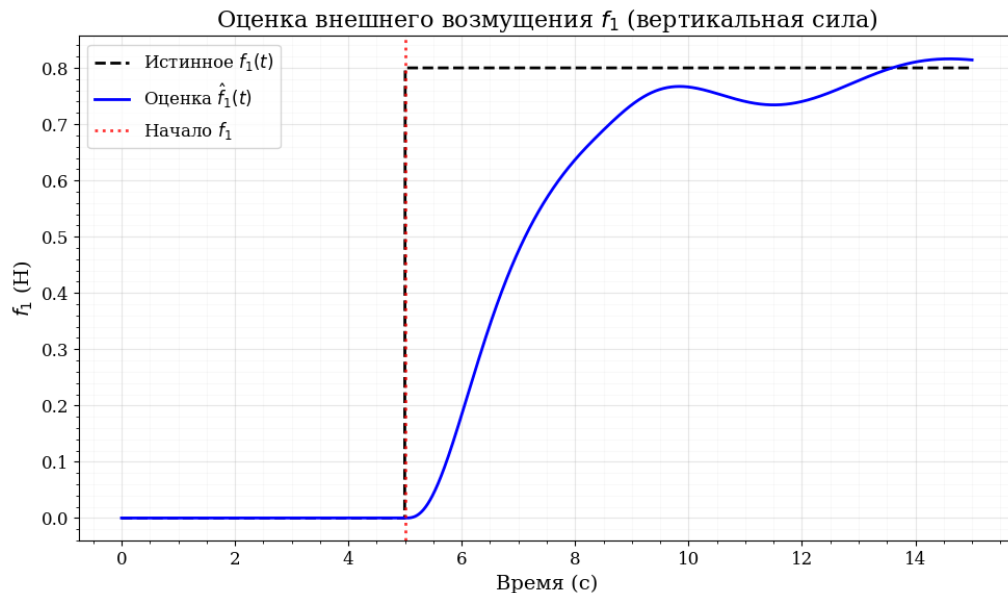


Рисунок 1 – Функция отказа  $f_1(t)$  и ее оценка адаптивным наблюдателем, отказ возникает на 5 с

Наблюдатель устойчив. Собственные значения ( $A-LC$ ) все имеют отрицательные вещественные части, что гарантирует экспоненциальную устойчивость наблюдателя.

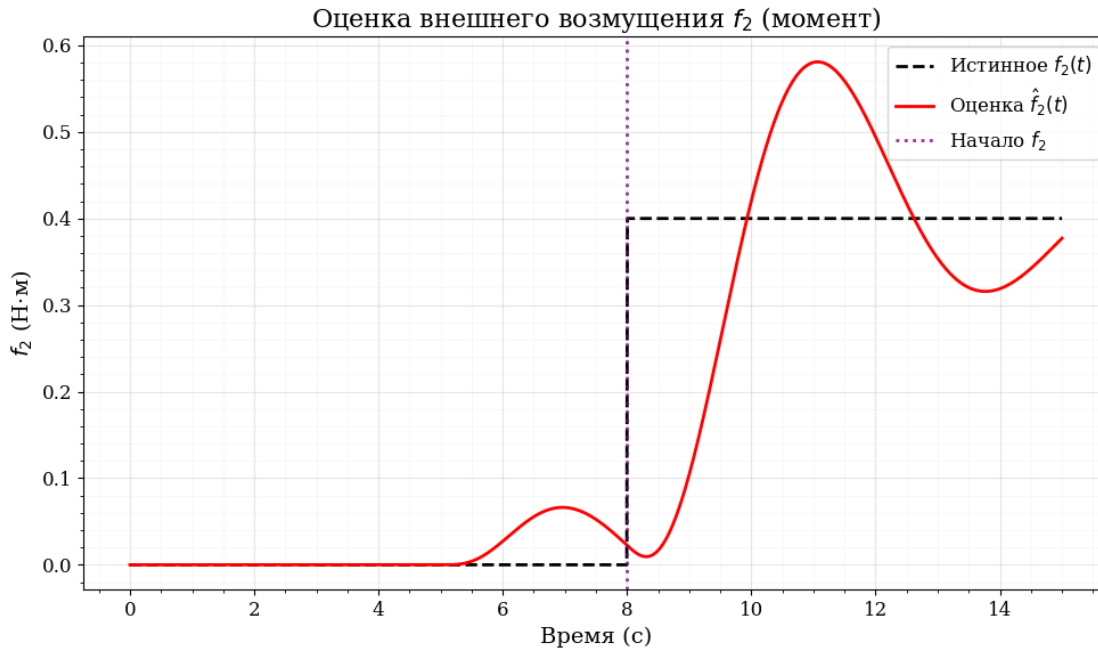


Рисунок 2 – Функция отказа  $f_2(t)$  и ее оценка адаптивным наблюдателем, отказ момента вращения возникает на 8 с

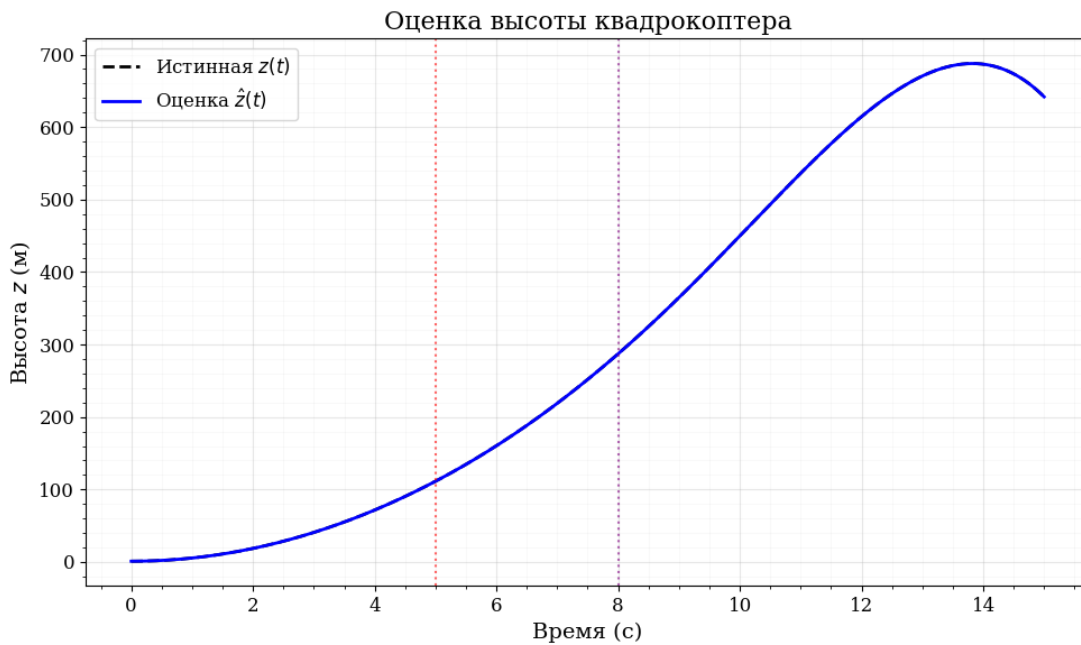


Рисунок 3 – Оценка высоты квадрокоптера адаптивным наблюдателем

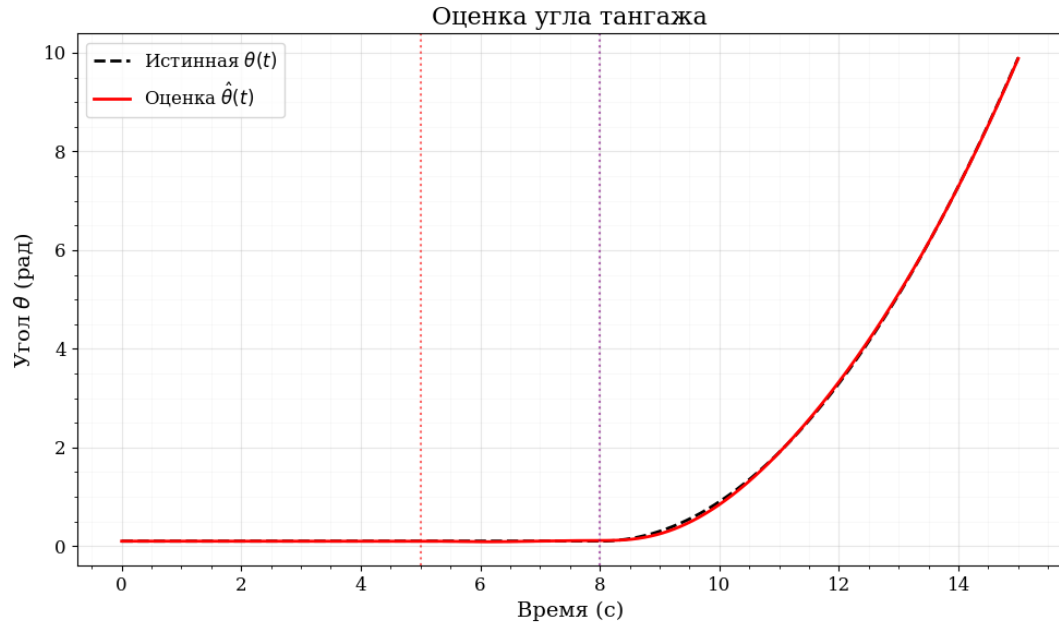


Рисунок 4 – Оценка угла тангажа адаптивным наблюдателем

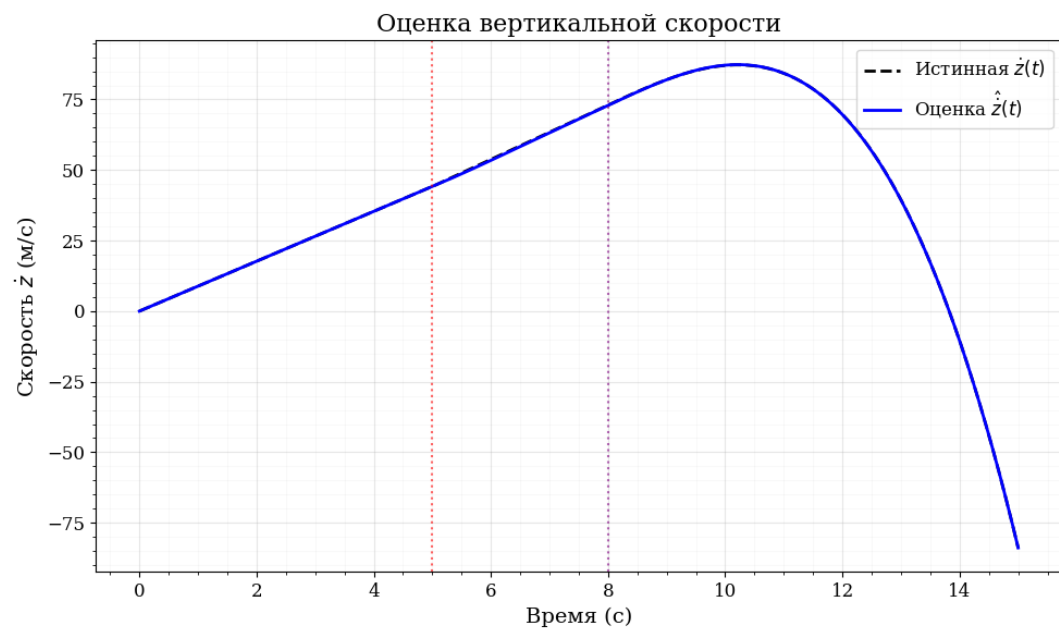


Рисунок 5 – Оценка вертикальной скорости адаптивным наблюдателем

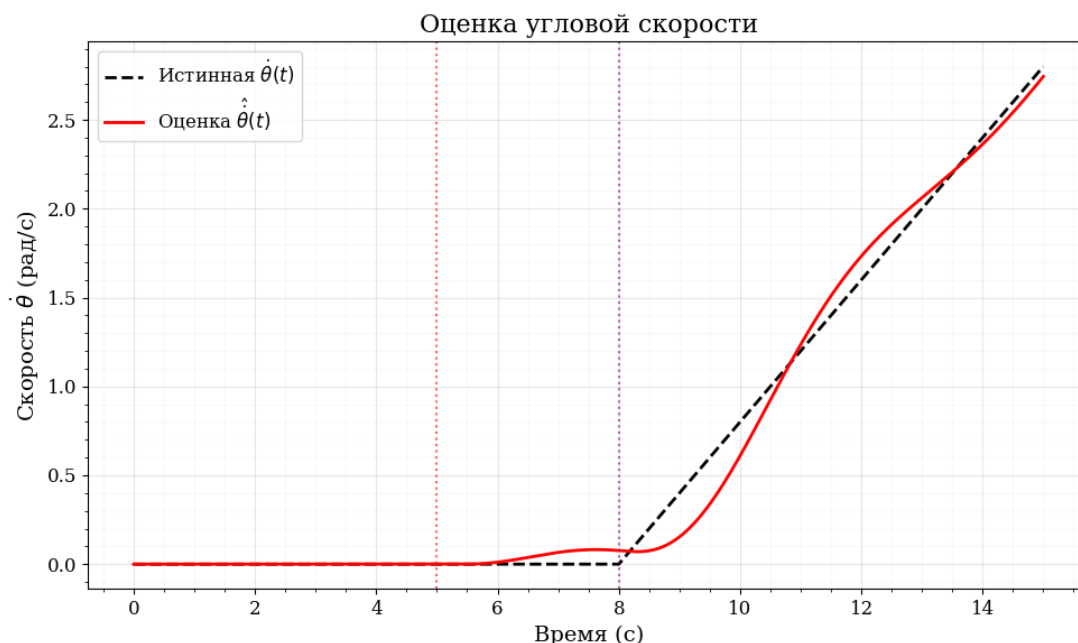


Рисунок 6 – Оценка угловой скорости адаптивным наблюдателем

Оценки высоты  $\hat{z}$ , угла  $\hat{\theta}$ , вертикальной скорости  $\hat{\dot{z}}$  и угловой скорости  $\hat{\dot{\theta}}$  практически совпадают с истинными значениями после переходного процесса (рис. 3–6). Ошибки оценки не превышают 5 % от диапазона значений. Особенно важно, что оценки скоростей, хотя и не измеряются напрямую, восстанавливаются с хорошей точностью благодаря структуре наблюдателя и правильному выбору матрицы усиления наблюдателя  $L$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализованный в данной работе адаптивный наблюдатель с оценкой внешних возмущений демонстрирует высокую эффективность в условиях имитированных отказов квадрокоптера. Он обеспечивает точную реконструкцию состояний и возмущений на основе минимального набора измерений, что делает его хорошим решением для отказоустойчивого управления в условиях неопределенности. Программа полностью реализует теоретические принципы наблюдения, управляемости и адаптации, подтвержденные численными экспериментами. Результаты могут быть использованы как основа для разработки реальных систем управления БПЛА, работающих в сложных и непредсказуемых средах.

#### Список источников

1. Chen, J. Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems / J. Chen, R. J. Patton. – Springer, 1999. – 548 p.
2. Ding, S. X. Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools / S. X. Ding. – 2nd ed. – Springer, 2013. – 562 p.
3. Fridman, E. Introduction to Time-Delay Systems: Analysis and Control / E. Fridman. – Birkhäuser, 2014. – 354 p.
4. Gauthier, J. P. A simple observer for nonlinear systems – Applications to bioreactors / J. P. Gauthier, H. Hammouri, S. Othman // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1994. – № 6 (37). – P. 875–880.
5. Khalil, H. K. Nonlinear Systems / H. K. Khalil. – 3rd ed. – Pearson Education, 2002. – 456 p.
6. Kim, J. Adaptive Fault Estimation for Quadrotor UAVs Using Extended State Observer / J. Kim et al. // IEEE Access. – 2017. – № 5. – P. 21866–21874.
7. Ogata, K. Modern Control Engineering / K. Ogata. – 5th ed. – Pearson Education, 2010. – 654 p.
8. Wang, H. On the use of adaptive observers for fault detection and isolation in nonlinear systems / H. Wang, S. Daley // International Journal of Control. – 1996. – № 3 (64). – С. 475–495.
9. Zemouche, A. On the LMI approach to observer design for Lipschitz nonlinear systems / A. Zemouche, M. Boutayeb, G. I. Bara // Automatica. – 2008. – № 11 (44). – С. 2817–2824.
10. Zhang, Y. Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems / Y. Zhang, J. Jiang // Annual Reviews in Control. – 2008. – № 2 (32). – С. 229–252.
11. Zhen, Y. Observer-Based Fault Estimation for Uncertain Linear Systems with Unknown Inputs / Y. Zhen et al. // Automatica. – 2020. – Vol. 112. – P. 108684.

## References

1. Chen, J., Patton, R. J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer, 1999. 548 p.
2. Ding, S. X. *Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools*. 2nd ed. Springer, 2013. 562 p.
3. Fridman, E. *Introduction to Time-Delay Systems: Analysis and Control*. Birkhäuser, 2014. 354 p.
4. Gauthier, J. P., Hammouri, H., Othman, S. A simple observer for nonlinear systems – Applications to bioreactors. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, no. 6 (37), pp. 875–880.
5. Khalil, H. K. *Nonlinear Systems*. Pearson Education, 2002. 456 p.
6. Kim, J. et al. Adaptive Fault Estimation for Quadrotor UAVs Using Extended State Observer. *IEEE Access*. 2017, no. 5, pp. 21866–21874.
7. Ogata, K. *Modern Control Engineering*. Pearson Education, 2010. 654 p.
8. Wang, H., Daley, S. On the use of adaptive observers for fault detection and isolation in nonlinear systems. *International Journal of Control*, 1996, no. 3 (64), pp. 475–495.
9. Zemouche, A., Boutayeb, M., Bara, G. I. On the LMI approach to observer design for Lipschitz nonlinear systems. *Automatica*, 2008, no. 11 (44), pp. 2817–2824.
10. Zhang, Y., Jiang, J. Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems. *Annual Reviews in Control*, 2008, no. 2 (32), pp. 229–252.
11. Zhen, Y. et al. Observer-Based Fault Estimation for Uncertain Linear Systems with Unknown Inputs. *Automatica*, 2020, vol. 112, p. 108684.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 05.02.2026.

The article was submitted 12.01.2026; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 05.02.2026.

УДК 004.001

## АНАЛИЗ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ВЫПУКЛЫХ ОБОЛОЧЕК

**Чернавин Павел Федорович**, Уральский федеральный университет, 620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,

кандидат экономических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-3214-3906, e-mail: chernavin.p.f@gmail.com

В статье предложен новый геометрический подход к решению задач классификации, основанный на анализе выпуклых оболочек классов данных. Вводится новое понятие выпукло отделимых множеств, обеспечивающее альтернативную формализацию условий разделимости классов в пространствах высокой размерности. В отличие от классических методов классификации, опирающихся на оптимизацию отдельных разделяющих гиперплоскостей или вероятностных целевых функций, предложенный подход фокусируется на анализе взаимного расположения выпуклых оболочек, что позволяет получать интерпретируемые решающие правила с ясной геометрической интерпретацией. Рассматриваемый аппарат естественным образом обобщается на задачи бинарной и многоклассовой классификации и устанавливает прямую связь между задачами классификации и методами математического программирования. В работе анализируются теоретические свойства выпуклой отделимости, включая условия линейной разделимости и роль экстремальных точек. Особое внимание уделяется задачам высокой размерности, в которых число экстремальных точек может быстро возрастать с увеличением объема данных, что может свидетельствовать либо о концентрации данных вблизи выпуклых гиперповерхностей, либо о наличии слабо информативных признаков. Обозначены ключевые направления дальнейших исследований, включая методы отбора признаков с учетом выпуклой отделимости и обобщения, основанные на теории альтернативных систем. Предложенный подход формирует перспективную основу для разработки интерпретируемых и теоретически обоснованных алгоритмов классификации.

**Ключевые слова:** машинное обучение, задачи классификации, интерпретируемое решение, выпуклая оболочка множества, математическое программирование

## CONVEX HULL-BASED DATA ANALYSIS

**Chernavin Pavel F.**, Ural Federal University, 19 Mira St., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-3214-3906, e-mail: chernavin.p.f@gmail.com

This paper proposes a novel geometric framework for solving classification problems based on the analysis of convex hulls of data classes. A new concept of *convexly separable sets* is introduced, providing an alternative formalization of class separability in high-dimensional feature spaces. Unlike classical classification methods that rely on optimizing individual separating hyperplanes or probabilistic objective functions, the proposed approach focuses on the mutual arrangement of convex hulls, yielding interpretable decision rules with a clear geometric meaning. The framework naturally extends to binary and multiclass classification problems and establishes a direct connection between classification and mathematical programming. Theoretical properties of convex separability are analyzed, including conditions of linear separability and the role of extreme points. Particular attention is paid to high-dimensional settings, where the number of extreme points may grow rapidly with the data size, indicating either concentration of data near convex hypersurfaces or the presence of weakly informative features. The paper outlines key directions for further research, including feature selection methods tailored to convex separability and generalizations based on alternative systems theory. The proposed approach offers a promising foundation for the development of interpretable and theoretically grounded classification algorithms.

**Keywords:** machine learning, classification problems, convex hull of a set, interpretable decision, mathematical programming

## ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие методов машинного обучения в последние годы, в особенности глубоких нейронных сетей и генеративных моделей, привело к существенному росту качества решений в широком круге прикладных задач. Однако вместе с этим обострилась проблема интерпретируемости и надежности решающих правил, особенно в областях, где автоматизированные решения оказывают прямое влияние на человека, финансовые потоки или безопасность систем. К таким областям относятся банковский скоринг, кредитование, страхование, медицинская диагностика, промышленная безопасность и другие регуляторно значимые сферы, в которых предъявляются повышенные требования к прозрачности, воспроизводимости и обоснованности принимаемых решений.

Большинство широко используемых методов классификации – логистическая регрессия, метод опорных векторов, ансамблевые и нейросетевые модели – ориентированы прежде всего на достижение высокой точности прогнозирования. При этом интерпретация получаемых решающих правил

либо затруднена, либо носит апостериорный характер и требует применения дополнительных процедур объяснения. Крупные специалисты в области ИИ в России и за рубежом [1–6] отмечают, что именно эта причина ограничивает применение сложно интерпретируемых методов в задачах с высокими регуляторными рисками и усложняет контроль качества решений, их валидацию и аудит. Дополнительной проблемой является неоднозначность решающих правил. Даже в случае линейно разделимых классов существует бесконечное множество линейных разделителей, обеспечивающих корректную классификацию обучающей выборки. Для выбора конкретного решения вводятся дополнительные допущения – максимизация зазора, регуляризация, вероятностные интерпретации, – которые не всегда имеют прямой содержательный смысл и могут существенно влиять на итоговое поведение модели. В результате решающее правило оказывается чувствительным к выбору гиперпараметров, составу обучающей выборки и процедурам предобработки данных.

В связи с этим в последние годы наблюдается возрастающий интерес к методам интерпретируемого машинного обучения, в которых структура модели и логика принятия решений изначально понятны специалисту предметной области. В рамках данного направления особый интерес представляют геометрические методы анализа данных, позволяющие описывать классы и решающие правила в терминах пространственных соотношений, без привлечения сложных нелинейных преобразований.

В данной статье предлагается подход к анализу данных и решению задач классификации, основанный на использовании выпуклых оболочек обучающих множеств. В отличие от классических методов, предлагаемый подход позволяет:

- 1) получать однозначные решающие правила, поскольку выпуклая оболочка множества определяется единственным образом;
- 2) обеспечивать высокую интерпретируемость, выражая решения через геометрические свойства данных и принадлежность точек выпуклым оболочкам классов;
- 3) хранить обучающие выборки в компактной форме за счет использования только экстремальных точек;
- 4) анализировать внутреннюю структуру данных, выявлять выбросы и характерные подмножества наблюдений.

Особое внимание уделяется использованию методов математического программирования для построения выпуклых оболочек в пространствах большой размерности, что позволяет преодолеть ограничения классических алгоритмов вычислительной геометрии. Показано, что данный подход применим к задачам одноклассовой, двухклассовой и многоклассовой классификации и обладает рядом преимуществ при работе с реальными данными из регуляторных и высокорисковых областей.

Таким образом, предлагаемый метод может рассматриваться как альтернатива традиционному «черным ящикам» машинного обучения в задачах, где интерпретируемость, однозначность решения и возможность формального анализа структуры данных являются не менее важными, чем достижение высокой точности классификации.

### **ВЫПУКЛЫЕ ОБОЛОЧКИ И МЕТОДЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ**

Так как любое наблюдение может быть представлено как точка в  $n$ -мерном пространстве, то в дальнейшем слова «наблюдение» и «точка» мы будем использовать как слова-синонимы. Наиболее широкое применение выпуклых оболочек (ВО) нашли в вычислительной геометрии [7]. Достаточно эффективно ВО используются в физической химии [8], металлографии [9] и в многих других приложениях [10]. Имеется ряд упоминаний об использовании ВО в машинном обучении (МО) [11–15, 17].

Существуют различные алгоритмы для построения ВО, наиболее известные из которых: Джарвиса, Грэма, Эндрю, Каллея, Киркпатрика – Зейделя, Чана, Quickhull. К сожалению, большинство перечисленных алгоритмов работают только в пространстве 2D или 3D и поэтому мало интересны для большинства задач машинного обучения. По сути, только Quickhull способен работать в пространствах большей размерности, и для его использования есть программа в библиотеке Scipy. Однако и этот алгоритм при большом количестве точек в пространстве большой размерности имеет существенные проблемы как с быстродействием, так и с использованием оперативной памяти. Скорее всего, именно по этой причине ВО и не нашли широкого применения в МО.

Однако для построения ВО может быть использован другой подход, основанный на математическом программировании (МП). В большинстве случаев ВО представляет из себя некоторый выпуклый гипермногогранник. Далее все угловые точки ВО будем называть экстремальными, а все остальные – внутренними. Суть подхода, основанного на МП, достаточно простая: любая внутренняя точка может быть представлена как выпуклая линейная комбинация экстремальных точек, ни одна экстремальная точка не может быть представлена как выпуклая линейная комбинация других экстремальных точек. Рассмотрим начнем с того, как определить, что одна конкретная точка является экстремальной или внутренней. Введем следующую систему обозначений:

$$j - \text{индекс точки}, \quad j = 1, 2 \dots m;$$

$i$  – индекс координат точки,  $i = 1, 2 \dots n$

$P_{ij}$  –  $i$  – тая координата  $j$  – ой точки;

$T_i$  –  $i$  – тая координата точки  $T$  проверяемой на экстремальность;

$x_j$  – коэффициенты линейной комбинации точек.

Точка  $T$  является внутренней относительно других точек, если следующая система совместна, и экстремальной, если несовместна:

$$\sum_{j=1}^m P_{ij} * x_j = T_i, \quad i = 1, 2 \dots n \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_j = 1, \quad (2)$$

$$x_j \geq 0. \quad j = 1, 2 \dots m \quad (3)$$

Конечно, современные пакеты для решения задач МП (IBM ILOG CPLEX, MIP и др.) позволяют решать данную задачу и в таком виде. Однако на практике лучше решать задачу в виде, предложенном Панасосом Пардалосом [15], или на основе альтернативных систем, как это делает автор этой статьи [9]. В результате обоих подходов возникают прямые и двойственные задачи МП, позволяющие решать задачи большой размерности как по наблюдениям, так и по признакам. Более того, оба подхода позволяют декомпозировать задачу и распараллелить процесс расчетов. Поэтому можно считать, что проблема построения ВО для большого количества наблюдений в  $n$ -мерном пространстве решена. Поэтому переходим к рассмотрению вопросов, как ВО могут быть использованы в МО.

#### **ХРАНЕНИЕ ДАННЫХ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ В КОМПАКТНОЙ ФОРМЕ**

Обычно в результате решения задачи МО запоминается только решающее правило (РП), на основе которого принимается решение по вновь появившимся наблюдениям. Такая практика вполне объяснима, так как обучающая выборка может быть достаточно большой, поэтому хранить ее и использовать в дальнейшем может быть затратно. Однако такая практика может привести к неверным прогнозам. Любой читатель этой статьи может проделать простой эксперимент, например на классической задаче Ирисы Фишера. Допустим в распоряжении исследователя на начальном этапе были только ирисы *Virginica* и *Versicolor*. Неважно каким методом будет получено решающее правило по классификации на основе этих данных, но если в дальнейшем на его вход будут поданы данные по ирисам *Setosa*, то все они будут классифицированы как *Versicolor*. Причина понятна, множество *Setosa* линейно разделимо с множествами *Virginica* и *Versicolor*. То есть, прежде чем применять РП к любому новому набору данных, необходимо как минимум убедиться, что он линейно неотделим от обучающего множества, на котором было построено РП. Поэтому если обучающее множество достаточно большое, то его необходимо хранить в компактной форме, которая сохраняет его основные свойства. И для этого хорошо подходит ВО обучающего множества. Автору данной статьи достаточно часто доводилось строить скоринговые правила для различных банковских продуктов, и он на практике имел возможность убедиться, что использование этого приема позволяет значительно снизить риски ошибок при применении одного и того же РП для различных регионов. Обсуждению этих вопросов были посвящены отдельные выступления на конференции «Управление рисками в банковском секторе», Москва 12–13.03.2024 [16].

#### **РЕШЕНИЕ ОДНОКЛАССОВЫХ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ**

Еще совсем недавно данный термин вызывал недоумение даже у профессионалов, но в последнее время резко возрос интерес к такого рода задачам. Задачи одноклассовой классификации (ЗОК) относятся к типу задач обучения без учителя. ЗОК возникают в случаях, когда по различным причинам к обучению может быть предъявлен только один класс объектов. Такого рода задачи возникают, когда предъявление других классов содержательно не имеет смысла или слишком трудоемко и дорогостояще. Обычно ЗОК связаны с распознаванием индивидуальных признаков (почерка, лица, манеры речи и т. п.) или определением аномалий, таких как: обнаружение подозрительных банковских операций, вторжений, нестандартных игроков на бирже, неполадок в механизмах по показаниям датчиков.

Наиболее часто ЗОК решаются методом ближайшего соседа, но возможен и другой подход. РП в этом случае может быть следующим:

1. Некоторым образом оконтуриваем обучающее множество.
2. Если тестовая точка внутри контура, относим ее к данному множеству, если нет, то:
3. Определяем степень близости к контуру:
  - 3.1. Если точка расположена к контуру ближе порогового значения, относим ее к данному классу.
  - 3.2. Если точка расположена к контуру дальше порогового значения, не относим ее к данному классу.

Естественным образом возникает вопрос, а какой гиперповерхностью лучше оконтурить множество. Оконтуривание гиперпараллелепипедом может дать излишне грубое решение. Конечно, можно попробовать оконтурить гиперболой. Такого рода задачи сводятся к задачам квадратичного программирования и сложно решаются при большой размерности. Поэтому наиболее просто обучающее множество оконтурить выпуклой оболочкой, т. е. определить экстремальные точки и дальше работать только с ними. В дальнейшем если будет желание оконтурить гиперболой, то это можно будет делать на основе только экстремальных точек, что значительно снизит размерность задачи выпуклого программирования.

Расстояние от тестируемой точки до ВО можно вычислить на основе простой модели:

$$C = \min \sum_{i \in I} (T_i - v_i)^2, \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = 1, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} E_{ij} * x_j = v_i, \quad i \in I \quad (6)$$

$$x_j \geq 0, \quad (7)$$

где  $I$  – множество параметров (размерность пространства);

$J$  – множество экстремальных точек;

$i, j$  – индексы соответствующих множеств;

$E_{ji}$  –  $i$  – тая координата  $j$  – той экстремальной точки;

$T_i$  – координаты тестовой точки;

$v_i$  –  $i$  – тая координата точки ВО, ближайшей к тестовой точке;

$x_j$  – коэффициенты линейной комбинации.

Очевидно, что если тестируемая точка лежит внутри ВО, то координаты  $T_i$  и  $v_i$  совпадут и значение целевой функции будет  $C = 0$ , в противном случае будет определено минимальное расстояние до ВО.

#### АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ

Уже в рамках задач МО для одного класса может возникнуть интересная постановка задачи по изучению структуры конкретного класса. После получения самой большой ВО можно исключить из рассмотрения экстремальные точки и определить новые. Если эту процедуру повторить несколько раз, то получим некоторый набор «матрешек» и количество наблюдений в каждой из них (рис. 1).

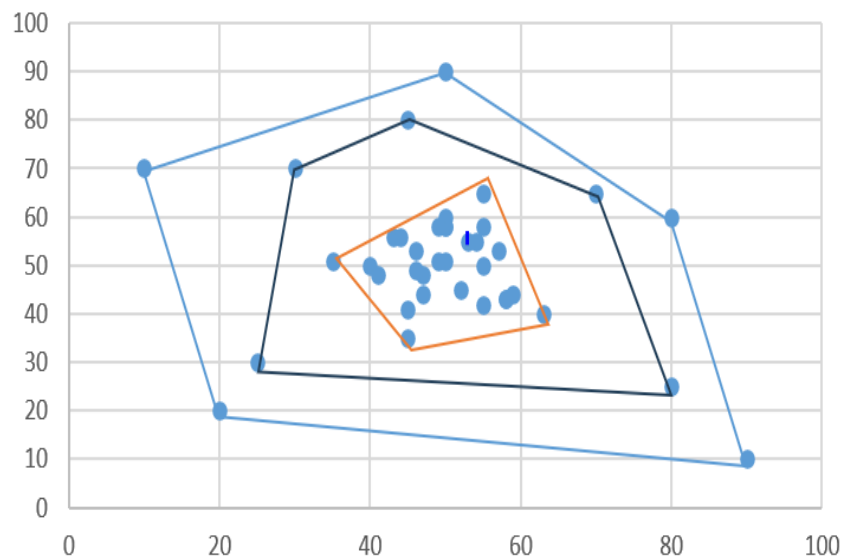


Рисунок 1 – Вложенные выпуклые оболочки

На практике данный подход использовался авторами при выдаче рекомендаций для подбора технологических параметров для получения высококачественного агломерата и параметров пользователей соцсетей для таргетированной рекламы. Естественно, что если структура вложенных ВО такая, как на рисунке 1, то рекомендовать надо параметры в пределах желтой ВО. Отметим, что расслоение исходного множества на несколько ВО может быть использовано для определения выбросов в данных.

#### РЕШЕНИЕ ДВУХКЛАССОВЫХ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ

Наибольший интерес представляет использование ВО для решения многоклассовых задач. При этом если классы линейно разделимы, то число линейных разделителей бесконечно, т. е. решение неоднозначно. Для придания однозначности привлекаются дополнительные допущения, как в методе опорных векторов или логистической регрессии.

Однако для разделения классов могут использоваться ВО. При таком подходе каждое из множеств имеет только одну ВО. То есть решение будет однозначным. Алгоритм классификации выглядит следующим образом:

1. Определяем экстремальные точки каждого ВО.
2. Проверяем точки каждого множества на принадлежность ВО другого класса:
  - 2.1. Если точки обоих классов не принадлежат ВО другого класса, то имеем случай линейной разделимости. ВО классов не пересекаются. (РП построено.)
  - 2.2. Если точки только одного из классов принадлежат ВО другого класса, то классы разделимы выпуклыми оболочками. (РП построено.)
  - 2.3. В каждом классе есть точки, принадлежащие ВО другого класса. (Переходим на шаг 3.)
3. Оставляем только точки, одновременно принадлежащие ВО двух классов. Возвращаемся на шаг 1 и повторяем последовательность действий.

Дадим дополнительные пояснения для п. 2.1 и 2.2. В случае 2.1 нет необходимости строить разделяющую гиперплоскость. Если тестируемая точка принадлежит одной из ВО, то ответ очевиден. Если не принадлежит ни одной ВО, то вычисляем по модели (4)–(7) ближайшее расстояние до каждой ВО и относим точку к ближайшему классу.

Случай 2.2. графически может выглядеть, например, как на рисунках 2 и 3.

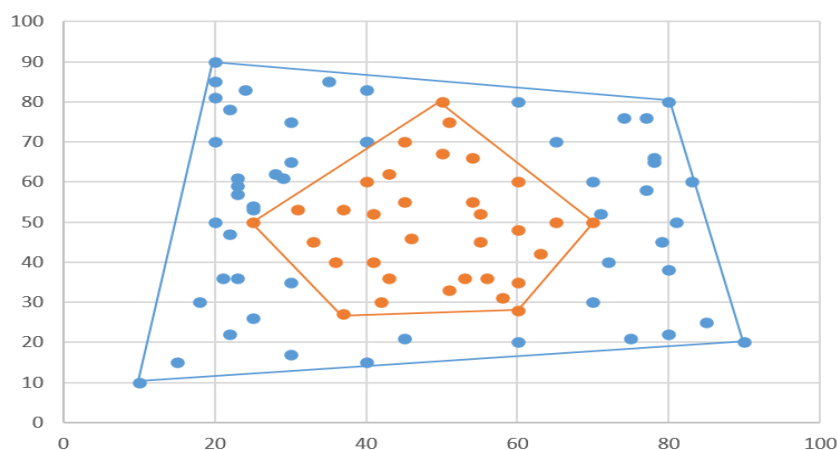


Рисунок 2 – Одна выпуклая оболочка полностью внутри другой

В данном случае все красные точки принадлежат одновременно ВО двух множеств, но ни одна синяя точка не принадлежит ВО красных. Поэтому РП предельно просто: если тестируемая точка принадлежит ВО красных, то она красная, в противном случае синяя.

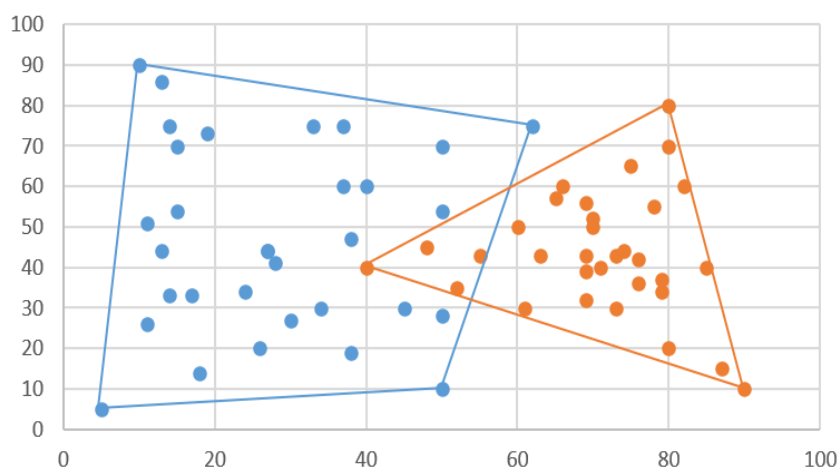


Рисунок 3 – Одна выпуклая оболочка частично внутри другой

РП в этом случае будет следующим. Если тестируемая точка принадлежит ВО красных, то она красная, если точка не принадлежит ни одной из оболочек, то ориентируемся на ближайшую оболочку, в противном случае точка синяя.

Множества, соответствующие пункту 2.2, мы называем выпукло отделимыми. Использование такого подхода существенно упрощает формулировку РП особенно при сложной структуре множества красных точек. Из классических задач можно привести опять пример Ирисов Фишера. Множество *Setosa* линейно отделимо от остальных. Множества *Virginica* и *Versicolor* линейно неразделимы, но так как ни один из объектов *Virginica* не принадлежит *BO Versicolor*, то данные множества выпукло отделимы.

Теперь рассмотрим наиболее сложную ситуацию, соответствующую пункту 2.3. Графически это может выглядеть следующим образом (рис. 4–6).

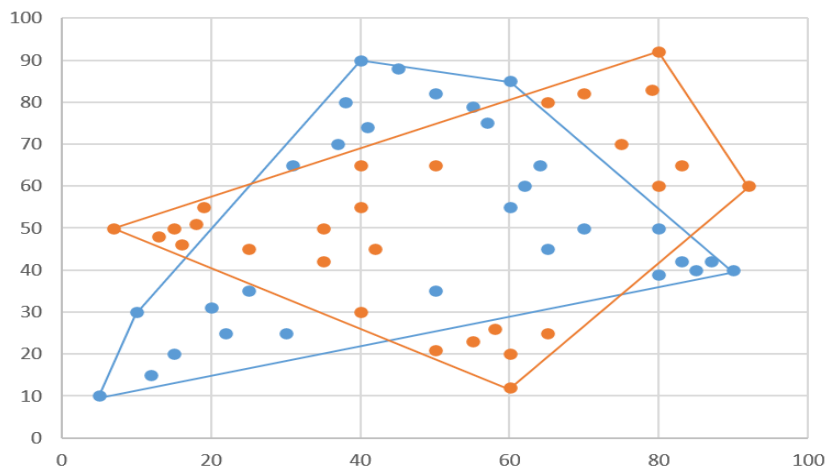


Рисунок 4 – В каждом из множеств есть точки, принадлежащие выпуклой оболочке другого множества

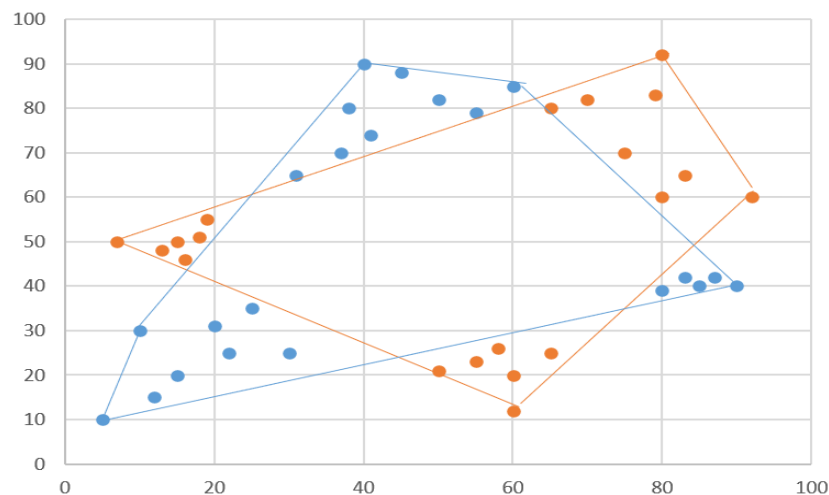


Рисунок 5 – Выпуклые оболочки без пересечения

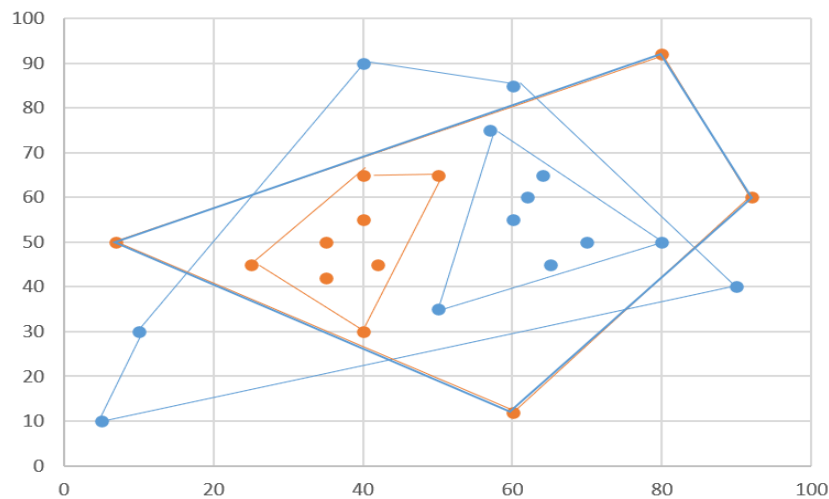


Рисунок 6 – Выпуклые оболочки в пересечении

Наибольший интерес представляет использование ВО для решения многоклассовых задач. Решение многоклассовой задачи можно свести к совокупности двухклассовых задач. В статье [17] доказано, что если нет абсолютно одинаковых точек, одновременно принадлежащих двум разным классам, то данная процедура всегда сходится за конечное число шагов. Последовательность итераций решения и результаты проиллюстрируем на решении задачи качества вина из репозитория UCI (табл. 1). Данная задача содержит 4898 наблюдений, 11 количественных признаков и 6 классов [18]. Номера классов от 3 до 9 соответствуют качеству вина. Задача решалась как серия двухклассовых задач. Решающее правило строилось отдельно для каждого класса. Этот класс будем называть расчетным классом 1 (PK1). Все остальные классы объединялись в отдельный общий класс. Этот класс будем называть расчетный класс 2 (PK2). Соответственно, выпуклым оболочкам классов на каждой итерации будем присваивать те же номера (ВО1 и ВО2). Случай, когда класс линейно отделим от остальных, будем обозначать как ЛО. Случай, когда класс отделим от остальных выпуклой оболочкой, будем обозначать как ВОМ (Выпукло Отделимое Множество). Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Описание выборки «Качество белого вина»

Класс	3	4	5	6	7	8	9
Всего точек	20	163	1457	2198	880	175	5

Таблица 2 – Результаты расчетов по выборке «Качество белого вина»

Итерация	Характеристика	3	4	5	6	7	8	9	Вывод
1	Экстремальных в PK1	20	151	825	1111	563	128	5	Классы 3 и 9 ВОМ
	Точек PK1 в ВО2	4	33	487	751	373	67	3	
	Точек PK2 в ВО1	0	79	529	688	223	42	0	
2	Экстремальных в PK1		33	457	688	361	67		Класс 4 ЛО, Класс 8 ВОМ
	Точек PK1 в ВО2		0	18	39	2	0		
	Точек PK2 в ВО1		0	43	56	26	1		
3	Экстремальных в PK1			18	39	2			Классы 5, 6, 7 ЛО
	Точек PK1 в ВО2			0	0	0			
	Точек PK2 в ВО1			0	0	0			

При решении многих задач МО требуется не только найти РП, но необходимо понять еще и структуру данных. Поэтому таблицы, аналогичные таблице 2, достаточно хорошо воспринимаются практическими специалистами. Более того, при понимании структуры множеств у практических специалистов обычно возникают новые идеи и пожелания по анализу данных. Например, описать множество описанной и вписанной сферой для определения некоторой эталонной точки. Такие задачи тоже сводятся к задачам квадратичного программирования и успешно решаются, но для этого требуется вначале построить ВО. Так как критичным параметром предлагаемого подхода может стать время решения задачи, то приведем ряд параметров различных задач.

Таблица 3 – Параметры и результаты решения задач

№	Название задачи	Число признаков	Число наблюдений	Число экстремальных	Время решения (с)	Число итераций
1	Ирисы Фишера	4	50/50/50	23/26/26	4	1
2	Фальшивые купюры	4	762/610	114/131	170	1
3	Устойчивость сетей	12	3620/6380	3183/5339	11960	1
4	Определение спама	58	2528/1679	2205/1664	5510	2
5	Диагностика гипертензии	12	1355/525	824/403	591	3
6	Диагностика гипотензии	11	1334/546	672/397	544	3
7	Диагностика синдрома хронической усталости	11	845/1035	544/581	585	3
8	Диагностика трех видов рака	10	414/75/43/100	359/75/43/99	450	4
9	Прогноз динамики котировок акций Сбербанка	15	2162/2159	1972/1989	1941	3

В данной таблице количество итераций показывает, на какой из них множества становятся ЛО или ВОМ. Время решения может быть значительно сокращено за счет использования различных эвристик и декомпозиции задачи. Задачи 1–4 взяты из репозитория UCI [19]. Задачи 5–8 решались автором на реальных данных для различных заказчиков.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен новый геометрический подход к решению задач классификации и введено понятие выпукло отделимых множеств (ВОМ), позволяющее по-новому формализовать условия разделимости классов в пространствах высокой размерности. В отличие от классических методов, ориентированных на оптимизацию отдельных разделяющих гиперплоскостей или вероятностных функционалов, предложенный подход опирается на анализ взаимного расположения выпуклых оболочек классов и тем самым обеспечивает более содержательную геометрическую интерпретацию решающих правил. Экспериментальные и теоретические результаты показывают, что в ряде практических задач данный подход позволяет получать более устойчивые и интерпретируемые классификаторы по сравнению с традиционными методами.

В то же время полученные результаты обозначают ряд принципиальных направлений для дальнейших исследований. Одной из ключевых задач является разработка методов отбора и взвешивания признаков, информативных именно с точки зрения выпуклой отделимости классов, особенно в условиях высокой размерности пространства признаков. Отдельного внимания требует ситуация, при которой при увеличении объема данных число экстремальных точек выпуклой оболочки оказывается сравнимым с числом наблюдений, что может свидетельствовать либо о расположении данных на выпуклой гиперповерхности (например, гипертелефере), либо о наличии значительного числа слабоинформативных или случайных признаков. Анализ и формализация этих эффектов представляют собой важную задачу как для теории, так и для практики анализа данных.

Следует также отметить, что в рамках теории альтернативных систем возможны различные варианты определения и характеристики экстремальных точек, что открывает дополнительные направления для обобщения и развития предложенного подхода. Исследование связей между альтернативными системами, свойствами выпуклых оболочек и условиями отделимости классов представляет самостоятельный интерес и может быть особенно привлекательным для специалистов в области выпуклого анализа, оптимизации и геометрической теории классификации.

Таким образом, предложенный аппарат выпукло отделимых множеств формирует основу для дальнейшего развития геометрически интерпретируемых методов классификации, сочетающих строгую математическую постановку, связь с задачами математического программирования и потенциал для построения новых классов интерпретируемых алгоритмов машинного обучения. Автор будет рад сотрудничеству с исследователями и практиками, заинтересованными как в теоретическом развитии данного подхода, включая вопросы альтернативных систем и экстремальности, так и в его вычислительной реализации и апробации на прикладных задачах анализа данных.

### Список источников

1. Бирюков, Д. Н. Объяснимость и интерпретируемость – важные аспекты безопасности решений, принимаемых интеллектуальными системами (обзорная статья) / Д. Н. Бирюков, А. С. Дудкин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2025. – Т. 25, № 3. – С. 373–386.
2. Воронцов, К. В. Интерпретируемость и объяснимость в машинном обучении / К. В. Воронцов. – URL: <https://www.MachineLearning.ru/wiki>.
3. Лекун, Я. Как учится машина. Революция в области нейронных сетей и глубокого обучения / Я. Лекун. – Альпина PRO, 2021. – С. 335.
4. Маркус, Г. Искусственный интеллект: перезагрузка. Как создать машинный разум, которому действительно можно доверять / Г. Маркус, Э. Дэвис. – Интеллектуальная литература, 2021. – С. 300.
5. Перл, Д. Думай «почему». Причина и следствие как ключ к мышлению / Д. Перл, Д. Маккензи. – Москва : АСТ, 2018. – С. 552.
6. Rudin C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead / C. Rudin // Nature Machine Intelligence. – 2019. – № 1. – P. 206–215.
7. Berg, M. Computation Geometry: Algorithm and Applications / M. Berg, J. Cheong, M. Kreveld, M. Overmars. Third Edition. – Springer, 2008. – P. 388.
8. Воронин, Г. Ф. Расчет фазовых равновесий и построение диаграмм методом выпуклых оболочек / Г. Ф. Воронин, А. Л. Восков // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2013. – Т. 54, № 1. – С. 3–11.
9. Магдеев, Р. Г. Применение алгоритмов построения выпуклой оболочки при анализе изображений микроструктуры металла / Р. Г. Магдеев, Л. Ш. Биктимиров // Известия самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 6 (2). – С. 496–500.
10. Раскрытие возможностей выпуклой оболочки: обновление геометрической перспективы. – URL: <https://fastercapital.com/content/Unveiling-the-Power-of-Convex-Hull--A-Geometric-Perspective-update.html> (дата обращения: 01.12.2025).
11. Чау, А. Выпуклые и вогнутые оболочки для классификации с помощью машины опорных векторов / А. Чау. – URL: [https://www.academia./5300490/Convex\\_and\\_concave\\_hulls\\_for\\_classification\\_with\\_support\\_vector\\_machine](https://www.academia./5300490/Convex_and_concave_hulls_for_classification_with_support_vector_machine), (дата обращения: 01.12.2025).

12. Налбантов, Г. Ближайшая классификация выпуклой оболочки / Г. Налбантов, Дж. Гроенен. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/46434323\\_Nearest\\_convex\\_hull\\_classification](https://www.researchgate.net/publication/46434323_Nearest_convex_hull_classification) (дата обращения: 01.12.2025).
13. Fernandes-Francos, D. One-class classification algorithm based on convex hull / D. Fernandes-Francos, O. Fontenla-Romero, A. Alonso-Betanzos // European Symposium on Artificial Neural Networks? Computational Intelligence and Machine Learning. Bruges (Belgium), 27–29 April, 2016. – Bruges (Belgium), 2016. – P. 477–482.
14. Pardalos, P. M. Linear Programming Approaches to the Convex Hull Problem in Rm / P. M. Pardalos, Y. Li, W. W. Hager // Computer Vfhematics Application. – 1995. – Vol. 29, № 7. – P. 23–29.
15. Чернавин, П. Ф. Применение теории линейных неравенств в задачах машинного обучения / П. Ф. Чернавин, Н. П. Чернавин, Ф. П. Чернавин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. –2023. – № 4 (32). – С. 21–29.
16. Управление рисками в банковском секторе. Москва, 12–13.03.2024. – URL: <https://dialogmanag.com/upravlenie-riskami-v-bankovskom-sektore-8-ya-ezhegodnaya-konferenciya-mart-2024> (дата обращения: 01.12.2025).
17. Гайнанов, Д. Н. Выпуклые оболочки и выпукло отделяемые множества в задаче многоклассового распознавания образов / Гайнанов Д. Н., Н. П. Чернавин, П. Ф. Чернавин, Ф. П. Чернавин, В. А. Рассказова // Труды МАИ. – 2019. – С. 20–48.
18. Кортес, П. Качество вина / П. Кортес, А. Сердейра, Ф. Алмейда. – URL: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/186/wine+quality>, DOI 10.24432/C56S3T (дата обращения: 01.12.2025).
19. UCI Machine Learning Repository. – URL: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/> (дата обращения: 01.12.2025).

#### References

1. Biryukov, D. N., Dudkin, A. S. Explainability and interpretability as important aspects of the safety of decisions made by intelligent systems (review article). *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 373–386 (In Russ).
2. Vorontsov, K. V. *Interpretability and explainability in machine learning*. Available at: <https://www.machinelearning.ru/wiki> (accessed 01.12.2025) (In Russ).
3. LeCun, Y. *How machines learn: the revolution in neural networks and deep learning*. Moscow, Al'pina PRO Publ., 2021. 335 p. (In Russ).
4. Marcus, G., Davis, E. *Rebooting AI: Building artificial intelligence we can trust*. Moscow, Intelktualnaya literatura Publ., 2021. 300 p. (In Russ).
5. Pearl, J., Mackenzie, D. *The book of why: The new science of cause and effect*. Moscow, AST Publ., 2018. 552 p. (In Russ).
6. Rudin, C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 2019, no. 1, pp. 206–215.
7. Berg, M., Cheong, J., van Kreveld, M., Overmars, M. *Computational geometry: algorithms and applications*. 3rd ed. Berlin, Springer, 2008. 388 p.
8. Voronin, G. F., Voskov, A. L. Calculation of phase equilibria and construction of diagrams using the convex hull method. *Bulletin of Moscow University. Series 2: Chemistry*, 2013, vol. 54, no. 1, pp. 3–11 (In Russ).
9. Magdeev, R. G., Biktimirov, L. Sh. Application of convex hull construction algorithms in the analysis of metal microstructure images. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 6 (2), pp. 496–500 (In Russ).
10. *Unveiling the Power of Convex Hull: A Geometric Perspective*. Available at: <https://fastercapital.com/content/Unveiling-the-Power-of-Convex-Hull--A-Geometric-Perspective-update.html> (accessed 01.12.2025) (In Russ).
11. Chau, A. Convex and concave hulls for classification with support vector machine. Available at: [https://www.academia.edu/5300490/Convex\\_and\\_concave\\_hulls\\_for\\_classification\\_with\\_support\\_vector\\_machine](https://www.academia.edu/5300490/Convex_and_concave_hulls_for_classification_with_support_vector_machine) (accessed 01.12.2025) (In Russ).
12. Nalbandov, G., Groenewald, J. *Nearest convex hull classification*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/46434323\\_Nearest\\_convex\\_hull\\_classification](https://www.researchgate.net/publication/46434323_Nearest_convex_hull_classification) (accessed 01.12.2025) (In Russ).
13. Fernández-Francos, D., Fontenla-Romero, O., Alonso-Betanzos, A. One-class classification algorithm based on convex hull. *Proceedings of the European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning*, Bruges, Belgium, April 27–29, 2016, pp. 477–482.
14. Pardalos, P. M., Li, Y., Hager, W. W. Linear programming approaches to the convex hull problem in Rm. *Computers & Mathematics with Applications*, 1995, vol. 29, no. 7, pp. 23–29.
15. Chernavin, P. F., Chernavin, N. P., Chernavin, F. P. Application of linear inequality theory in machine learning problems. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2023, no. 4 (32), pp. 21–29 (In Russ).
16. *Risk Management in the Banking Sector: Conference proceedings, Moscow, March 12–13, 2024*. Available at: <https://dialogmanag.com/upravlenie-riskami-v-bankovskom-sektore-8-ya-ezhegodnaya-konferenciya-mart-2024> (accessed 01.12.2025) (In Russ).
17. Gainanov, D. N., Chernavin, N. P., Chernavin, P. F., Chernavin, F. P., Rasskazova, V. A. Convex hulls and convexly separable sets in multiclass pattern recognition problems. *Proceedings of the Moscow Aviation Institute*, 2019, pp. 20–48 (In Russ).
18. Cortez, P., Cerdeira, A., Almeida, F. Wine quality data set. Available at: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/186/wine+quality> (accessed 01.12.2025) (In Russ).
19. UCI Machine Learning Repository. Available at: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/> (accessed 01.12.2025).

Статья поступила в редакцию 26.01.2026; одобрена после рецензирования 08.02.2026; принята к публикации 08.02.2026.

The article was submitted 26.01.2026; approved after reviewing 08.02.2026; accepted for publication 08.02.2026.

# **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

## **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 004.001

### **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОЛИВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ**

*Кузнецова Валентина Юрьевна*, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления», ORCID: 0000-0002-6954-5020, e-mail: v.kuznetsova@astu.ru

Статья посвящена разработке и внедрению отечественного программно-аппаратного комплекса для контроля и управления процессом полива сельскохозяйственных культур, ориентированного на российские условия. Основное внимание уделено решению проблемы недостатка водных ресурсов и необходимости точной регуляции полива, особенно актуально это для регионов с выраженной сухостью климата, таких как Астраханская область. Предлагается интегрированная система, включающая датчики измерения метеоусловий и состояние почвы, а также программное обеспечение для расчета необходимой нормы полива с учетом особенностей роста томатов. Представлены преимущества комплексного подхода по сравнению с зарубежными аналогами, демонстрируя экономическую целесообразность собственного решения в условиях импортозамещения. Экспериментально подтверждено увеличение урожайности и снижение расхода воды.

**Ключевые слова:** автоматизированный полив, эвапотранспирация, управление сельским хозяйством, оптимизация водного ресурса, томатные культуры

### **INFORMATION SYSTEM FOR TRAINING IN COUNTERING SOCIAL ENGINEERING ATTACKS**

*Kuznetsova Valentina Yu.*, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department "Automated Information Processing and Control Systems", ORCID: 0000-0002-6954-5020, e-mail: v.kuznetsova@astu.ru

The article is devoted to the development and implementation of a domestic hardware-software complex for monitoring and managing irrigation processes in agricultural crops tailored to Russian conditions. The main focus is on addressing the problem of water scarcity and the need for precise regulation of irrigation, which is particularly relevant for regions with pronounced aridity such as Astrakhan Oblast. An integrated system is proposed that includes sensors for measuring weather conditions and soil state, along with software for calculating necessary irrigation norms taking into account the specifics of tomato growth. Advantages of this comprehensive approach are presented compared to foreign analogues, demonstrating the economic feasibility of its own solution under import substitution conditions. Experimentally confirmed increase in crop yield and reduction in water consumption have been achieved.

**Keywords:** automated irrigation, evapotranspiration, agricultural management, optimization of water resources, tomato crops

### **ВВЕДЕНИЕ**

Аграрный сектор в Российской Федерации является одним из важнейших компонентов экономики, обеспечивая продовольственную безопасность и поддерживая жизнедеятельность сельских сообществ. В последние годы наблюдается возрастающая потребность в модернизации сельского хозяйства, что связано с необходимостью повышения продуктивности, эффективности использования ресурсов и адаптации к изменениям климата.

В 2023 г. объем сельскохозяйственного производства в России увеличился на 3,1 %, что свидетельствует о позитивных тенденциях в отрасли. Однако, несмотря на этот рост, аграрный сектор сталкивается с множеством вызовов, включая недостаточную автоматизацию процессов и устаревшие методы управления.

Ключевыми аспектами, требующими внимания, являются информационные системы управления урожаем. Такие информационные системы представляют собой совокупность технологий и процессов, позволяющих собирать, обрабатывать и анализировать данные, что критично для эффективного управления аграрными процессами. Согласно исследованиям, проведенным в 2023 г., более 40 % аграриев отмечают необходимость внедрения инновационных решений для повышения эффективности своих хозяйств. Внедрение информационных систем является важным шагом в этом направлении, позволяя не только оптимизировать процессы управления, но и минимизировать риски, связанные с изменением климата и другими внешними факторами.

Астраханская область – один из лидеров Российской Федерации по производству овощей, где томаты занимают ключевое место. Доля астраханских томатов в общероссийском объеме достигает 74 %. Регион обеспечивает около 40–50 % российского рынка томатной пасты, ежегодно в области выращивается и перерабатывается значительный объем томатов, включая промышленное производство. Валовый сбор овощей за 2025 г. по региону в тысячах тонн представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Валовый сбор томатов относительно остальных видов овощных культур в 2025 г. в Астраханской области

Выращивание томатов в Астраханской области является актуальным благодаря ряду факторов. В первую очередь климат региона характеризуется жарким летом и большим количеством солнечных дней, что идеально подходит для роста теплолюбивых культур. Почва также благоприятствует выращиванию помидоров, поскольку содержит необходимые минералы и микроэлементы. Кроме того, наличие крупных рек, таких как Волга, обеспечивает доступ к воде для полива.

Однако климатические особенности региона непосредственно связаны с процессом полива, потому что территория отличается высокими среднесуточными температурами, которые, в свою очередь, ускоряют испарение влаги из почвы и растений, что требует регулярного восполнения запасов воды. Таким образом, вопрос автоматизации полива для Астраханской области является актуальной задачей, так как климатические условия региона ввиду его расположения в зоне полупустынь и пустынь характеризуются жарким летом и мягкой зимой, поэтому возникает потребность в постоянном контроле за достаточной увлажненностью почвы. Ручными методами на больших территориях сельхозугодий достаточно проблематично обеспечивать оптимальный уровень влажности почв, отсюда возникает необходимость автоматизации данного процесса.

#### **ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССА ПОЛИВА НА ПРИМЕРЕ ТОМАТНЫХ КУЛЬТУР**

Поскольку для региона характерной овощной культурной является томат, технологию полива предлагается описать именно для него, однако в дальнейшем не составит труда адаптировать методику для любой сельскохозяйственной культуры.

Особенности режима полива для томатов включают ряд важных аспектов, которые помогают обеспечить оптимальное развитие растений и получение хорошего урожая. Вот ключевые моменты, которые следует учитывать:

- частота полива. Томаты нуждаются в регулярном поливе, но важно избегать чрезмерного увлажнения почвы. Полив обычно проводится каждые 3–4 дня, но частота может варьироваться в зависимости от погодных условий и типа почвы. Например, в жаркую погоду растения могут нуждаться в более частом поливе;

– объем воды. Каждый куст томата требует около 2–3 литров воды за одно орошение. Избыток влаги может привести к гниению корней и развитию грибковых заболеваний;

– время полива. Наилучшее время для полива – раннее утро или поздний вечер, когда солнце менее активно. Это позволяет воде впитываться в почву, а не испаряться на поверхности листьев, что может привести к ожогам;

– метод полива. Рекомендуется использовать капельный полив или поливать растения под корень, чтобы избежать попадания воды на листья. Это помогает предотвратить заболевания, такие как фитофтороз, и способствует лучшему усвоению питательных веществ корнями.

Норму полива томатов определяет эвапотранспирация (коэффициент испарения влаги), которая зависит от температуры воздуха, плотности почвы, наличия ветра и других факторов. Для формирования нормы необходимо знать скорость эвапотранспирации в пиковый период роста плода. Среднегодовая сумма эвапотранспирации в Астраханской области составляет примерно 800–1000 мм, что значительно превышает количество атмосферных осадков (около 150–250 мм). Это создает значительный дефицит влаги, особенно в летний период, и требует дополнительного орошения сельскохозяйственных угодий.

Для точного расчета показателя эвапотранспирации (ЕТО) используют методы ФАО – Пенман – Монтейта, учитывая конкретные метеорологические данные региона (температура воздуха, влажность, скорость ветра, солнечная радиация):

$$ETo = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)},$$

где  $R_n$  – чистая солнечная радиация (МДж/м<sup>2</sup>/день);

$G$  – тепловой поток в почве (МДж/м<sup>2</sup>/день);

$T$  – средняя температура воздуха (Цельсий);

$u_2$  – скорость ветра на высоте 2 м (м/с);

$e_s - e_a$  – дефицит давления пара (гПа);

$\Delta$  – наклон кривой давления насыщенного пара;

$\gamma$  – психрометрическая константа.

Также на количество воды для полива влияет период роста растения. Условно период роста помидоров можно разделить на четыре отдельные стадии: начало роста плодов, накопление объема, покраснение, период созревания (40–70 % зрелости). В каждом из этапов развития рекомендуется разная степень полива.

Таким образом определяется реальная суточная потребность растений в воде с учетом разных их стадий роста в мм/сутки:

$$\text{Норма полива} = ETo \times Kc.$$

Коэффициент полива для конкретного растения определяется согласно «Системы и сооружения мелиоративные. Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур. Общие требования. ГОСТ р 58331.3-2019». Для томатов коэффициент полива приведен на рисунке 2.

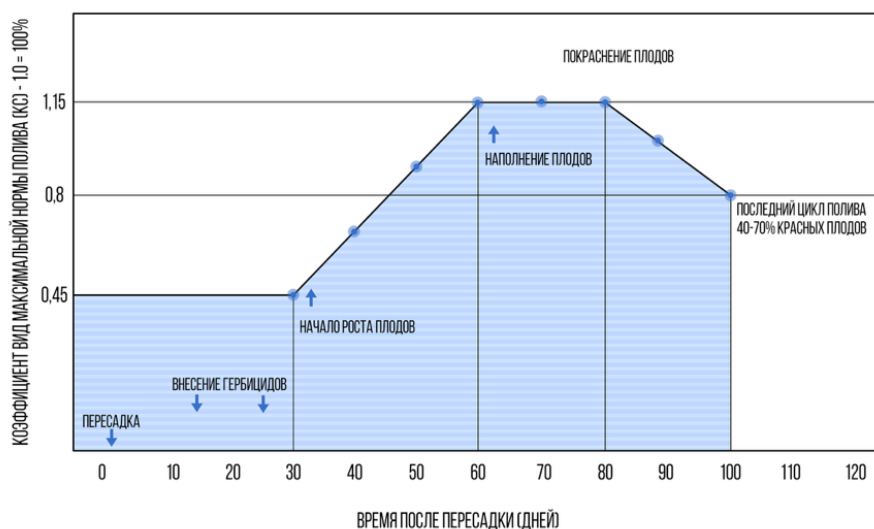


Рисунок 2 – График изменения коэффициента потребности томатов в воде в зависимости от их стадии роста

Таким образом, обеспечение правильного полива не представляется возможным без средств автоматизации, так как в режиме реального времени отслеживать изменение состояния окружающей среды и корректировать поливочные мероприятия достаточно затруднительно: требует привлечения большого количества персонала и при это может привести к неравномерному или избыточному поливу из-за несвоевременной реакции на изменение параметров среды.

В связи с этим автоматическое изменение технологии полива на основе анализа показателей окружающей среды является адекватным и удобным решением задачи оптимального полива для продукции сельского хозяйства.

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ РЕШЕНИЙ**

В условиях стремительного развития аграрного сектора и роста потребности в эффективных методах управления сельскохозяйственным производством становится необходимым проведение сравнительного анализа технологий, применяемых в данной области. При этом важно учитывать опыт зарубежных стран – лидеров в сельском хозяйстве, адаптируя лучшие практики к российским реалиям, особенностям климатических зон и экономическим условиям регионов, таким как Астраханская область. Проведение подобного исследования обеспечит формирование научно обоснованных рекомендаций по выбору оптимальных решений для устойчивого развития отечественного агропромышленного комплекса.

Перечень наиболее известных программных комплексов в аграрной сфере приведен в таблице.

Таблица – Преимущества и недостатки имеющихся систем

Модель	Преимущества	Недостатки
John Deere 2630 Display, Operations Cente	Интеграция систем GPS и датчиков для точного управления поливом и сбором урожая. Возможность анализа данных для оптимизации всех этапов сельскохозяйственного процесса. Удобный интерфейс для мониторинга и управления с одного устройства.	Высокая стоимость оборудования и программного обеспечения. Требуется обучение для эффективного использования системы. Зарубежное производство.
Trimble Ag Leader, Trimble Connected Farm	Объединяет данные о поливе, состоянии почвы и урожая в одном интерфейсе. Поддержка мобильных устройств для управления с любого места. Возможность интеграции с другими системами и оборудованием.	Сложность в настройке и интеграции с существующими системами. Необходимость в постоянном интернет-соединении для доступа к данным. Зарубежное производство.
Ag Leader Integra, AgFiniti	Интеграция функций управления поливом и сбором урожая в одном решении. Возможность мониторинга в реальном времени и анализа данных для принятия решений	Высокая стоимость внедрения. Необходимость обучения для работы с программным обеспечением. Зарубежное производство

Вышеуказанные технологии контроля сбора и полива урожая имеют высокую стоимость внедрения и производятся за рубежом, поэтому в условиях импортозамещения ставится целесообразным разработать собственный программно-аппаратный комплекс контроля сбора и полива урожая, так как имеющиеся на российском рынке решения обеспечивают только автоматический полив растений по таймеру и не учитывают погодные условия и влажность почвы в настоящий момент, что может привести как к загниванию, так и к засушиванию растений.

### **ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ РАЗРАБОТКИ**

Цель разработки отечественного программно-аппаратного комплекса заключается в создании решения, которое позволит эффективно контролировать и управлять процессом сбора и полива урожая в российских условиях. Основными задачами проекта являются:

- автоматизация процесса сбора и полива урожая;
- повышение точности и эффективности использования водных ресурсов;
- уменьшение зависимости от погодных условий;
- минимизация затрат на управление и обслуживание.

Для достижения поставленных целей предлагается разработать систему, состоящую из трех ключевых элементов – аппаратная часть, программная часть и пользовательский интерфейс.

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Аппаратная часть включает в себя датчики и исполнительные механизмы, обеспечивающие мониторинг состояния растений и почвы, а также управление системой полива (исполнительные

механизмы для включения и выключения насосов и клапанов), модули связи для передачи данных. Поток «Данные с датчиков» содержит такую информацию, как: процентное содержание воды в почве, температура почвы, датчик давления и температуры, уровень осадков, датчик уровня солнечной радиации, датчик скорости ветра, датчик теплового потока в почве. Датчики устанавливаются на полях и собирают информацию о температуре, влажности почвы и воздуха. Эти данные передаются на сервер через беспроводные сети. Сервер обрабатывает полученные данные и формирует команды для исполнительных механизмов, управляющих поливом.

Данные с датчиков:

- предоставляют реальное время и динамическую информацию, которая может меняться от момента к моменту или день ото дня;
- включают в себя показания для расчета ЕТО;
- используются для непосредственного мониторинга и оперативного реагирования на изменения в среде.

Так данные с датчиков помогают в текущем управлении и быстром принятии решений, в то время как данные о состоянии почвы используются для планирования на будущее и улучшения качества почвы в долгосрочной перспективе.

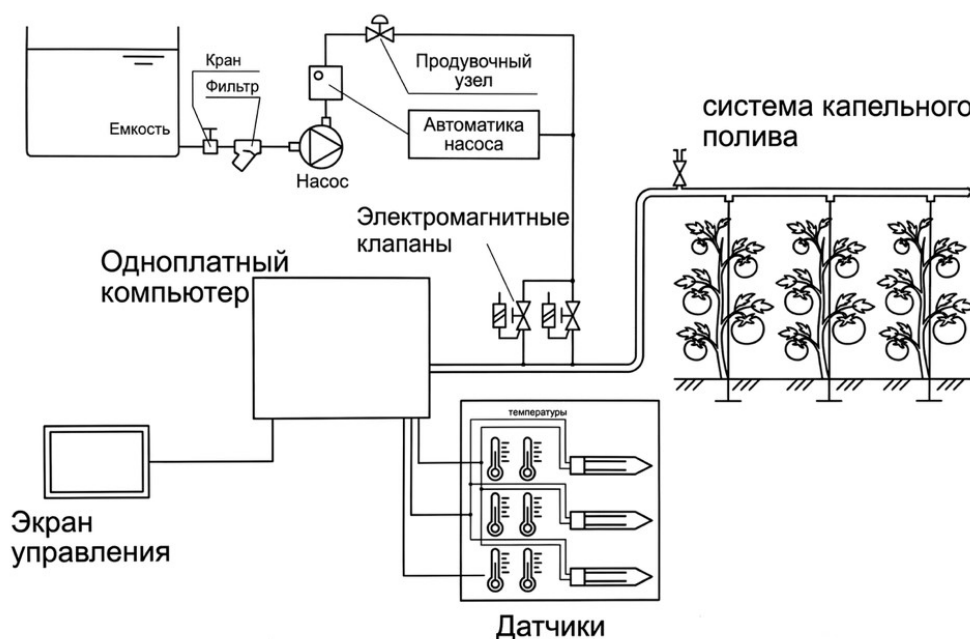


Рисунок 3 – Принципиальная схема устройства

В рамках реализации программной части на основе данных с датчиков производятся необходимые расчеты ЕТО и подаются автоматические команды для обеспечения заданного уровня влажности почвы. Пользовательский интерфейс представлен в виде веб-интерфейса, который позволяет фермерам получать информацию о состоянии полей и контролировать работу системы удаленно. Через интерфейс можно увидеть карту полей, показатели температуры и влажности, историю поливных мероприятий и прогнозы будущих потребностей в воде, особенно если полив осуществляется не из центрального водопровода, а из накопительных емкостей. А в случае выхода из строя одного или нескольких датчиков, система сможет на основе имеющихся данных с датчиков предложить из базы данных наиболее подходящий показатель ЕТО с помощью метода прецедентов.

Программная часть состоит из:

- модуля обработки данных, который собирает и анализирует информацию с датчиков;
- алгоритма оптимизации полива, определяющего оптимальное количество воды для каждого участка поля на основе расчета ЕТО для конкретного вида культуры;
- интерфейса взаимодействия с пользователями, позволяющего фермерам видеть состояние полей и управлять системой полива.

Основной фрагмент работы алгоритма программного продукта приведен на рисунке 4.

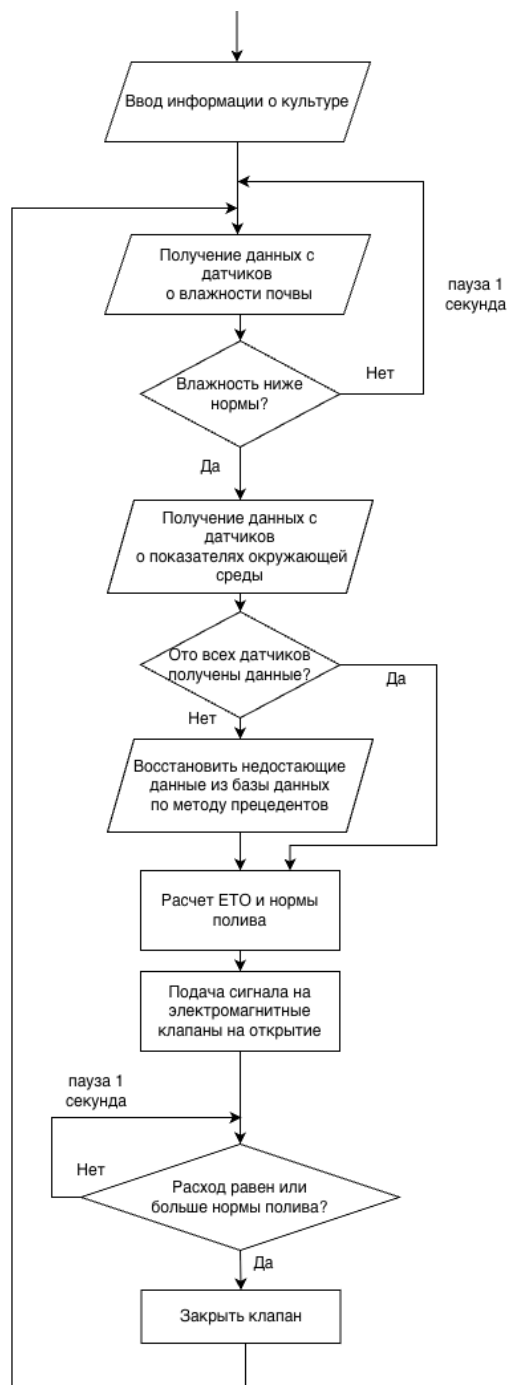


Рисунок 4 – Фрагмент алгоритма работы программно-аппаратного комплекса

### РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА

Прототип разработанного комплекса был установлен на опытных участках сельхозназначений в Астраханской области. Для тестирования были выбраны участки площадью около 1 гектара каждый, на которых выращивались томаты. Поля были предварительно оснащены готовыми системами капельного полива, тем самым в рамках исследования потребовалось только обеспечить наличие датчиков и модулей управления. Были выбраны экспериментальные и контрольные поля томатов одинаковой площадью. Тестирование проводилось в течение двух сезонов, весной и осенью 2024 г. При прочих равных условиях по итогам эксперимента количество погибших растений у экспериментальной группы на 4,51 % ниже, чем у контрольной, а урожайность выше на 1,17 %, что подтверждает выдвинутые теории об эффективности внедрения программно-аппаратного решения. Расход воды при этом снизился на 3,6 %.

Эти результаты подтвердили эффективность предложенного подхода и позволили сделать вывод о возможности масштабирования решения на большие площади сельскохозяйственных угодий.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программно-аппаратный комплекс контроля сбора и полива урожая показал свою эффективность в условиях российского сельского хозяйства. Его внедрение способно существенно повысить производительность и снизить издержки, особенно в регионах с ограниченными водными ресурсами, таких как Астраханская область.

Дальнейшие шаги включают расширение функциональности комплекса, интеграцию с другими технологиями (например, беспилотниками для дистанционного зондирования) и разработку экономически выгодных моделей внедрения и обслуживания. Использование предлагаемого метода может быть расширено для обеспечения полива не только томатных культур, но и другой сельхозпродукции при модификации алгоритма в части входных данных по коэффициенту полива.

Таким образом, создание отечественных решений для автоматизации сельского хозяйства является важной задачей, способствующей повышению конкурентоспособности российских производителей и обеспечению продовольственной безопасности страны.

### Список источников

1. Бондарев, Н. С. Цифровое управление тепличным овощеводством / Н. С. Бондарев, Г. С. Бондарева // *Инновационная деятельность*. – 2020. – № 2 (53). – С. 26–33.
2. Брумштейн, Ю. М. Городская среда: системный анализ угроз безопасности для физических и юридических лиц / Ю. М. Брумштейн, В. Ю. Гайфитдинова // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2017. – № 8. – С. 45–51.
3. Каландаров, П. И. Система автоматической регулировки расхода воды в процессе капельного орошения / П. И. Каландаров Ж. К. Кутлимуротов // *Научные известия*. – 2022. – № 29. – С. 141–147.
4. Ахметов, Л. М. Интеллектуальная система полива растений на базе микроконтроллера Arduino UNO / Л. М. Ахметов, Д. И. Биков, М. Р. Хамидуллин, Г. А. Гареева // *International Journal of Advanced Studies*. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 7–17. – DOI 10.12731/2227–930X-2021–11–4–7–17.
5. Тютюма, Н. В. Оптимизация уровня минерального питания томатов при капельном орошении в условиях севера Астраханской области / Н. В. Тютюма, Н. И. Кудряшова // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. – 2014. – № 2. – С. 17–18.
6. Сергеев, А. А. Перспективы применения капельного орошения / А. А. Сергеев и др. // *Проблемы социально-экономической устойчивости региона*. – 2023. – С. 413–416.
7. Федосов, А. Ю. Дефицитное орошение овощных культур / А. Ю. Федосов, А. М. Меньших, М. И. Иванова // *Овощи России*. – 2022. – № 3. – С. 44–49.
8. Ясониди О. Е. Эвапотранспирация томатов при дождевании и капельном орошении / О. Е. Ясониди, И. В. Попова // *Проблемы сохранения окружающей среды при эксплуатации гидромелиоративных систем*. – 1996. – С. 129–131.
9. Hao, S. The physiological responses of tomato to water stress and re-water in different growth periods / S. Hao et al. // *Scientia Horticulturae*. – 2019. – Т. 249. – С. 143–154.
10. ГОСТ р 58331.3-2019. Системы и сооружения мелиоративные. Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 20 с.

### References

1. Bondarev, N. S., Bondareva, G. S. Digital management of greenhouse vegetable growing. *Innovative activity*, 2020, no. 2 (53), pp. 26–33 (In Russ.).
2. Brumstein, Yu. M., Gaifitdinova, V. Y. Urban environment: system analysis of security threats for individuals and legal entities. *Proceedings of the Volgograd State Technical University*, 2017, no. 8, pp. 45–51 (In Russ.).
3. Kalandarov, P. I., Kutlimurotov, Zh. K. The system of automatic adjustment of water flow during drip irrigation. *Scientific News*, 2022, no. 29, pp. 141–147 (In Russ.).
4. Akhmetov, L. M., Bikov, D. I., Khamidullin, M. R., Gareeva, G. A. Intelligent plant irrigation system based on the Arduino UNO microcontroller. *International Journal of Advanced Studies*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 7–17. DOI 10.12731/2227–930X 2021-11-4-7-17 (In Russ.).
5. Tyutyuma, N. V., Kudryashova, N. I. Optimization of the level of mineral nutrition of tomatoes during drip irrigation in the conditions of the north of the Astrakhan region. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, 2014, no. 2, pp. 17–18 (In Russ.).
6. Sergeev, A. A. et al. Prospects for the use of drip irrigation. *Problems of socio-economic sustainability of the region*, 2023, pp. 413–416 (In Russ.).
7. Fedosov, A. Yu., Menshikh, A. M., Ivanova, M. I. Deficient irrigation of vegetable crops. *Vegetables of Russia*, 2022, no. 3, pp. 44–49 (In Russ.).
8. Yasonidi, O. E., Popova, I. V. Tomato evapotranspiration during sprinkling and drip irrigation. *Problems of environmental conservation in the operation of hydro-reclamation systems*, 1996, pp. 129–131 (In Russ.).
9. Hao, S. et al. The physiological responses of tomatoes to water stress and re-water in different growth periods. *Scientia Horticulturae*, 2019, vol. 249, pp. 143–154.
10. GOST r 58331.3-2019. Reclamation systems and structures. Water demand for irrigation of agricultural crops. General requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 20 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.01.2026; одобрена после рецензирования 08.02.2026; принята к публикации 08.02.2026.

The article was submitted 23.01.2026; approved after reviewing 08.02.2026; accepted for publication 08.02.2026.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале публикуются материалы на английском и русском языках по тематике, соответствующей утвержденным для журнала отраслям наук, группам специальностей.

2. В список соавторов работ включаются только те лица, которые внесли творческий вклад в подготовку представленных материалов. Лицам, оказавшим только техническую помощь, можно выразить благодарность в конце статьи. Один человек может быть автором (соавтором) не более чем двух статей в одном номере журнала, причем единственным автором он может быть только в одной статье.

3. Объем публикаций для научных статей должен быть не менее 8 страниц, а количество источников в библиографическом списке (списке литературы) – не менее 10 позиций.

4. Содержание каждой статьи должно включать следующие элементы: УДК; название статьи; сведения об авторах, включая их место работы, должность, адрес электронной почты; аннотацию объемом от 100 до 250 слов, ключевые слова (от 9 до 13); графическую аннотацию, отражающую содержание статьи; название статьи, сведения об авторах, аннотацию и ключевые слова на английском языке (для англоязычных статей – на русском языке); введение – оно должно заканчиваться формулировкой цели работы в явной форме; собственно текст статьи – очень желательна его сегментация на разделы, имеющие содержательные заголовки; выводы или заключение (должны соответствовать формулировке цели статьи).

5. Для русскоязычных статей приводится два библиографических списка: на языке оригинала статьи; список с транслитерацией русскоязычных источников на латиницу и (дополнительно) приведением в квадратных скобках переводов названий статей и названий источников на английский язык.

В «русскоязычном» библиографическом списке (списке литературы) порядок следования источников – по алфавиту фамилий авторов (сначала русскоязычные источники, потом иноязычные). На все источники, включенные в библиографический список, должны быть даны ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. При необходимости авторы могут указывать номера страниц в источниках, на которые даются ссылки. Приветствуются ссылки на иноязычные источники, а также на материалы, опубликованные ранее в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии». Однако в последнем случае количество таких ссылок не должно превышать 20 % от общего количества источников, включенных в библиографический список. Для источников, имеющих DOI, целесообразно его указывать. При ссылках на статьи, опубликованные в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии», целесообразно в конце библиографического описания источника в круглых скобках указывать гиперссылку, указывающую на место размещения статьи на страничке сайта Астраханского государственного университета.

Ссылки в библиографическом списке на материалы, размещенные в интернете, допускаются при соблюдении следующих условий: если у материала, на который дается ссылка, имеется автор и/или название, то они должны быть указаны для этого источника; должен быть приведен полный маршрут доступа к источнику в интернете; должна быть указана дата обращения (доступа) к источнику.

Ограничения по списку литературы: доля самоцитирований для любого из авторов статьи, а также по совокупности всех авторов статьи, не должна превышать 25 %; доля ссылок на статьи с участием одного автора, не являющегося автором (соавтором) статьи, не должна превышать 25 %.

6. Суммарная доля таблиц и иллюстраций в общем объеме представляемой статьи не должна превышать 40 %. Под иллюстрациями понимаются следующие объекты: диаграммы; графики; рисунки; эскизы; фотографии; карты и т. п.

7. Доля оригинального текста в статьях (оцениваемого через систему «Антиплагиат» на сайте [www.antiplagiat.ru](http://www.antiplagiat.ru)) должна быть не менее 80 %.

8. Указание на то, что работа финансируется по какому-либо гранту, в рамках Федеральной целевой программы, государственного заказа и пр. дается в виде постраничной сноски после заголовка (названия) работы.

9. В сведения об авторах работ помимо места работы и должности целесообразно включать ORCID автора и гиперссылку на страничку с его личными наукометрическими показателями на сайте [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru). По желанию можно привести также ссылки на странички с наукометрическими показателями на Scopus, в ResearchGate; на личную страничку, размещенную на сайте организации.

10. Основные технические требования к оформлению статей (материалов):

10.1. Текст должен быть расположен по ширине страницы формата А4 с учётом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 12, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисовочных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 10 кегля. Альбомная ориентация страниц допускается только в порядке исключения для следующих случаев: широкоформатные таблицы с большим количеством колонок; иллюстрации большого размера, которые не умещаются на странице с книжной ориентацией.

Абзацные отступы одинаковы по всему тексту – 0,75 см. Кавычки («»), скобки ([ ], ( )), маркеры и другие знаки должны быть аналогичными на протяжении всего предоставляемого для публикации материала.

# **ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2026  
№ 1 (73)**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
Федеральной службы по надзору в сфере массовых коммуникаций,  
связи и охраны культурного наследия  
ПИ № ФС77-31932 от 16 мая 2008 г.

Учредитель  
Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева  
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Адрес редакции:  
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20

Адрес издателя:  
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

**Главный редактор А. М. Лихтер**

Редактирование,  
компьютерная правка, верстка *Н. Н. Сахно*

Дата выхода в свет 07.05.2026 г.

Цена свободная  
Уч.-изд. 18,7. Усл. печ. л. 26,2.  
Заказ № 4756. Тираж 500 экз. (первый завод – 23 экз.)

---

Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
тел. (8512) 24-66-60 (доб. 3; издательско-полиграфический отдел)  
Отпечатано в Астраханской цифровой типографии  
414040, г. Астрахань, пл. К. Маркса, 33  
тел./факс (8512) 54-00-11, 73-40-40,  
E-mail: a-d-t@mail.ru