


МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия
Юго-Западного
государственного
университета

Научный журнал

Том 29 № 4 / 2025



Proceedings
of the Southwest
State University

Scientific Journal

Vol. 29 № 4 / 2025



**Известия Юго-Западного
государственного университета
(Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)**

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

До 2011 года журнал издавался под названием
«Известия Курского государственного технического университета».

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как технология и оборудование механической и физико-технической обработки, сварка, роботы, мехатроника и робототехнические системы, управление в социальных и экономических системах, методы и системы защиты информации, информационная безопасность, автоматизация и управление технологическими процессами, строительные конструкции, теплоснабжение, вентиляция, газоснабжение и освещение, строительная механика.

В журнале публикуются оригинальные работы, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Машиностроение и машиноведение: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Строительство: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Информатика, вычислительная техника и управление: 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Бобырь Максим Владимирович, д-р техн. наук, профессор;
Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агеев Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Борзов Дмитрий Борисович, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Бредихин Владимир Викторович, д-р экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия);

Булычев Всеволод Валериевич, д-р техн. наук, профессор; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал (г. Калуга, Россия);

Бхатгачарья Сиддхартха, д-р философии (PhD), профессор, Университет Христа (Крайст), Бангалор, Индия;

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор, Университет архитектуры, строительства и геодезии (Мальта);

Бычков Игорь Вячеславович, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова (г.Иркутск, Россия);

Грибова Валерия Викторовна, д-р техн. наук, чл.-кор. РАН, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (г. Владивосток, Россия);

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Казанцев Виктор Борисович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт биологии и биомедицины Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия);

Кузнецов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Кукарас Даниэль, д-р философии (PhD), профессор, факультет гражданского строительства, Нови-Садский университет (г.Суботица, Сербия);

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Мещеряков Роман Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (г. Москва, Россия);

Новиков Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, академик РАН, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (г. Москва, Россия);

Овчинников Виктор Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г. Москва, Россия);

Пановко Григорий Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, Институт машиноведения Российской академии наук (г. Москва, Россия);

Петрешин Дмитрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Брянский государственный технический университет (г. Брянск, Россия);

Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, Россия);

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, НИЦ ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ (г. Курск, Россия);

Смирнов Игорь Михайлович, д-р техн. наук, доцент, АО «Научно-исследовательский инженерный институт» (г. Балашиха, Россия);

Сотникова Ольга Анатольевна, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук, профессор, Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева (г. Орел, Россия);

Черный Сергей Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, Керченский государственный морской технологический университет (г. Керчь, Россия);

Щербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия).

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Емельянов Сергей Геннадьевич (председатель), д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия)

Грабовой Кирилл Петрович, д-р экон. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

Гриднев Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Ежов Владимир Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, Изобретатель СССР, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

Колмыков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

Колчунов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, член Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия);

Корневский Николай Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

Латыпов Рашит Абдулхакович, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г. Москва, Россия);

Локтионова Оксана Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия).

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

Сайт журнала: <https://science.swsu.ru>

© Юго-Западный государственный университет, 2025



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

Полиграфический центр
Юго-Западного государственного
университета, 305040, г. Курск,
ул. 50 лет Октября, д. 94

Подписка и распространение:
журнал распространяется
по подписке.

Подписной индекс журнала 41219
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре выпуска в год

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 22.12.2025.

Дата выхода в свет 26.12.2025. Формат 60х84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 26,8.

Тираж 1000 экз. Заказ 62.

16+

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as mechanical technologies and equipment; machine building; physical and engineering processing of materials; welding; robotics, mechatronics and robot systems, management and administration of social and economic systems; information protection methods and systems; information security; production process automation and control; building structures; heat supply; ventilation; gas supply and lightning systems; construction mechanisms and machines.

The journal publishes scientific articles in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU.

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctoral or candidate thesis in the following areas:

Mechanical engineering and machine science: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Construction: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Computer science, computer engineering and control: 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6.

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

Yevgenii V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Dmitry B. Borzov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir V. Bredikhin, Dr. of Sci. (Economic), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vsevolod V. Bulychov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch (Kaluga, Russia);

Bhatgacharya Siddhartha, Doctor of Philosophy (PhD), Professor, Christ University (Christ), Bangalore, India;

Lino Bianco, Dr. of Sci. (Philosophy), Professor of IAA, Visiting Professor at University of Architecture, Civil Eng. and Geodesy (Sofia), Senior Lecturer, University of Malta (Malta);

Igor V. Bychkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory (Irkutsk, Russia);

Sergey G. Cherny, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Kerch State Marine Technological University (Kerch, Russia);

Valeria V. Gribova, Dr. of Sci. (Engineering), Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia);

Viktor B. Kazantsev, Dr. of Sci. (Physical and Mathematical), Professor, Institute of Biology and Biomedicine of the National Research Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky;

Vitalii I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Russia);

Sergey N. Kuznetsov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Danijel Kukaras, Associate Professor, PhD, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering (Subotica, Serbia);

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Roman V. Meshcheryakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Dmitry A. Novikov, Dr. of Sci. (Engineering),
Academician of the Russian Academy of Sciences,
V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems
of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Viktor V. Ovchinnikov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Grigori Ya. Panovko, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Dmitry I. Petreshin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russia);

Andrey L. Ronzhin, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, St. Petersburg Federal Research Center of the
Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia);

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor M. Smirnov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate
Professor, JSC "Research Engineering Institute"
(Balashikha, Russia);

Olga A. Sotnikova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Andrey V. Turkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russia);

Vladimir I. Shcherbakov, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Voronezh State Technical University
(Voronezh, Russia);

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia);

Zhanybaj T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

Sergei G. Emelianov, Chairman, Dr. of Sci. (Engineering),
Correspondent Member of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences, Southwest State
University (Kursk, Russia)

Kirill P. Grabovoy, Dr. of Sci. (Economics), Professor,
National Research Moscow State University
of Civil Engineering (Moscow, Russia);

Sergey Yu. Gridnev, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Voronezh State Technical
University (Voronezh, Russia);

Vladimir S. Ezhov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Valerii I. Kolmykov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Russian Academy of Architecture
and Construction Sciences Advisor (Russia);

Nikolay A. Korenevskii, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Rashit A. Latypov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Oksana G. Loktionova, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia).

Founder and Publisher:

"Southwest State University"

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

Phone: +7 (4712) 22-25-26,

Fax: +7 (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,
Information Technology and Mass media
(ПИ №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix: 10.21869

Web-site: <https://science.swsu.ru>

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str. 94,
Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.
Subscription index 41219
in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2025



Publications are available in accordance with
the Creative Commons Attribution 4.0 License

Singed to print 22.12.2025.

Release date 26.12.2025. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 26,8.

Circulation 1000 copies. Order 62.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Исследование собственных частот сварной конструкции рабочего колеса промышленного вентилятора в программном комплексе APM FEM 10**
Григорьев И. Ю., Казаков Д. Ю.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

- Сейсмоизоляция модульных железобетонных зданий 23**
Попов А.Х., Тарасов В.А.
- Исследование комбинированных систем утилизации теплоты: анализ влияния режимных параметров и геометрических характеристик на эффективность рекуперации тепла..... 38**
Ежов В.С., Бурцев А.П.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Гибридный двухуровневый метод автоматического выявления подмены лица оператора на изображении 53**
Халеев М.Д.
- Выбор разрядности компонентов нелинейного нейрона при реализации на ПЛИС..... 70**
Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Голубев Д.А.
- Моделирование управляемого движения сферического магнитоактивного объекта в эластичном канале 93**
Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Караськов В. А.
- Уменьшение аппаратных затрат цифровой фильтрации в системе остаточных классов на основе усеченных блоков умножения с накоплением 111**
Ляхов П. А.
- Применение искусственного интеллекта в задачах обнаружения деструктивных воздействий на информационные и технические системы 125**
Селиверстов Д.Е., Русаков К.Д.
- Моделирование движения запястья при скандинавской ходьбе..... 140**
Яцун С.Ф., Поляков В.А., Гридасов Я.А., Жабин И.В.
- Разработка единой информационной системы для всего контура управления цепочками поставок ретейл компании 157**
Емельянов В. А., Черный С. Г., Емельянова Н. Ю.
- Концептуальное моделирование процесса распределения квот на вылов водных биологических ресурсов 173**
Олейникова А. В.

Алгоритм автоматического подсчета рыб на изображении и слежения за их движением на основе нейронной модели YOLOv9t	187
<i>Ле В.Н.</i>	
Метод извлечения векторов движения в системах технического зрения, использующих сжатие с потерями	204
<i>Шальнев И. О., Аксенов А. Ю.</i>	
Математическая модель анализа данных запросов сервисного обслуживания и рекламаций предприятия	216
<i>Быкова А.В.</i>	
К сведению авторов	231

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

- Study of natural frequencies of a welded industrial fan impeller using the APM FEM software package 10**
Grigorov I. Yu., Kazakov D. Yu.

CONSTRUCTION

Original articles

- Seismic isolation of modular reinforced concrete buildings 23**
Popov A. Kh., Tarasov V. A.
- Investigation of combined heat recovery systems: analysis of the influence of operating parameters and geometric characteristics on the efficiency of heat recovery..... 38**
Yezhov V. S., Burtsev A. P.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

- Hybrid two-level method for automatic detection of face substitution in an image..... 53**
Haleev M. D.
- Choice of component bit width for nonlinear neuron implementation on FPGA 70**
Bondar O. G., Brezhneva E. O., Golubev D. A.
- Simulation of controlled motion of a spherical magnetically active object in an elastic channel 93**
Jatsun S. F., Malchikov A. V., Karaskov V. A.
- Reduction of digital filtering area in the residue number system based on truncated multiplication with accumulation blocks 111**
Lyakhov P. A.
- Application of Artificial Intelligence for Detecting Information-Technical Impacts..... 125**
Seliverstov D. E., Rusakov K. D.
- Simulation of wrist movement during Nordic walking 140**
Jatsun S. F., Polyakov V. A., Gridasov Y. A., Zhabin I. V.
- Development of a unified information system for the entire supply chain management circuit of a retail company 157**
Yemelyanov V. A., Chernyi S. G., Yemelyanova N. Y.
- Current state of the process of distribution of quotas for the extraction of aquatic biological resources 173**
Oleynikova A. V.

Algorithm for automatic counting of fish in an image and tracking their movement based on the YOLOv9t neural model	187
<i>Le V.N.</i>	
Motion vector extraction method for computer vision systems employing lossy compression	204
<i>Shalnev I.O., Aksenov A.Yu.</i>	
Mathematical model of data analysis of service requests and complaints at an enterprise	216
<i>Bykova A.V.</i>	
Information of the authors	231

УДК 621.795.75-52

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-10-22>



Исследование собственных частот сварной конструкции рабочего колеса промышленного вентилятора в программном комплексе APM FEM

И. Ю. Григоров ¹ ✉, Д. Ю. Казаков ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

Резюме

Целью исследования является получение числовых значений появления резонанса исследуемой конструкции и оценка влияния количества сварных швов на резонанс рабочего колеса промышленного вентилятора в программном комплексе APM FEM.

Методы. В данной статье используется расчет методом конечных элементов сварной конструкции рабочего колеса промышленного вентилятора в программном комплексе APM FEM для КОМПАС-3D v23.0.0.8. Конструкция моделировалась в программе КОМПАС V23, сварные швы конструкции по ГОСТ 14771–76-T3 смоделированы с помощью приложения «Неразъемные соединения». В местах расположения сварных швов применено преобразование швов в тело, для учета их при генерации сетки конечных элементов.

Результаты. На основании проведенного анализа можно утверждать, что конструкция обладает высоким запасом вибрационной устойчивости при номинальных нагрузках. Увеличение количества сварных швов с двух до четырех на каждую лопатку рабочего колеса промышленного вентилятора при проектировании конструкции, незначительно повышает значения появления резонанса. Таким образом, конструкция может быть рекомендована к изготовлению с минимальным количеством сварных швов, а именно по два на каждую лопатку.

Заключение. Проведенный анализ сварной конструкции рабочего колеса промышленного вентилятора с использованием программного комплекса APM FEM показал, что при исследовании на наличие собственных частот, конструкция сохраняет прочностную и геометрическую устойчивость, а полученные числовые значения появления резонанса сильно превышают значения, возможные при эксплуатации. Для варианта с двумя швами на лопатку собственные частоты пяти первых форм составили: 357,42; 363,01; 363,36; 365,73 и 367,13 Гц. Для варианта с четырьмя швами соответствующие частоты составили: 383,33; 391,77; 394,39; 396,63 и 397,18 Гц. Полученные числовые значения предполагаемого вхождения в резонанс соответствуют требованиям нормативных документов.

Ключевые слова: сварная конструкция; собственные частоты; резонанс; вибрационная устойчивость; программный комплекс APM FEM; рабочее колесо промышленного вентилятора.

© Григоров И. Ю., Казаков Д. Ю., 2025

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Григоров И. Ю., Казаков Д. Ю. Исследование собственных частот сварной конструкции рабочего колеса промышленного вентилятора в программном комплексе APM FEM // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 10-22. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-10-22>.

Поступила в редакцию 12.09.2025

Подписана в печать 28.10.2025

Опубликована 22.12.2025

Study of natural frequencies of a welded industrial fan impeller using the APM FEM software package

Igor Yu. Grigorov ¹✉, Danila Yu. Kazakov ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

Abstract

Purpose of the study is to obtain numerical values for the occurrence of resonance of the studied structure and to evaluate the influence of the number of welds on the resonance of the impeller of an industrial fan in the APM FEM software package.

Methods. This article uses the finite element method (FEM) analysis of a welded industrial fan impeller structure using the APM FEM software package for KOMPAS-3D v23.0.0.8. The structure was modeled using KOMPAS V23, and the welds were modeled using the "Permanent Joints" application in accordance with GOST 14771–76-T3. Weld-to-solid conversion was applied to the weld locations to account for them when generating the finite element mesh.

Results. Based on the analysis, it can be concluded that the design has a high vibration resistance margin under nominal loads. Increasing the number of welds from two to four per blade of the industrial fan impeller during design slightly increases the resonance risk. Therefore, the design can be recommended for manufacturing with a minimum number of welds, namely two per blade.

Conclusion. An analysis of the welded structure of an industrial fan impeller using the APM FEM software package showed that when examined for the presence of natural frequencies, the structure retains its strength and geometric stability, and the obtained numerical values of resonance occurrence significantly exceed the values possible during operation. For the variant with two welds per blade, the natural frequencies of the first five modes were 357.42; 363.01; 363.36; 365.73 and 367.13 Hz. For the variant with four welds, the corresponding frequencies were 383.33; 391.77; 394.39; 396.63 and 397.18 Hz. The obtained numerical values of the expected occurrence of resonance comply with the requirements of regulatory documents.

Keywords: welded structure; natural frequencies; resonance; vibration resistance; APM FEM software package; industrial fan impeller.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Grigorov I. Yu., Kazakov D.Yu. Study of natural frequencies of a welded industrial fan impeller using the APM FEM software package. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 10-22 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-10-22>.

Received 12.09.2025

Accepted 28.10.2025

Published 22.12.2025

Введение

Современные промышленные вентиляторы представляют собой сложные конструкции, работающие в условиях высоких динамических нагрузок и вибрационных воздействий. Одним из ключевых элементов, определяющих надёжность и долговечность таких машин, является рабочее колесо – узел, подверженный значительным нагрузкам в процессе эксплуатации. Эксплуатация рабочих колёс промышленных вентиляторов сопровождается воздействием переменных аэродинамических нагрузок и вибрационных колебаний, интенсивность которых определяется режимом вращения и конструктивными особенностями изделия. При этом одним из ключевых факторов, влияющих на надёжность и долговечность узла, является его вибрационная устойчивость. Важнейшей задачей на этапе проектирования и верификации конструкции колеса является оценка его вибрационной устойчивости, что особенно актуально для изделий, эксплуатируемых вблизи или в пределах потенциальных резонансных частот.

Одновременно с техническими требованиями на первый план выходит и производственная эффективность. При серийном изготовлении подобных узлов экономически важна оптимизация технологических операций – в частности, процессов сварки, как одного из ключевых способов соединения элементов конструкции. Использование автоматизирован-

ных и роботизированных сварочных комплексов, позиционеров и вращателей значительно повышает точность и повторяемость сварки, однако накладывает определенные издержки на число, расположение и протяжённость сварных швов. В этой связи особое значение приобретает обоснованный выбор компоновки швов, обеспечивающей не только достаточную прочность и жёсткость конструкции, но и соответствие требованиям производственного процесса.

Особое внимание уделяется выбору конструктивного варианта, оптимального с точки зрения вибрационной устойчивости и технологичности. В качестве основного критерия безопасности используется спектр собственных частот конструкции, рассчитываемый методом конечных элементов. В работах [1-4] описаны методы проведения подобных испытаний, однако малоизученным является вопрос об изменении собственных частот конструкции в целом, учитывая все сварные швы и их количество в конструкции. Собственные частоты конструкций подобного типа, являются одним из важнейших параметров при производстве и эксплуатации, что обуславливает большое количество научных исследований в этой области [5–11].

Объектом исследования выступает сварная конструкция рабочего колеса, включающая диск, лопаточный аппарат и элементы крепления, выполненные посредством сварных соединений [12-14]. Особое внимание уделяется методо-

логии сварки и рациональности конструкции, так как именно эти параметры в значительной мере определяют уровень динамических напряжений и вероятность возникновения резонансных явлений.

Конструкция рабочего колеса промышленного вентилятора представлена на рис. 1.

В условиях промышленной эксплуатации возможен широкий диапазон частот возбуждающих воздействий, что делает необходимым определение собственных частот рабочего колеса. Решение данной задачи позволяет выявить критические режимы работы и минимизировать риск разрушения конструкции [15-17].

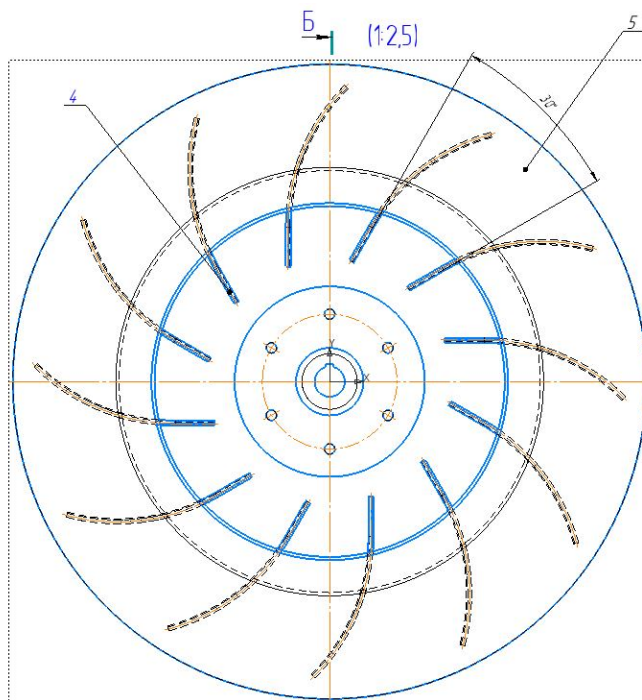


Рис. 1. Конструкция рабочего колеса промышленного вентилятора

Fig. 1. Industrial fan impeller design

Целью настоящего исследования является получение численных значений резонанса и оценка влияния конфигурации сварных швов на динамические характеристики рабочего колеса промышленного вентилятора.

Материалы и методы

Исследуемая конструкция представляет собой рабочее колесо промышленного вентилятора, включающее центральную ступицу, верхний и нижний диски, а также двенадцать лопаток, рав-

номерно распределённых по окружности. Конструкция выполнена из стали Ст3сп по ГОСТ 380–2005, обладающей механическими характеристиками, достаточными для работы в условиях умеренных механических и вибрационных нагрузок. Соединение элементов моделировалось сварными швами типа ТЗ по ГОСТ 14771–76, конфигурация которых варьировалась в зависимости от рассматриваемого варианта конструкции.

Моделирование конструкции проводилось в системе КОМПАС-3D V23 с

использованием приложения «Неразъёмные соединения». Для учёта геометрии сварных швов при генерации конечно-элементной сетки швы преобразовывались в твердотельные элементы. Анализ выполнялся методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе APM FEM для КОМПАС-3D (версия 23.0.0.8) с целью определения собственных частот конструкции и выявления потенциальных резонансных диапазонов, представляющих опасность при эксплуатации.

В рамках исследования рассматривались два варианта конструкции: лопатки с двумя продольными сварными швами, расположенными с одной стороны, и лопатки с четырьмя швами – по два с каждой стороны. Геометрическая модель во всех вариантах оставалась идентичной, изменения касались исключительно количества сварных швов.

Созданная трёхмерная модель конструкции рабочего колеса промышленного вентилятора показана на рис. 2.

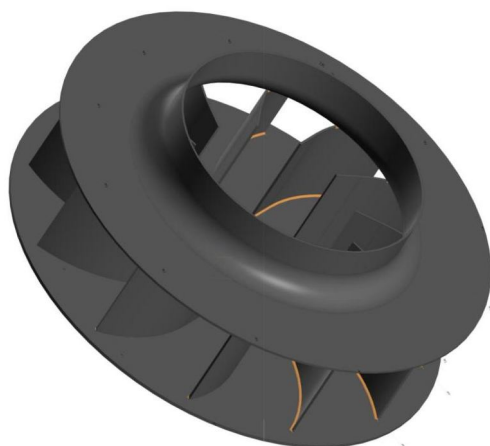


Рис. 2. Трёхмерная модель рабочего колеса промышленного вентилятора

Fig. 2. 3D model of an industrial fan impeller

Для дискретизации использовалась тетраэдральная конечно-элементная сетка 10-узловой типа с числом элементов более 110 000, что обеспечивало достаточную детализацию распределения масс и жёсткостей, включая зоны сварных соединений.

Граничные условия моделирования включали полное закрепление по трём степеням свободы на одной из граней ступицы и закрепление по нормали на противоположной грани, имитируя реальные условия крепления рабочего колеса на валу вентилятора. Для каждого варианта конструкции проводился модальный анализ – расчёт спектра собственных частот без внешнего возбуждения. Особое внимание уделялось первой и ближайшим формам колебаний, обладающим наибольшей вероятностью совпадения с рабочей частотой вращения вентилятора. В расчётах учитывались инерционные и геометрические характеристики всех элементов конструкции, включая зоны сварных соединений.

Закрепление модели – ограничение перемещения и вращения относительно координатных осей X, Y, Z показано на рис. 3.

Параметры сетки конечных элементов представлены в табл. 1.

Внешний вид сгенерированной сетки конечных элементов представлен на рис. 4.

В качестве материала для конструкции рабочего колеса промышленного вентилятора в приложении APM FEM для КОМПАС-3D v23.0.0.8 был принят материал, свойства которого приведены в табл. 2.

В рамках численного моделирования виброустойчивости рабочего колеса промышленного вентилятора были получены эпюры 5 форм собственных колебаний (рис. 5).

Числовые значения появления резонанса конструкции при исследовании собственными частотами в программном комплексе APM FEM приведены в табл. 3.

Таблица 1. Параметры сетки конечных элементов

Table 1. Finite element mesh parameters

Наименование параметра / Parameter Name	Значение параметра / Parameter value
Тип элементов	Твердотельные 10-узловые тетраэдры
Средняя длина стороны элемента, мм	40
Коэффициент сгущения на поверхности	1.2
Коэффициент разрежения в объеме	1.5
Количество конечных элементов	110887-113058
Количество узлов	223799-229394

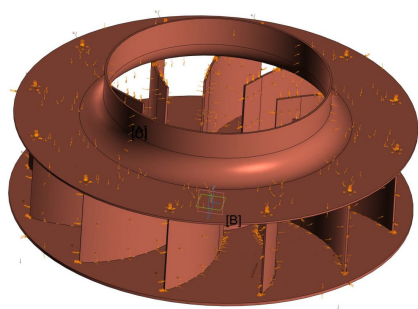


Рис. 3. Закрепление модели рабочего колеса промышленного вентилятора

Fig. 3. Fixing the industrial fan impeller model

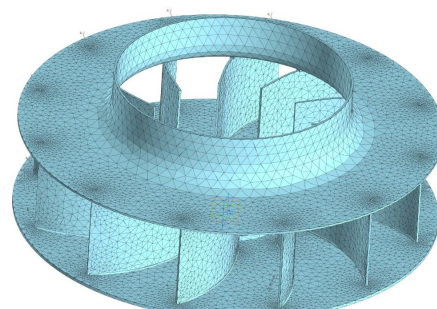


Рис. 4. Внешний вид сетки конечных элементов

Fig. 4. Finite element mesh appearance

Таблица 2. Свойства материала конструкции

Table 2. Properties of the construction material

Предел текучести, Н/мм ² / Yield strength, N/mm ²	235
Предел прочности при растяжении, Н/мм ²	410
Модуль упругости нормальный Н/мм ²	200000
Коэффициент Пуассона	0,3
Массовая плотность, кг/м ³	0.000008
Предел выносливости при растяжении, Н/мм ²	209
Предел выносливости при кручении, Н/мм ²	139
Удельная теплоемкость Дж/(кг*С°)	462
Теплопроводность Вт/(С°*мм)	0.055
Температурный коэффициент линейного расширения 1/ С°	0.000012

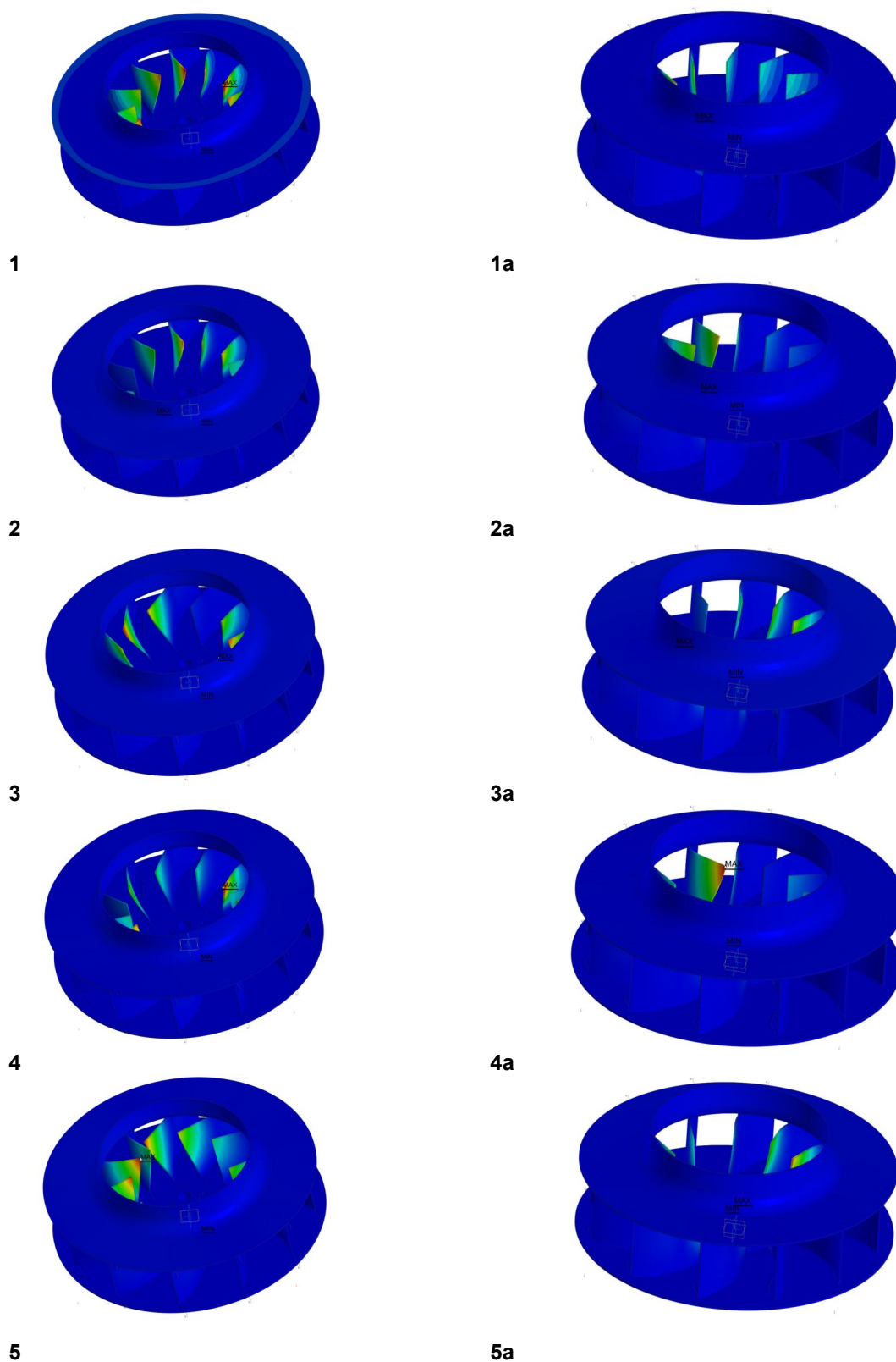


Рис. 5. Эпюры: 1-5 – формы собственных колебаний конфигурации конструкции по два шва на лопатку; 1a-5a – формы собственных колебаний конфигурации конструкции по четыре шва на лопатку

Fig. 5. Diagrams: 1-5 – natural vibration modes of the design configuration with two welds per blade; 1a-5a – natural vibration modes of the design configuration with four welds per blade

Таблица 3. Числовые значения появления резонанса конструкции**Table 3.** Numerical values of the occurrence of structural resonance

№	Частота (Гц) (2 шва) / Frequency (Hz) (2 seams)	Частота (Гц) (4 шва) / Frequency (Hz) (4 seams)
1	357.42	383.33
2	363.01	391.77
3	363.36	394.39
4	365.73	396.63
5	367.13	397.18

На рис. 5 приведены эпюры первых пяти форм собственных колебаний рабочего колеса вентилятора для двух вариантов схемы сварки лопаток. Эпюры 1–5 соответствуют варианту с двумя продольными швами на лопатку, эпюры 1а–5а – варианту с четырьмя швами. Для каждого варианта отображены зоны минимальных и максимальных перемещений элементов конструкции, полученные в результате модального анализа в программном комплексе APM FEM.

Для варианта с двумя швами на лопатку собственные частоты пяти первых форм составили 357,42; 363,01; 363,36; 365,73 и 367,13 Гц. Для варианта с четырьмя швами соответствующие частоты составили 383,33; 391,77; 394,39; 396,63 и 397,18 Гц. Наблюдается смещение спектра собственных частот в область более высоких значений при увеличении числа сварных соединений, что обусловлено ростом общей жёсткости конструкции. Полученные данные свидетельствуют о повышении виброустойчивости рабочего колеса при использовании четырёх швов на лопатку и снижении вероятности воз-

никновения резонансных колебаний при эксплуатации.

Результаты и их обсуждение

Проведённый модальный анализ позволил оценить влияние конфигурации сварных швов на динамические характеристики рабочего колеса промышленного вентилятора. В качестве основного параметра оценки использовалась первая собственная частота конструкции – критически важный показатель, характеризующий минимально возможную частоту возникновения резонансных колебаний¹.

В варианте конструкции с двумя сварными швами на одну сторону каждой лопатки (далее – упрощённая схема) первая собственная частота составила 357.4 Гц, при этом вторая и третья модальные формы – 363.0 Гц и 363.4 Гц

¹ ГОСТ 30630.1.1-99/ Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий, М., 1999; ГОСТ 31350–2007 (ИСО 14694:2003) / Вибрация. Вентиляторы промышленные. Требования к производимой вибрации и качеству балансировки. М., 2007.

соответственно. Диапазон первых пяти форм колебаний находился в пределах 357.4–367.1 Гц, что гарантирует высокий запас по вибрационной устойчивости при реальной рабочей частоте вращения вентилятора 25–33 Гц (соответствующей 1500–2000 об/мин).

В варианте с четырьмя сварными швами на каждую лопатку (по два с каждой стороны) наблюдался рост первой частоты до 383.3 Гц, а верхняя граница первых пяти форм достигала 397.2 Гц. Несмотря на это повышение, относительное увеличение первой частоты составило около 7,2 %, что в инженерной практике не считается существенным при наличии более чем десятикратного запаса по частотам. Повышение жёсткости конструкции, обусловленное симметричным усилением соединений, дало линейный, но не значительный прирост модальных характеристик.

Изменение спектра собственных колебаний сопровождалось и увеличением сложности модальных форм. Так, во втором варианте наблюдаются выраженные локальные формы колебаний в зонах сопряжения швов и лопаток, что указывает на перераспределение жесткостных акцентов конструкции. Однако, как показал численный анализ, концентрация модальной энергии остаётся преимущественно в пределах ступицы и крепления лопаток, а не в зоне сварных швов, что подтверждает надёжность соединений даже при упрощённой схеме.

С точки зрения производства, упрощённая схема является предпочтитель-

ной. При выполнении двух продольных швов с одной стороны на каждой лопатке общее количество сварных операций снижается в два раза. Таким образом, несмотря на наблюдаемый прирост частот в случае четырёх швов, конструкция с двумя сварными соединениями на лопатку показывает полную вибрационную безопасность (первая частота более чем в 10 раз превышает максимальную рабочую), оставаясь при этом производственно эффективной. С инженерной и технологической точек зрения, такой вариант конструкции следует считать оптимальным.

Выводы

На основании результатов модального анализа установлено, что конфигурация сварных швов оказывает заметное влияние на динамическое поведение рабочего колеса промышленного вентилятора. В частности, увеличение количества сварных соединений на каждой лопатке приводит к росту первой собственной частоты конструкции, что связано с повышением её общей жёсткости и перераспределением модальных форм.

Для варианта с двумя продольными сварными швами на одну сторону лопатки первая собственная частота составила 357.4 Гц, в то время как для конфигурации с четырьмя швами (по два с каждой стороны) этот показатель достиг 383.3 Гц. Несмотря на различие в частотах, в обоих случаях значения значительно превышают рабочий диа-

пазон возбуждающих частот при эксплуатации похожих изделий, что свидетельствует об отсутствии риска резонансных явлений в реальных условиях эксплуатации.

Результаты исследования подтверждают, что при проектировании сварных вращающихся конструкций необходимо учитывать влияние конфигурации соединений на модальный спектр. Даже при сохранении общей геометрии изделия изменение топологии сварки способно приводить к смещению собственных частот и трансформации форм колебаний, что должно быть учтено на

стадии конструкторской проработки и расчётной верификации. Метод конечных элементов в комплексе АРМ FEM показал высокую эффективность для анализа подобных задач и может быть рекомендован для оценки динамической надёжности сварных конструкций в машиностроении.

Учитывая вышеизложенное, сварную конструкцию рабочего колеса промышленного вентилятора с двумя сварными швами на каждую лопатку, можно считать устойчивой к возникновению резонанса.

Список литературы

1. Котельников А.А., Григоров И.Ю., Гречухин А.Н. Математическое моделирование в сварочном производстве. Курск, 2024.
2. Григоров И. Ю. Исследование прочности сварной конструкции «промышленный счетчик газа» при нагружении внутренним статическим давлением в программном комплексе АРМ FEM // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025. Т. 29, № 2. С. 8-23. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-8-23>.
3. Котельников А.А., Натаров А.С. Исследование распределения напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 23, № 4. С. 19–30.
4. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов в расчётах сварных конструкций. Курск, 2014. 125 с. EDN: SDMWBD
5. Фирсанов В.В., Макаров П.В. Особенности расчёта собственных частот и форм колебаний рабочих колёс компрессоров газотурбинного двигателя применительно к решению задачи флаттера // Труды МАИ. 2012. №55. С. 1–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-rascheta-sobstvennyh-chastot-i-form-kolebaniy-rabochih-koles-kompressorov-gazoturbinnogo-dvigatelya-primenitelno-k>
6. Ефимик В.А., Михайлов А.П., Сухоруков А.В. Применение расчётно-экспериментальной методики проектирования многослойных конструкций с трубчатым наполнителем // Проблемы прочности и пластичности. 2023. Т. 85, № 2. С. 45–56.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-raschetno-eksperimentalnoy-metodiki-proektirovaniya-mnogosloynnyh-konstruktsiy-s-trubchatym-zapolnitelem>

7. Мокин Н. А., Кустов А. А., Ганджунцев М. И. Численное исследование естественной частоты и колебаний форм воздухоопорных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-sobstvennyh-chastot-i-form-kolebaniy-vozduhoopornyyh-sooruzheniy>.

8. Comparative analysis of strength and modal characteristics of a full tubular pump and an axial flow pump impellers based on fluid–structure interaction / L. Shi, J. Zhu, L. Wang, S. Chu, F. Tang, Y. Jin // *Energies*. 2021; 14(19): 6395. <https://doi.org/10.3390/en14196395>

9. Vibration analysis of a high-pressure multistage centrifugal pump / Y. Zhang, J. Liu, X. Yang, H. Li, S. Chen, W. Lv, W. Xu, J. Zheng, D. Wang // *Scientific Reports*. 2022; 12: 20293. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22605-2>

10. Improved calculation method for dry modal analysis of four-stage centrifugal pump with corrected stiffness and inertia / J. Li, J. Chen, H. Zhang, F. Wang // *PLOS ONE*. 2024; 19(4): e0306061. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306061>

11. Lima D.Z., Costa E., Mucheroni M. Modal analysis and structural optimization of integrated impeller/rotor components for centrifugal compressors // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2024; 67(6): 1235–1249. <https://doi.org/10.1007/s00158-024-03746-6>

12. Jasim H., Al-Obaidi A., Kadhum A. Experimental and FEM vibration analysis of impellers used for water pump // *International Journal of Engineering and Applied Physics*. 2023; 5(3): 45–52. URL: <https://ijeap.org/ijeap/article/view/134>

13. Chi J. Optimization of vane pump structure based on modal characteristic analysis // *Extrica*. 2023; (спецвыпуск) 23692: 1–10. URL: <https://www.extrica.com/article/23692> Extrica

14. Wang W., et al. Investigation on pressure pulsation and modal behavior of full-scale RCP impeller // *Environmental Systems Engineering*. 2021; (естественный журнал Wiley) 3: e904. <https://doi.org/10.1002/ese3.904>

15. Radgolchin M., Anbarsooz M. Investigating the effects of shroud and blade thickness profiles on aeromechanical behavior and fatigue life of 17-4PH impellers // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023; (Article 104948): 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104948>

16. Vibration characteristics analysis and structural optimization of a volute-less centrifugal fan frame / L. Zhou, K. Liang, D. Zheng, C. Wang, M. Li, T. He, L. Guo, L. Zheng // *Applied Sciences*. 2025; 15(9): 5069. <https://doi.org/10.3390/app15095069>

17. Hatami Garousi M., Karimi M. A novel modal analysis approach for impellers combining test data and FEM // *IRJMETS*. 2024; 12(12): 65466. <https://doi.org/10.56726/IRJMETS65466>

References

1. Kotelnikov A.A., Grigorov I.Yu., Grechukhin A.N. Mathematical modeling in welding production. Kursk, 2024. (In Russ.).
2. Grigorov I. Yu. Study of the strength of the welded structure "industrial gas meter" under loading with internal static pressure in the APM FEM software package. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 8-23 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-8-23>.
3. Kotelnikov A.A., Natarov A.S. Study of the distribution of stresses arising under loading in welded joints using the finite element method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2019; 23(4): 19–30. (In Russ.).
4. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. Application of the finite element method in calculations of welded structures.. Kursk: Southwest State University; 2014. 125 p. (In Russ.). EDN: SDMWBD
5. Firsanov V.V., Makarov P.V. Features of calculating natural frequencies and vibration modes of impellers of gas-turbine engine compressors as applied to solving the flutter problem. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2012; (55): 1–15. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-rascheta-sobstvennyh-chastot-i-form-kolebaniy-rabochih-koles-kompressorov-gazoturbinnogo-dvigatelya-primenitelno-k>
6. Efimik V.A., Mikhailov A.P., Sukhorukov A.V. Application of the calculation and experimental methodology for designing multilayer structures with a tubular filler. *Problemy prochnosti i plastichnosti = Problems of Strength and Plasticity*. 2023; 85(2): 45–56. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-raschetno-eksperimentalnoy-metodiki-proektirovaniya-mnogosloynnyh-konstruktsiy-s-trubchatym-zapolnitelem>
7. Mokin N. A., Kustov A. A., Gandzhuntsev M. I. Numerical study of the natural frequency and oscillations of air-supported structures. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsii i sooruzhenii = Structural mechanics of engineering structures and buildings*. 2018; (4). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-sobstvennyh-chastot-i-form-kolebaniy-vozduhopornyyh-sooruzheniy>.
8. Shi L., Zhu J., Wang L., Chu S., Tang F., Jin Y. Comparative analysis of strength and modal characteristics of a full tubular pump and an axial flow pump impellers based on fluid–structure interaction. *Energies*. 2021; 14(19): 6395. <https://doi.org/10.3390/en14196395>
9. Zhang Y., Liu J., Yang X., Li H., Chen S., Lv W., Xu W., Zheng J., Wang D. Vibration analysis of a high-pressure multistage centrifugal pump. *Scientific Reports*. 2022; 12: 20293. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22605-2>
10. Li J., Chen J., Zhang H., Wang F. Improved calculation method for dry modal analysis of four-stage centrifugal pump with corrected stiffness and inertia. *PLOS ONE*. 2024; 19(4): e0306061. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306061>

11. Lima D.Z., Costa E., Mucheroni M. Modal analysis and structural optimization of integrated impeller/rotor components for centrifugal compressors. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2024; 67(6): 1235–1249. <https://doi.org/10.1007/s00158-024-03746-6>
12. Jasim H., Al-Obaidi A., Kadhum A. Experimental and FEM vibration analysis of impellers used for water pump. *International Journal of Engineering and Applied Physics*. 2023; 5(3): 45–52. Available at: <https://ijeap.org/ijeap/article/view/134>
13. Chi J. Optimization of vane pump structure based on modal characteristic analysis. *Extrica*. 2023; 23692: 1–10. Available at: <https://www.extrica.com/article/23692> Extrica
14. Wang W., et al. Investigation on pressure pulsation and modal behavior of full-scale RCP impeller. *Environmental Systems Engineering*. 2021; 3: e904. <https://doi.org/10.1002/ese3.904>
15. Radgolchin M., Anbarsooz M. Investigating the effects of shroud and blade thickness profiles on aeromechanical behavior and fatigue life of 17-4PH impellers. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023; (Article 104948): 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104948>
16. Zhou L., Liang K., Zheng D., Wang C., Li M., He T., Guo L., Zheng L. Vibration characteristics analysis and structural optimization of a volute-less centrifugal fan frame. *Applied Sciences*. 2025; 15(9): 5069. <https://doi.org/10.3390/app15095069>
17. Hatami Garousi M., Karimi M. A novel modal analysis approach for impellers combining test data and FEM. *IRJMETs*. 2024; 12(12): 65466. <https://doi.org/10.56726/IRJMETs65466>

Информация об авторах / Information about the Authors

Григорьев Игорь Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6207-8194>

Igor Yu. Grigorov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Mechanical Engineering Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>

Казakov Данила Юрьевич, магистрант, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Danilakazakov28@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4326-8021>

Danila Yu. Kazakov, Master Student, Mechanical Engineering Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Danilakazakov28@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4326-8021>

УДК 699.841

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-23-37>



Сейсмоизоляция модульных железобетонных зданий

А.Х. Попов ¹, В.А. Тарасов ¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)
ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург 195251, Российская Федерация

✉ e-mail: vtarasov1000@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является разработка конструктивного решения, обеспечивающего сейсмостойкость модульного здания в районе с сейсмичностью 9 баллов по шкале MSK-64.

Методы. В исследовании используется конечно-элементная расчетная модель здания со ствольной-модульной конструктивной системой с железобетонными модулями. Для анализа применяются численные методы с использованием конечно-элементной модели в ANSYS, SCAD. В комплексе SCAD создана единая расчетная модель всего здания, включающая монолитную часть, модульную часть и соединения между модулями. Межмодульные соединения моделировались специальными элементами с конечной жесткостью. Жесткость межмодульных соединений была определена с помощью конечно-элементной модели из объемных элементов в комплексе ANSYS, по этой же модели анализировались напряжения в соединениях. Учитывались все нагрузки нормальной эксплуатации здания, а также сейсмическая нагрузка по действующим нормам РФ для г. Владикавказ. Рассматривалось линейное упругое поведение материала конструкций. В ходе расчетов исследуются интенсивность армирования в несущих конструкциях здания, распределение напряжений в самом нагруженном межмодульном соединении.

Результаты. Результаты расчетов показывают, что применение сейсмоизоляции значительно уменьшает влияние сейсмического воздействия на здание, снижая интенсивность армирования до 55% (более чем в 2 раза) в монолитной части и до 60% – в модульной части по сравнению с аналогичным зданием без системы сейсмоизоляции. Так же была предложена конструкция усиленного межмодульного соединения, использование которой обеспечивает выполнение условий прочности при сейсмическом воздействии.

Заключение. Исследование качественно показало, что использование системы сейсмоизоляции позволяет достичь необходимого уровня сейсмостойкости модульных железобетонных зданий без изменения типовых конструктивных решений модулей. Данное исследование имеет важную практическую пользу, которая заключается в подготовке расчетной базы для строительства зданий из железобетонных модулей в сейсмоактивных районах. На следующих этапах исследования необходимо учесть возможность работы межмодульных соединений за пределами упругости, а также учесть существенно нелинейное поведение слайдерных сейсмоизоляторов для получения более корректной количественной оценки результатов сейсмических расчетов сейсмоизолированного модульного здания.

Ключевые слова: модульное здание; сейсмоизоляция; сборная железобетонная конструкция; сейсмическое воздействие; динамический расчёт; интенсивность армирования.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Попов А.Х., Тарасов В.А. Сейсмоизоляция модульных железобетонных зданий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 23-37. [https://doi.org/ 10.21869/ 10.21869/-2223-1560-2025-29-4-23-37](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-23-37).

Поступила в редакцию 18.07.2025

Подписана в печать 03.09.2025

Опубликована 22.12.2025

Seismic isolation of modular reinforced concrete buildings

Andrey Kh. Popov ¹, Vladimir A. Tarasov ¹ ✉

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)
29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg 195251, Russian Federation

✉ e-mail: vtarasov1000@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of this research is to develop a constructive solution that ensures the earthquake resistance of a modular building in an area with a seismicity of 9 points on the MSK-64 scale.

Methods. The research uses a FEM computational model of a building with a modular structural system with reinforced concrete modules. Numerical analysis was performed using finite element modeling (FEM) in ANSYS and SCAD. A single computational model of the entire building was developed in SCAD, incorporating the monolithic part, modular part, and inter-module connections. The inter-module connections were modeled using special finite-stiffness elements. The stiffness of inter-module connections was determined through a 3D finite element model in ANSYS, which was also used to analyze stress distribution in the connections. The model accounted for all operational loads. In addition seismic loads were used, in compliance with valid Russian design codes for Vladikavkaz. The analysis assumed linear elastic material behavior for all structural components. During the calculations, the intensity of reinforcement in the building's load-bearing structures and the stress distribution in the most loaded inter-module joint are investigated.

Results. The calculation results show that the use of seismic insulation significantly reduces the impact of seismic effects on the building, reducing the intensity of reinforcement to 55% (by more than 2 times) in the monolithic part and up to 60% in the modular part compared to a similar building without a seismic insulation system. Additionally, a reinforced inter-module connection design was proposed, which ensures compliance with strength requirements under seismic loading.

Conclusion. This study demonstrates that the required level of earthquake resistance is achieved because of the use of a seismic insulation system, thus, constructive solutions can be preserved. This study has an important practical benefit, which consists in preparing the calculation base for the construction of prefabricated modular reinforced concrete buildings in seismic areas. In subsequent research phases, it is necessary to account for the post-elastic behavior of inter-module connections, and the strongly nonlinear response of sliding seismic isolators. This will enable more accurate quantitative assessment of seismic performance calculations for modular buildings with base isolation systems.

Keywords: modular building; seismic isolation; prefabricated reinforced concrete structure; seismic impact; dynamic analysis; reinforcement intensity.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Popov A. Kh., Tarasov V. A. Seismic isolation of modular reinforced concrete buildings. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 23-37 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-23-37>.

Received 18.07.2025

Accepted 03.09.2025

Published 22.12.2025

Введение

В качестве объекта исследования принято 10-этажное жилое здание. В качестве конструктивной системы здания была выбрана ствольно-модульная конструктивная система. Материал модулей – железобетон. В ствольно-модульной конструктивной системе ствол (или ядро жёсткости) играет важную роль в пространственной устойчивости конструкции, а также в объёмно-планировочных решениях, так как в нём размещаются лестницы, лифты и вертикальные коммуникации. Вокруг ствола устанавливаются объёмные железобетонные модули. Рассматриваемое здание условно можно разделить на две части: модульную и монолитную. В монолитную часть здания входят: подземный этаж, первый этаж, лестнично-лифтовой узел. К модульной части относятся железобетонные модули, которые имеют соединения между собой в виде специальных стальных межмодульных соединений.

В современном мире модульное строительство становится более востребованным. В мегаполисах, в крупных городах проводится реновация жилых кварталов, застроенных в период 60-80-х годов прошлого века панельными зданиями, срок эксплуатации которых истёк.

В процессе реновации возводят современные модульные здания. При этом реновация крупных жилых массивов имеет обоснованную экономическую эффективность. На сегодняшний день наблюдается значительный рост строительства сборных зданий.

Существует множество научных исследований, которые посвящены конструктивным решениям и расчётам модульных зданий. Расчёты на сейсмическое воздействие модульных зданий рассматриваются в научных статьях [1-9] зарубежных авторов, но отечественных исследований по данной тематике проведено не было. Согласно статье [10] показано, что отсутствуют нормативные документы, регламентирующие методику расчёта модульных зданий. Перспективы строительства модульных зданий были рассмотрены в следующих статьях [11-13]. Важным аспектом при проектировании модульных зданий является соединения между модулями и внутримодульные соединения, поэтому теме модульных соединений посвящено множество научных работ, в том числе следующие статьи [14-20]. Исследования, связанные с моделированием модульных зданий освещены широким кругом работ [19-25].

Цель исследования – предложить конструктивное решение, обеспечивающее сейсмостойкость модульного здания в районе с сейсмичностью 9 баллов по шкале MSK-64.

Задачи исследования:

1. Выполнить прочностной расчёт модульного здания с учётом сейсмического воздействия без использования систем сейсмоизоляции.
2. Предложить различные системы сейсмоизоляции и провести расчётные обоснования сейсмостойкости модульного здания с сейсмоизоляцией.
3. Оценить влияние различных систем сейсмоизоляции на интенсивность армирования модульного здания.
4. Выполнить расчёт самого нагруженного межмодульного соединения, предложить вариант конструктивного усиления.

Объект исследования: 10-этажное здание со ствольно-модульной конструктивной системой.

Предмет исследования: методы повышения уровня сейсмостойкости модульных зданий.

Актуальность: система сейсмоизоляции позволяет достичь требуемого уровня сейсмостойкости здания при сохранении его конструктивных решений. Принцип строительства зданий из сборных железобетонных модулей заключается в типизации конструктивных решений. Однако сейсмическое воздействие вызывает многократное увеличение нагрузки на здание, что не позволяет использовать типовую конфигурацию мо-

дулей. Выявлено отсутствие отечественной нормативной базы, которая описывала и регулировала бы методику и принцип расчёта зданий данного типа.

Материалы и методы

Методы исследования – проведение вычислительных экспериментов (численное моделирование с последующим расчётом). Было выдвинуто предположение о том, что активная сейсмоизоляция в виде слайдерных сейсмоизолирующих опор позволит снизить интенсивность армирования в сборных панелях, из которых состоят железобетонные модули. Значения интенсивности армирования в расчётной схеме с использованием сейсмоизоляторов должно быть такими, чтобы каждый элемент расчётной схемы мог быть заармирован по нормам соответствующего свода правил.

Использовались аттестованные и апробированные расчётные комплексы SCAD версии 21, реализующий метод конечных элементов для задач строительного проектирования, и ANSYS, реализующий метод конечных элементов для решения общих задач механики деформируемого тела. Обоснованность результатов обеспечивается использованием общепринятых допущений строительной механики, теории упругости и динамики сооружений, теории сейсмостойкости, а также апробированные исследования других авторов по данному направлению.

В табл. 1 включены основные данные относительно объекта исследова-

ния, которые приняты в качестве исходных данных.

На рис. 1 показаны монолитные конструкции здания. На рис. 2 изображена модульная часть здания.

В качестве соединений модулей были использованы специальные соединения, выполненные из стали марки С440. Были включены в расчётную модель вертикальные и горизонтальные межмодульные соединения.

Нагрузка с вышележащих модулей передаётся на нижележащие через верти-

кальные соединения, которые представляют собой двутавры с рёбрами жёсткости, располагающимися по всей длине соединения. 3д вид вертикального межмодульного соединения представлен на рис. 3.

Следующим этапом была вычислена жёсткость данного соединения. В программном комплексе ANSYS была создана модель соединения из объёмных конечных элементов. После проведения расчёта были получены 6 значений жёсткостей в различных направлениях.

Таблица 1. Основные характеристики объекта исследования

Table 1. Main characteristics of the object of research

	Параметр / Parameter	Описание / Description	Примечание / Note
1	Местоположение объекта строительства	г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания	—
2	Расчётная сейсмичность	9 баллов	В соответствии с картой ОСП-2015-В СП14.13330.2018
3	Конструктивная система	Ствольно-модульная	Ствол обеспечивает дополнительную горизонтальную жёсткость, что приводит к увеличению устойчивости здания к воздействию горизонтальных нагрузок
4	Элементы из монолитного ж/б	Фундаментная плита, конструкции подземного этажа, конструкции первого этажа, лестнично-лифтовой узел, выход на кровлю	Пространственная жесткость обеспечивается жестким соединением элементов между собой, а также жёсткостью самих элементов
5	Элементы из сборного ж/б	Конструкции типовых этажей, парапеты	Сборные элементы имеют специальные межмодульные соединения

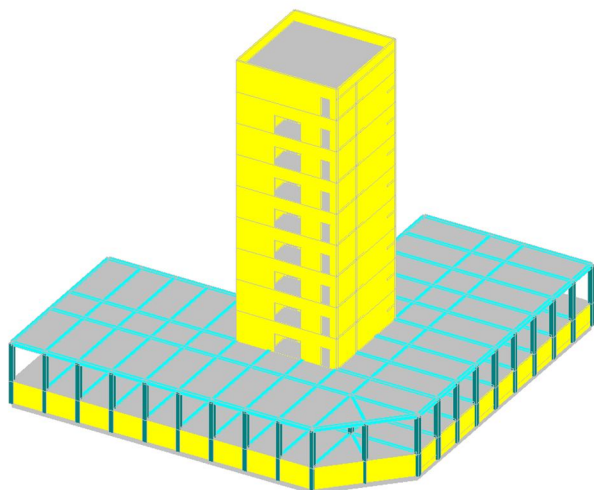


Рис. 1. Монолитная часть здания

Fig. 1. Monolithic part of the building

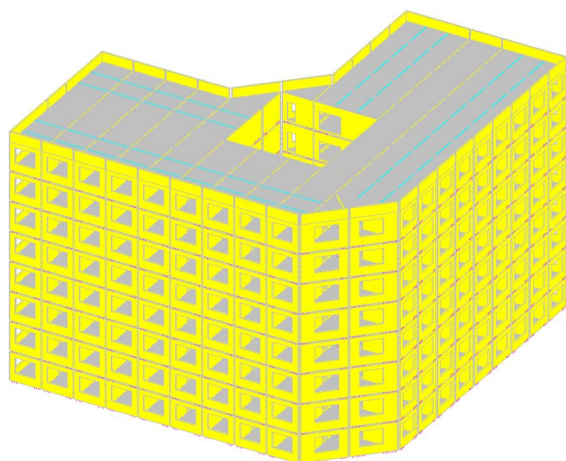


Рис. 2. Модульная часть здания

Fig. 2. Modular part of the building

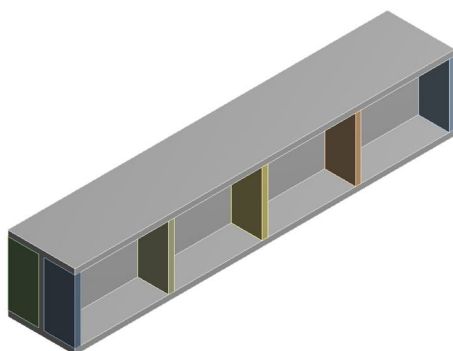


Рис. 3. 3д вид вертикального соединения модулей

Fig. 3. 3d view of the vertical connection in prefabricated modules

Общий вид типовых модулей рассчитываемого здания приведён на рис. 4.

Общий вид рассчитываемого здания приведён на рис. 5.

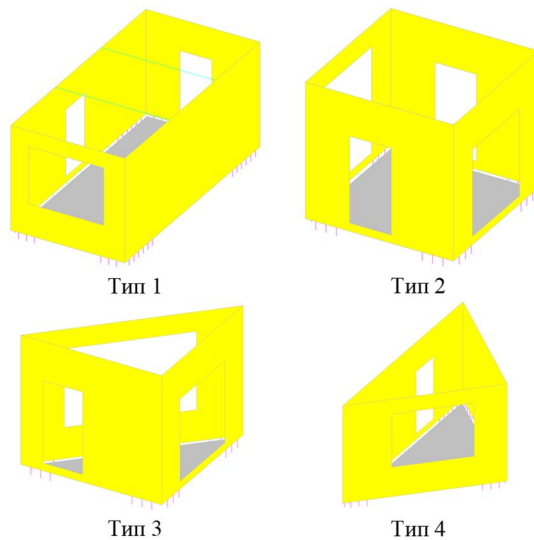


Рис. 4. 3д вид типовых модулей в расчётной модели

Fig. 4. 3d view of standard modules in structural analysis model

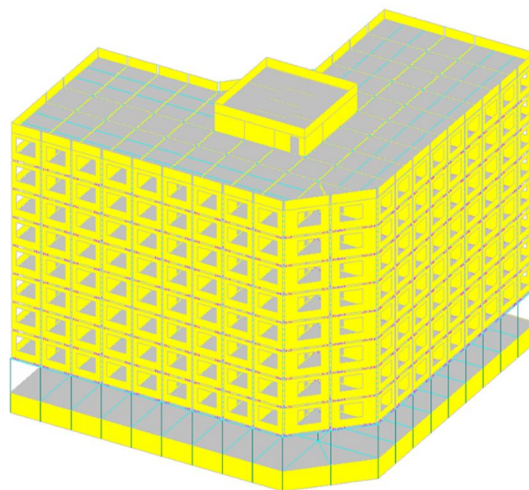


Рис. 5. Общий вид здания

Fig. 5. General view of the building

Сейсмоизоляторы размещаются на дополнительной фундаментной плите. Под опорами устраиваются специальные железобетонные постаменты, которые передают нагрузку с сейсмоизолятора на дополнительную фундаментную

плиту. Для определения необходимого количества сейсмоизоляторов, а также для обеспечения равномерной осадки здания (для пружинных элементов) производится специальный расчёт. Исходными данными для данного расчёта являются жёсткостные характеристики используемых сейсмоизоляционных опор, вес конструкций, располагающихся выше сейсмоизоляторов. Применение сейсмоизоляционных опор с низкой жёсткостью в горизонтальных направлениях приводит к снижению частот низших форм колебаний, смещая их из пика сейсмического спектра, в то время как применение вязких демпферов или сухого трения в опорах приводит к увеличению затуханий в слое сейсмоизоляции. Таким образом, уменьшаются амплитуды колебаний.

В работе рассмотрены 4 расчётные модели здания, в которых приняты одинаковые геометрические и жесткостные характеристики монолитных и модульных конструкций:

- Модель №1 – Модель без сейсмоизоляции;
- Модель №2 – Модель с пружинно-демпферной сейсмоизоляцией;
- Модель №3 – Модель со слайдерной сейсмоизоляцией;
- Модель №4 – Модель со слайдерной сейсмоизоляцией и межмодульными соединениями повышенной жесткости.

Результаты и их обсуждение

После проведения вычислительных экспериментов с моделями №1,2 и 3 бы-

ли получены изополя армирования конструкций, максимальные значения которых представлены в табл. 2. Значения усилий в специальных конечных элементах выражены в тоннах силы. Значения усилий представлены для самого нагруженного соединения.

Как видно из табл. 2, использование как пружинно-демпферной, так и слайдерной системы сейсмоизоляции привело к уменьшению расчётного армирования во всех конструкциях моделей.

Однако в расчётной модели с пружинно-демпферной системой сейсмоизоляции (модель №2) расчётное армирование не было снижено в достаточной степени. Значительное снижение армирования было достигнуто в монолитных конструкциях здания: армирование в монолитном железобетонном фундаменте сократилось на 40%, в вертикальных конструкциях подвала на 25%, в стенах лестнично-лифтового узла на 30%. В то же время, в сборных конструкциях модулей расчётное армирование снизилось незначительно: в стенах модулей армирование сократилось на 20%, в сборных плитах типовых модулей на 14%. В сборных вертикальных панелях модулей присутствуют элементы, в которых подбор арматуры не был произведён. То есть, условие прочности данных элементов не было выполнено. Усилия в специальных конечных элементах, с помощью которых были замоделированы стальные соединения модулей, снизились лишь на 13% (по направлению X).

Таблица 2. Сравнительный анализ результатов расчётов армирования железобетонных конструкций и прочности стальных соединений для моделей №1, №2, №3

Table 2. Comparative analysis of the calculation results for reinforcement in reinforced concrete structures and strength of steel joints in models №1, №2, №3

Вид армирования / Type of reinforcement	Модель №1 / Model No. 1	Модель №2 / Model No. 2	Модель №3 / Model No. 3	Разница между моделями №1 и №2, % / Difference between models No. 1 and No. 2, %	Разница между моделями №1 и №3, % / Difference between models No. 1 and No. 3, %
Расчётное армирование, см ² /м / Железобетонная монолитная фундаментная плита					
AS1	45,4	25,8	20,2	43,2	55,6
AS2	45,8	29,8	20,3	35,0	55,6
AS3	40,5	24,5	18,8	39,6	53,5
AS4	46,4	31,7	22,5	31,6	51,4
Расчётное армирование, см ² /м / Стены лестнично-лифтового узла					
AS1	13,2	9,9	8,0	25,3	39,6
AS2	26,6	20,4	16,5	23,5	37,9
AS3	12,2	8,6	6,8	29,6	44,6
AS4	26,3	19,0	16,1	27,5	38,7
Расчётное армирование, см ² /м Стены типовых модулей нижнего этажа					
AS1	9,9	8,2	2,8	17,1	72,0
AS2	29,4	24,6	7,2	16,1	75,4
AS3	7,6	6,1	2,5	19,9	67,1
AS4	22,8	19,0	7,0	16,6	69,3
Расчётное армирование, см ² /м / Плиты типовых модулей					
AS1	3,7	3,4	2,2	8,6	40,3
AS2	3,8	3,2	1,9	13,9	49,3
AS3	3,2	3,2	2,8	0,0	31,8
AS4	3,4	3,4	1,9	0,6	45,3
Внутренние усилия в стальных соединениях модулей, тс					
R _x	61,8	53,6	28,9	13,2	53,2
R _y	57,5	56,2	26,3	2,2	54,2
R _z	216,6	134,2	191,0	38,0	11,8

Условие прочности для стальных межмодульных соединений не удовлетворено. Можно сделать вывод, что пружинно-демпферная система сейсмоизоляции не позволила в достаточной степени сократить расчётное армирование и уменьшить значения усилий в стальных межмодульных соединениях.

Результаты расчёта модели №3 демонстрируют значительное снижение армирования благодаря внедрённой в структуру здания слоя сейсмоизоляции со слайдерными опорами. Слайдерные сейсмоизоляторы оказались более эффективными, позволили значительно снизить расчётное армирование в монолитной и в модульной частях здания. В фундаментной плите применение сейсмоизоляции привело к снижению интенсивности армирования на 55% (более чем в 2 раза), в вертикальных конструкциях подвала – на 50% (в 2 раза), в лестнично-лифтовом узле на 45%. В стеновых панелях модулей армирование сократилось на 75% (более чем в 3 раза), в сборных типовых плитах – на 49% (армирование AS2).

Подбор армирования был выполнен для 100% элементов модели. Результаты интенсивности армирования наглядно показали, что при применении слайдерных опор в качестве системы сейсмоизоляции можно сохранить типовые конструктивные решения модулей. Монолитные конструкции здания также не требуют изменений.

Значения усилий в стальных межмодульных соединениях в горизонтальных направлениях X, Y уменьшились более чем в 2 раза (53% в направлении X, 54% в направлении Y). Однако усилия в вертикальном направлении Z уменьшились только на 12%. То есть, слайдерные опоры неэффективно изолируют здание в вертикальном направлении. Данное явление объясняется тем, что слайдерные сейсмоизоляторы имеют большую вертикальную жёсткость, в связи с этим, сложно добиться снижения усилий в вертикальном направлении. В межмодульном соединении условие прочности не обеспечено. Чтобы условие прочности было обеспечено, необходимо изменить конструкцию соединения.

Были внесены изменения в конструкцию межмодульного соединения. Были добавлены дополнительные рёбра жёсткости. Геометрия изменённого соединения представлена на рис. 6.

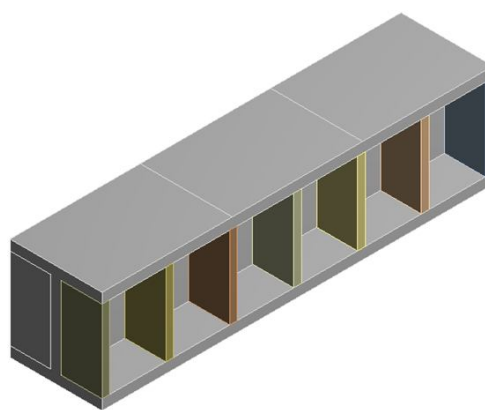


Рис. 6. 3д вид межмодульного соединения с дополнительными рёбрами жёсткости

Fig. 6. 3d view of the inter-module connection with additional stiffeners

Распределение напряжений в самом нагруженном стальном межмодульном соединении представлено на рис. 7. На соединение были приложены нагрузки из расчёта модели №3.

По данным результата расчёта были зафиксированы максимальные напряжения: $\sigma_{max} = 4,250 \cdot 10^8 \text{ Па} = 425 \text{ МПа}$. Наи-

большее значение напряжений не превышает расчётное сопротивление стали С440, которая была задана для стальных соединений в модели №1. Таким образом, введя дополнительные рёбра жёсткости, получилось удовлетворить условие прочности для самого нагруженного межмодульного соединения.

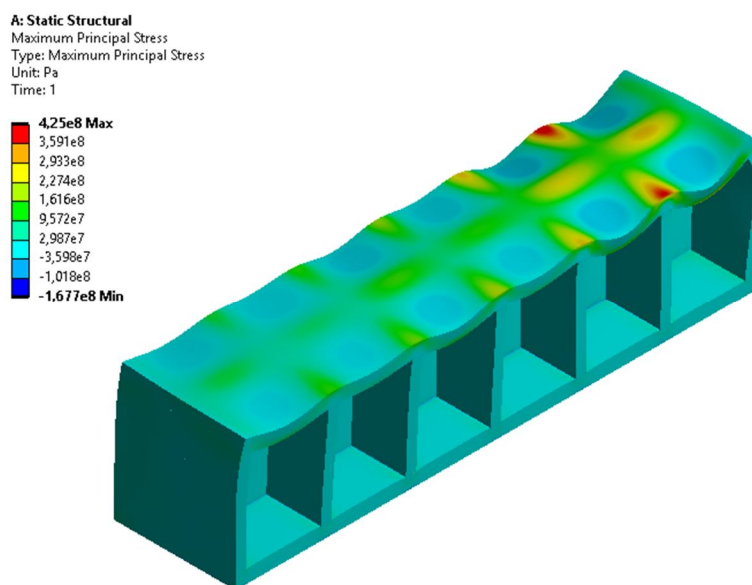


Рис. 7. Распределение напряжений в межмодульном соединении с дополнительными рёбрами жёсткости

Fig. 7. Stress distribution in the inter-module connection with additional stiffeners

В связи с изменением конструкции межмодульных соединений изменилась их жёсткость, а значит изменилась и общая жёсткость здания, что влечёт за собой изменение частот собственных форм колебаний модульного здания. Анализ результатов расчета модели №4 (модель со слайдерной сейсмоизоляцией, с изменёнными жесткостями межмодульных соединений) показал следующее: расчётное армирование монолитных конструкций здания не измени-

лось (если сравнивать с моделью №3). Следовательно, изменение в конфигурации межмодульных соединений не повлияло на армирование монолитных конструкций.

Однако увеличение жёсткости из-за внесённых изменений в конструкцию межмодульных соединений повлияло на интенсивность армирования стен объёмных модулей. Расчётное армирование AS1 уменьшилось на 60% по сравнению с моделью №1 без сейсмоизоляции

(72% в модели до изменений в конструкции соединений), расчётное армирование AS2 уменьшилось на 69% (75% в модели до изменений в конструкции соединений). В плитах типовых модулей расчётное армирование не изменилось.

Изменения в конфигурации соединений привели к незначительному увеличению усилий в горизонтальном и в вертикальном направлениях по сравнению с моделью без модификации соединений (модель №3). Условие прочности в межмодульном соединении с изменённой конфигурацией обеспечено. В соответствии с результатами расчёта требуется выполнить межмодульные соединения из стали марки С590, обладающей расчётным сопротивлением $R_y=540$ МПа.

Выводы

1. Расчёт модульного здания с учётом сейсмического воздействия без использования систем сейсмоизоляции показал невозможность расчётного обоснования сейсмостойкости здания с типовыми модулями при интенсивности землетрясения в 9 баллов по шкале MSK-64.

2. Рассмотрены варианты сейсмоизоляции модульного здания пружинно-демпферной изоляцией и слайдерной изоляцией. Введение в расчётную модель пружинно-демпферной сейсмоизоляции привело к значительному сокращению расчётного армирования (до 40%) в монолитных конструкциях здания. Однако данный вид сейсмоизоляции привел лишь к незначительному сокращению армиро-

вания в конструкциях модулей (до 20%). Для расчётного и конструктивного обоснования использования типовых модулей величина сокращения расчётного армирования недостаточна.

3. Результаты расчёта модели со слайдерной сейсмоизоляцией показали значительное сокращение расчётного армирования всех конструкций здания: до 55% в монолитных конструкциях и до 60% в конструкциях модулей. Для выбранного конструктивного исполнения модульного здания использование слайдерной сейсмоизоляции наиболее эффективно.

4. Предложена конструкция усиленного межмодульного соединения, которая удовлетворяет условие прочности в упругой стадии. Увеличение жесткости, из-за введения дополнительных стальных рёбер жёсткости в конструкцию межмодульных соединений, незначительно повлияло на требуемое армирование модулей (увеличение на 10-20% в сравнении с моделью №3 с неизменёнными межмодульными соединениями).

5. Предложенный и расчётно-обоснованный вариант сейсмоизоляции модульного здания позволяет спроектировать сейсмостойкое модульное здание в районах с высокой сейсмичностью.

На следующих этапах исследования планируется рассмотреть неупругое поведение межмодульных соединений с возможностью пластических деформаций, а также учесть нелинейное поведение слайдерных опор.

Список литературы

1. Bin Zhao, Di Wu, Huiqing Zhu. New modular precast composite shear wall structural system and experimental study on its seismic performance // *Engineering Structures*. August 2022. Vol. 264, P. 114381.
2. Seismic performance and design of precast concrete building structures: an overview / R. K. Khare, M. M. Maniyar, S.R. Uma, V. B. Bidwai // *Journal of Structural Engineering*. 2011. Vol. 38, no. 3. P.272-284.
3. Experimental and numerical investigations of bolted assembled joints to concrete encased CFST columns with different connection details / Lei Guo, Jingfeng Wang, Wanqian Wang, Zhihan Hu // *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 201. P. 107739.
4. Seismic resilience design of prefabricated modular pressurized buildings / Zhiwu Ye, Haifeng Bu, Zhimao Liu, Deng Lu, Dong Min, Hongbo Shan // *Resilient Cities and Structures*. 2025. Vol. 4, is. 1. P. 53-70.
5. Chen Wang, Peifeng Tian, Tak-Ming Chan. Seismic behavior of modular buildings with reinforced concrete (RC) structural walls as seismic force resisting system // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 315. P. 118378.
6. Sheng Li, Nelson Lam, Hing-Ho Tsang. Lateral stability design and modelling of high-rise fully modular buildings with superelastic tendon restrained rocking isolation // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 99. P. 111589.
7. Collapse Behavior and Resistance Mechanisms of Steel Modular Buildings with Corrugated Walls: Experimental, Numerical, and Analytical Insights / Jing-Zhou Zhang, Xiao Lin, Wen-Jin Zhang, Zhi-Wei Yu // *Thin-Walled Structures*. 2025. 113157.
8. Enhancing seismic resilience in modular steel building through three-dimensional isolation / Ze Mo, BingLin Lai, Ganping Shu, T.Y. Yang, Carlos E. Ventura, J.Y. Richard Liew // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 323, part A. P. 119269.
9. Experimental study on the seismic performance of two-storey UHPC modular building structure / Qing-Feng He, Jun-Ming Zou, Chen-Feng Zhang, Yi Zhong, Jin-Shi Li, Wei-Jian Yi // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 97. P. 110966
10. Скляр С.Н., Овчинников И.И. Оценка состояния нормативной документации по расчету на землетрясения // *Инженерные исследования*. 2024. №4(19). С. 39-47. EDN: VTQGTGU
11. Крыжановский В.В. Модульные здания в современном строительстве // *Инженерные исследования*. 2023. №1 (11). С. 31-37. EDN: PQCATC
12. Richard Liew a J.Y., Chua Y.S.. Innovative modular systems for high-rise buildings // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 323, part A. P. 119270.
13. Сауков Д. А., Гинзберг Л. А. Современное модульное строительство // *SAFETY2018*. Екатеринбург, 2018.
14. Chao Hou, Qi Qi, Jiahao Peng. Performance of inter-module connection with a pegged tenon for composite modular buildings with CFST columns // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 329. P. 119824.

15. Seismic behavior of high-rise modular buildings with simplified models of inter-module connections / Feng-Wei Shi, Yang Ding, Liang Zong, Wei Pan, Yan Duan, Tian-Yao Ping // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 221. P. 108867.
16. Design and experimental study on seismic performance of RC modular superimposed shear walls with novel inter-module connection / Jiulin Bai, Biao Yang, Bin Xie, Jingwei Yang // *Engineering Structures*. 2025. Vol. 324. P. 119356.
17. Machine learning based multi-objective optimization on shear behavior of the inter-module connection / En-Feng Deng, You-Peng Du, Xun Zhang, Jun-Yi Lian, Zhe Zhang, Jun-Feng Zhang // *Thin-Walled Structures*. 2024. Vol. 205, part C. P. 112596.
18. Experimental study on seismic performance of new concrete modular structures with tie-rod inter-module connections / Hao Chen, Chao Yang, Haiyang Wang, Chao Li, Cong Li, Jinping Ou // *Structures*. 2025. Vol. 71. P. 107983.
19. Zhen Wang, Wei Pan, Yang Zhang. Parametric study on module wall-core system of concrete modular high-rises considering the influence of vertical inter-module connections. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 241. P. 112436.
20. Experimental and numerical investigation of bolt-free preloaded connection for steel-framed modular buildings / Keunwoo Lee, Bong-Ho Cho, Kim J.R. Rasmussen, Dami Jung // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 220. P. 108827.
21. Comparative cradle to end-of-use embodied carbon analysis of high-rise concrete buildings using volumetric modular and panelized construction / Xiaohan Wu, Geoffrey Qiping Shen, Yue Teng, Rui Jiang // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 100. P. 111736.
22. Yang Zhang, Siwei Chen, Wei Pan. Systematic initial embodied carbon assessment of concrete modular high-rise residential buildings: A case in Hong Kong. *Building and Environment*. 2024. Vol. 265. P. 111917.
23. Comprehensive evaluation of flat pack modular building systems: Design, structural performance, and operational efficiency / Heshachanaa Rajanayagam, Valentina Beatini, Keerthan Poologanathan, Brabha Nagaratnam // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. P. 110099.
24. Huu-Tai Thai, Tuan Ngo, Brian Uy. A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*. 2020. Vol. 28. P. 1265-1290.
25. Vincent J.L. Gan. BIM-based graph data model for automatic generative design of modular buildings // *Automation in Construction*. 2022. Vol. 134. P. 104062.

References

1. Bin Zhao, Di Wu, Huiqing Zhu. New modular precast composite shear wall structural system and experimental study on its seismic performance. *Engineering Structures*. 2022; 264: 114381.
2. Khare R. K., Maniyar M. M., Uma S.R., Bidwai V. B. Seismic performance and design of precast concrete building structures: an overview. *Journal of Structural Engineering*. 2011; 38(3): 272-284.

3. Lei Guo, Jingfeng Wang, Wanqian Wang, Zhihan Hu. Experimental and numerical investigations of bolted assembled joints to concrete encased CFST columns with different connection details. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023; 201: 107739.
4. Zhiwu Ye, Haifeng Bu, Zhimao Liu, Deng Lu, Dong Min, Hongbo Shan. Seismic resilience design of prefabricated modular pressurized buildings. *Resilient Cities and Structures*. 2025; 4(1): 53-70.
5. Chen Wang, Peifeng Tian, Tak-Ming Chan. Seismic behavior of modular buildings with reinforced concrete (RC) structural walls as seismic force resisting system. *Engineering Structures*. 2024; (315): 118378.
6. Sheng Li, Nelson Lam, Hing-Ho Tsang. Lateral stability design and modelling of high-rise fully modular buildings with superelastic tendon restrained rocking isolation. *Journal of Building Engineering*. 2025; 99: 111589.
7. Jing-Zhou Zhang, Xiao Lin, Wen-Jin Zhang, Zhi-Wei Yu. Collapse Behavior and Resistance Mechanisms of Steel Modular Buildings with Corrugated Walls: Experimental, Numerical, and Analytical Insights. *Thin-Walled Structures*. 2025; 113157.
8. Ze Mo, BingLin Lai, Ganping Shu, T.Y. Yang, Carlos E. Ventura, J.Y. Richard Liew. Enhancing seismic resilience in modular steel building through three-dimensional isolation. *Engineering Structures*. 2025; 323(A): 119269.
9. Qing-Feng He, Jun-Ming Zou, Chen-Feng Zhang, Yi Zhong, Jin-Shi Li, Wei-Jian Yi. Experimental study on the seismic performance of two-storey UHPC modular building structure. *Journal of Building Engineering*. 2024; 97: 110966.
10. Sklyarov S.N., Ovchinnikov I.I. Assessment of the status of normative documentation on earthquake design. *Inzhenernye issledovaniya = Engineering Research*. 2024; (4): 39-47. (In Russ.). EDN: VTQTGU.
11. Kryzhanovsky V.V. Modular buildings in modern construction. *Inzhenernye issledovaniya = Engineering Research*. 2023; (1): 31-37. (In Russ.). EDN: PQCATC
12. Richard Liew a J.Y., Chua Y.S. Innovative modular systems for high-rise buildings. *Engineering Structures*. 2025; 323(A): 119270.
13. Saukov D. A., Ginzberg L. A. Modern modular building. Safety of critical infrastructures and territories. In: *Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures: SAFETY2018*. Ekaterinburg; 2018. P. 69-82. (In Russ.)
14. Chao Hou, Qi Qi, Jiahao Peng. Performance of inter-module connection with a pegged tenon for composite modular buildings with CFST columns. *Engineering Structures*. 2025; 329: 119824.
15. Feng-Wei Shi, Yang Ding, Liang Zong, Wei Pan, Yan Duan, Tian-Yao Ping. Seismic behavior of high-rise modular buildings with simplified models of inter-module connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 221: 108867.
16. Jiulin Bai, Biao Yang, Bin Xie, Jingwei Yang. Design and experimental study on seismic performance of RC modular superimposed shear walls with novel inter-module connection. *Engineering Structures*. 2025; 324: 119356.

17. En-Feng Deng, You-Peng Du, Xun Zhang, Jun-Yi Lian, Zhe Zhang, Jun-Feng Zhang. Machine learning based multi-objective optimization on shear behavior of the inter-module connection. *Thin-Walled Structures*. 2024; 205(C): 112596.
18. Hao Chen, Chao Yang, Haiyang Wang, Chao Li, Cong Li, Jinping Ou. Experimental study on seismic performance of new concrete modular structures with tie-rod inter-module connections. *Structures*. 2025; 71: 107983.
19. Zhen Wang, Wei Pan, Yang Zhang. Parametric study on module wall-core system of concrete modular high-rises considering the influence of vertical inter-module connections. *Engineering Structures*. 2021; 241: 112436.
20. Keunwoo Lee, Bong-Ho Cho, Kim J.R. Rasmussen, Dami Jung. Experimental and numerical investigation of bolt-free preloaded connection for steel-framed modular buildings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 220: 108827.
21. Xiaohan Wu, Geoffrey Qiping Shen, Yue Teng, Rui Jiang. Comparative cradle to end-of-use embodied carbon analysis of high-rise concrete buildings using volumetric modular and panelized construction. *Journal of Building Engineering*. 2025; 100: 111736.
22. Yang Zhang, Siwei Chen, Wei Pan. Systematic initial embodied carbon assessment of concrete modular high-rise residential buildings: A case in Hong Kong. *Building and Environment*. 2024; 265: 111917.
23. Heshachanaa Rajanayagam, Valentina Beatini, Keerthan Poologanathan, Brabha Nagarathnam. Comprehensive evaluation of flat pack modular building systems: Design, structural performance, and operational efficiency. *Journal of Building Engineering*. 2024; 95: 110099.
24. Huu-Tai Thai, Tuan Ngo, Brian Uy. A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*. 2020; 28: 1265-1290.
25. Vincent J.L. Gan. BIM-based graph data model for automatic generative design of modular buildings. *Automation in Construction*. 2022; 134: 104062.

Информация об авторах / Information about the Authors

Попов Андрей Харлампиевич, студент,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: popov.ah@edu.spbstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2054-8861>

Andrey Kh. Popov, Student, Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: popov.ah@edu.spbstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2054-8861>

Тарасов Владимир Александрович, кандидат
технических наук, доцент ВШПИДС,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: vtarasov1000@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>

Vladimir A. Tarasov, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Higher School of Industrial,
Civil and Road Construction, Institute of Civil
Engineering, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: vtarasov1000@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.042.882+621.362

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-38-52>

Исследование комбинированных систем утилизации теплоты: анализ влияния режимных параметров и геометрических характеристик на эффективность рекуперации тепла

В.С. Ежов ¹, А.П. Бурцев ¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В статье приводится математическое описание процесса теплопередачи при комбинированной утилизации низкопотенциальной теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов в каналах многослойного пластинчатого рекуператора.

Методы. Провести сравнительный анализ критериев Эйлера на основе теории подобия в горячем канале для различных конфигураций турбулизаторов в комбинированных системах утилизации низкопотенциальной теплоты, определить, как скоростные режимы воздушных потоков влияют на коэффициент теплопередачи, а также тепловую и электрическую эффективности в процессах утилизации вторичных и возобновляемых энергоресурсов с попутной генерацией термоэлектричества.

Результаты. Установлено преимущество шахматной конфигурации цилиндрических турбулизаторов в исследуемом рекуператоре по сравнению с коридорной и реберной схемами их расположения, для чего был использован сравнительный анализ критериев Эйлера на основе теории подобия. Создана математическая модель тепловых процессов с разливным расположением цилиндрических турбулизаторов (шахматным, коридорным), в пластинчатом рекуператоре в квазистационарном тепловом режиме. Предложена методика определения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи комплексного многослойного пластинчатого рекуператора с повышенной турбулизацией теплоносителей.

Заключение. Исследование показало, что шахматная конфигурация цилиндрических турбулизаторов значительно повышает эффективность теплопередачи по сравнению с другими схемами, что делает ее предпочтительной для использования в горячих каналах пластинчатых рекуператоров систем комбинированной утилизации низкопотенциальной теплоты. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать и оптимизировать тепловые процессы, учитывая влияние турбулизаторов. Методика определения коэффициентов теплоотдачи обеспечивает высокую точность расчетов, а сравнительный анализ критериев Эйлера на основе теории подобия подтвердил преимущество шахматной схемы. Были также определены области режимных параметров и влияния геометрических характеристик турбулизаторов на эффективность процесса рекуперации тепла, что подчеркивает важность их оптимизации.

Ключевые слова: рекуператор; утилизация; низкопотенциальная теплота; турбулизатор; термоэлектричество; критерий Эйлера; энергоэффективность.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030» и государственного задания №075-03-2025-526.

Для цитирования: Ежов В.С., Бурцев А.П. Исследование комбинированных систем утилизации теплоты: анализ влияния режимных параметров и геометрических характеристик на эффективность рекуперации тепла // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 38-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-38-52>.

Поступила в редакцию 07.09.2025

Подписана в печать 16.10.2025

Опубликована 22.12.2025

Investigation of combined heat recovery systems: analysis of the influence of operating parameters and geometric characteristics on the efficiency of heat recovery

Vladimir S. Yezhov ¹, Alexey P. Burtsev ¹ ✉

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The article provides a mathematical description of the heat transfer process during the combined utilization of low-potential waste heat and ventilation emissions in the channels of a multilayer plate heat exchanger.

Methods. To carry out a comparative analysis of the Eulerian criteria based on the theory of similarity in a hot channel for various configurations of turbulators in combined low-potential heat recovery systems, to determine how high-speed modes of air flows affect the heat transfer coefficient, as well as thermal and electrical efficiency in the processes of recycling secondary and renewable energy resources with associated thermoelectric generation.

Results. The advantage of the staggered configuration of cylindrical turbulators in the recuperator under study is established in comparison with the corridor and rib schemes of their arrangement, for which a comparative analysis of Euler criteria based on similarity theory was used. A mathematical model of thermal processes with a filling arrangement of cylindrical turbulators (checkerboard, corridor) in a plate heat exchanger in a quasi-stationary thermal regime has been created. A method for determining the coefficients of heat transfer and heat transfer of a complex multilayer plate heat exchanger with increased turbulence of heat carriers is proposed.

Conclusion. The study showed that the staggered configuration of cylindrical turbulators significantly increases the efficiency of heat transfer compared to other schemes, which makes it preferable for use in hot channels of plate heat recuperators of combined low-potential heat recovery systems. The developed mathematical model makes it possible to predict and optimize thermal processes, taking into account the influence of turbulators. The method of determining heat transfer coefficients ensures high accuracy of calculations, and a comparative analysis of Euler criteria based on similarity theory has confirmed the advantage of the chess scheme. The areas of operating parameters and the influence of the geometric characteristics of the turbulators on the efficiency of the heat recovery process were also determined, which underlines the importance of their optimization.

Keywords: heat recovery; recycling; low-potential heat; turbulator; thermoelectricity; Euler criterion; energy efficiency.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: the work was carried out within the framework of the Southwestern State University Development Program of the Priority 2030 project and state assignment No. 075-03-2025-526.

For citation: Yezhov V. S., Burtsev A. P. Investigation of combined heat recovery systems: analysis of the influence of operating parameters and geometric characteristics on the efficiency of heat recovery. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 38-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-38-52>.

Received 07.09.2025

Accepted 16.10.2025

Published 22.12.2025

Введение

В современном мире вопросы энергоэффективности и рационального использования ресурсов становятся все более актуальными [1-5]. Комбинированные системы утилизации низкопотенциальной теплоты представляют собой перспективное направление для повышения энергоэффективности и снижения экологического воздействия, включают в себя пластинчатые рекуператоры с модифицированными плоскими многословными теплообменными стенками в конструкцию которых встроены полупроводниковые элементы Пельтье для попутной генерации термоэлектричества, что позволяет эффективно использовать вторичные и возобновляемые энергоресурсы [6-12].

Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность таких систем, является конфигурация турбулизаторов в горячих и холодных каналах рекуператоров. Турбулизаторы увеличивают площадь теплообмена между теплоносителями, что способствует более эффективному теплообмену [13-16]. Однако выбор рациональной конфигурации турбулизаторов требует глубокого анализа и учета множества факторов, такие как ско-

ростные режимы потоков, геометрические характеристики¹ [17-19].

Материалы и методы

Исследование современных методик определения аэродинамического сопротивления пучков труб позволяет оценить преимущество того или иного подхода. В частности, оценим возможности оребрения без турбулизаторов и оребрения с турбулизаторами, смонтированных на ребрах как по коридорной, так и по шахматной схемам.

Исходя из этого необходимо напомнить, что общее количество тепла Q_{xi} , отдаваемого ребром с турбулизаторами в холодном канале, может быть охарактеризовано обобщенной формулой, включающей в себя все три возможных слагаемых $\alpha_{Ti} \Theta_{xi} F_T z_{Ti}$, где $i = 0, ш, к$:

$$Q_{xi} = \alpha_p \Theta_{xi} F_p A + \alpha_c \Theta_{xi} F_c + \alpha_{Ti} \Theta_{xi} F_T z_{Ti}, \quad (1)$$

где α_p , α_c , α_{Ti} – соответственно коэффициенты теплоотдачи ребра, стенки и турбулизатора, Вт/(м²·К); F_p , F_c , F_T –

¹ Бурцев А. П. Комплексная утилизация теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов в многослойном пластинчатом рекуператоре: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2023. 202 с.

площади торца прямоугольного ребра, боковой стенки ребра и поверхности турбулизатора, m^2 ; A – безразмерный

параметр: $A = \frac{\text{th}(ml_p)}{ml_p}$; m – параметр:

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_p \delta_p}}, \text{ 1/м; } \delta_p - \text{периметр ребра м;}$$

λ_p – коэффициент теплопроводности ребра, Вт/(м·К); z_{Ti} – число турбулизаторов.

Температурный напор стенки ребра в холодном канале при различной конфигурации расположения турбулизаторов:

$$\Theta_{xi} = t_{cxi} - \bar{t}_{xi}. \quad (2)$$

где t_{cxi} – температура стенки ребра в холодном канале, К; \bar{t}_{xi} – соответственно средняя температура стенки ребра в холодном канале, К.

Очевидно, что отсутствие турбулизаторов на ребрах не дает дополнительных завихрений воздуха, что обнуляет появление дополнительного тепла, т. е. при $i = 0$, $\alpha_0 = 0$.

В противном случае их монтаж позволяет произвести рекуперацию тепла и слагаемое из соотношения (1) α_{Ti} , Θ_{xi} , F_T , z_{Ti} не равно 0, где $i = ш, к$.

Рассмотрим тепловой баланс для вариантов конструкции, содержащих цилиндрические турбулизаторы в горячем и холодном каналах. Известно, что мощность на валу вентилятора, позволяющего прокачивать теплоноситель (газ, пар, воздух) через канал, определяется по формуле:

$$N = \frac{V \Delta P}{\eta} = \frac{G \Delta P}{\rho \eta}, \quad (3)$$

где V – объемный расход теплоносителя, m^3/c ; G – массовый расход теплоносителя, $кг/c$; ΔP – полное аэродинамическое сопротивление, $Н/м^2$; ρ – плотность теплоносителя, $кг/м^3$; η – КПД вентилятора.

Следует отметить, что мощность N частично расходуется на создание теплового потока Q в горячем канале:

$$Q = N \eta \eta_k, \quad (4)$$

где η_k – КПД канала установки.

Теория подобия позволяет использовать критерий Эйлера Eu для оценки эффективности работы горячего или холодного канала рекуператора, учитывая соотношение:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2}. \quad (5)$$

Из выражения Eu следует, что данный параметр пропорционален перепаду давления ΔP , который формируется в канале в зависимости от конфигурации турбулизаторов на ребрах конструкции.

Учитывая соотношения (3) – (5), перейдем к исследованию теплового потока Q_{Ti} , возникшего в произвольном канале при различной конфигурации турбулизаторов:

$$Q_{xTi} = \eta_{Ti} G w^2 Eu_{Ti}, \quad (6)$$

где i – ш, к, причем: $Q_{тш}$, $\eta_{тш}$, $Eu_{тш}$ – шахматные параметры; $Q_{тк}$, $\eta_{тк}$, $Eu_{тк}$ – коридорные параметры; w – скорость холодного потока в произвольном канале, м/с.

С учетом (5) и (6), заменив Θ_{xi} на Θ_i для произвольного канала, получим коэффициент теплоотдачи α_{Ti} для i конфигурации турбулизаторов:

$$\alpha_{xTi} \Theta_i F_T z_{Ti} = \eta_K G w^2 Eu_i. \quad (7)$$

Из (7) следует

$$\alpha_{Ti} = \frac{\eta_{Ti} G w^2 Eu_{Ti}}{\Theta_i F z_{Ti}}, \quad (8)$$

где $\eta_K = t_{c\Gamma_i} - \bar{t}_i$, η_K , G , w , F_T , z_{Ti} – константы.

Введем обозначение

$$M_{Ti} = \frac{\eta_{Ti} G w^2}{\Theta_i F z_{Ti}}. \quad (9)$$

Учитывая (9), представим формулу (8) в виде

$$\alpha_{Ti} = M_{Ti} Eu_{Ti}. \quad (10)$$

Проведя аналогичное предварительное рассуждение, можно получить коэффициенты теплоотдачи α_{Tti} и α_{Txi} соответственно для холодного и горячего каналов:

$$\alpha_{Tti} = M_{Tti} Eu_{Tti}, \quad \alpha_{Txi} = M_{Txi} Eu_{Txi}. \quad (11)$$

Формулы (11) можно объединить в одну

$$\alpha_{Tji} = M_{Tji} Eu_{Tji}, \quad (12)$$

где при $j = \Gamma$ – горячий канал; $i = x$ – холодный канал.

В этом случае, например, если $j = \Gamma$, $i = k$, получим $\alpha_{\Gamma k}$ – коэффициент теплоотдачи турбулизаторов при коридорной конфигурации в горячем канале.

Ниже проведем сравнительный анализ эффективности рекуператора при различной конфигурации турбулизаторов соответственно в холодном и горячем каналах, используя теорию подобия.

Результаты и их обсуждение

В исследуемом рекуператоре представлены двухрядные монтажные схемы цилиндрических турбулизаторов в виде шахматного и коридорного пучков соответственно (рис. 1 и 2). На указанных схемах заданы значения поперечного шага $s_1 = 50$ мм и продольного шага $s_2 = 16$ мм. На каждом коридорном ребре смонтировано $z_k = 10$ турбулизаторов, на каждом шахматном ребре соответственно $z_{ш} = 9$ турбулизаторов. Схема установки представляет собой параллелепипед, разделенный на 7 каналов: 4 канала для прохода горячего потока, 3 канала для прохода холодного потока. Каналы имеют размеры: $a = 300$ мм = 0,3 м; $b = 40$ мм = 0,04 м каждый.

Предварительно вычислим Eu_{Tti} ($i = ш, к$), сравним их значения для шахматных и коридорных каналов, ориентируясь на среднюю температуру в произвольном канале. Для этого воспользуемся данными эксперимента и набором теоретических формул.

Для шахматных пучков возможны следующие случаи:

$$\text{– если } \frac{1 - \frac{d}{s'_2}}{\frac{s_1}{d} - 1} \leq 0,53, \text{ то}$$

$$Eu_{\Gamma\Gamma ш} = 1,4(z_{\Gamma\Gamma ш} + 1) Re_{\Gamma\Gamma ш}^{-0,25}, \quad (13)$$

$$\text{– если } \frac{1 - \frac{d}{s'_2}}{\frac{s_1}{d} - 1} > 0,53, \text{ то}$$

$$Eu_{\Gamma\Gamma ш} = 1,93(z_{\Gamma\Gamma ш} + 1) \sqrt{\frac{1 - \frac{d}{s'_2}}{\frac{s_1}{d} - 1}} Re_{\Gamma\Gamma ш}^{-0,25}. \quad (14)$$

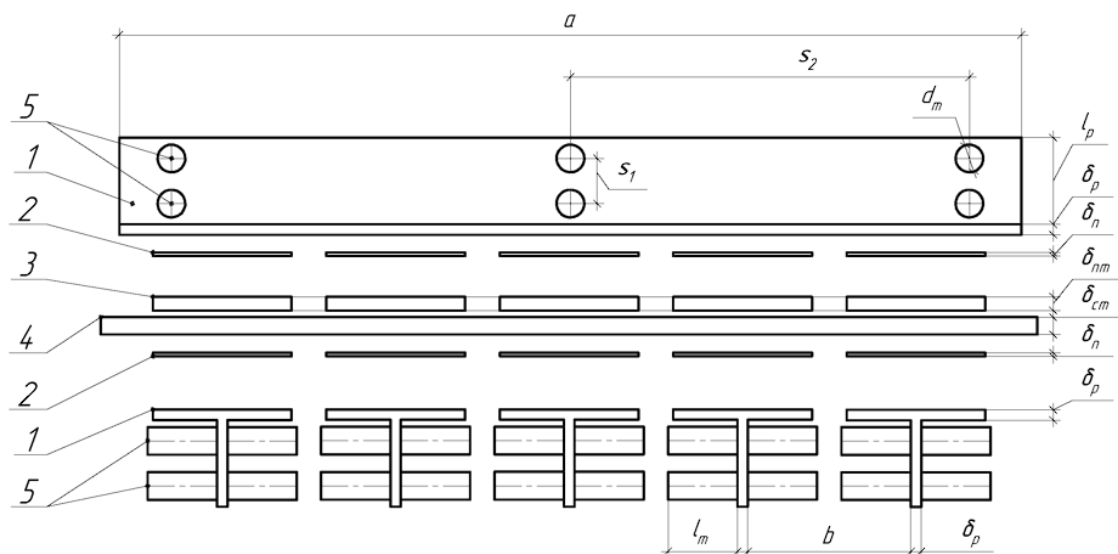


Рис. 1. Схема многослойной стенки с коридорным расположением турбулизаторов: 1 – алюминиевый Т-образный радиатор; 2 – термическая прокладка; 3 – элемент Пельтье; 4 – алюминиевая стенка рекуператора; 5 – цилиндрические турбулизаторы

Fig. 1. Diagram of a multilayer wall with a corridor arrangement of turbulators: 1 – aluminum T-shaped radiator; 2 – thermal gasket; 3 – Peltier element; 4 – aluminum recuperator wall; 5 – cylindrical turbulators

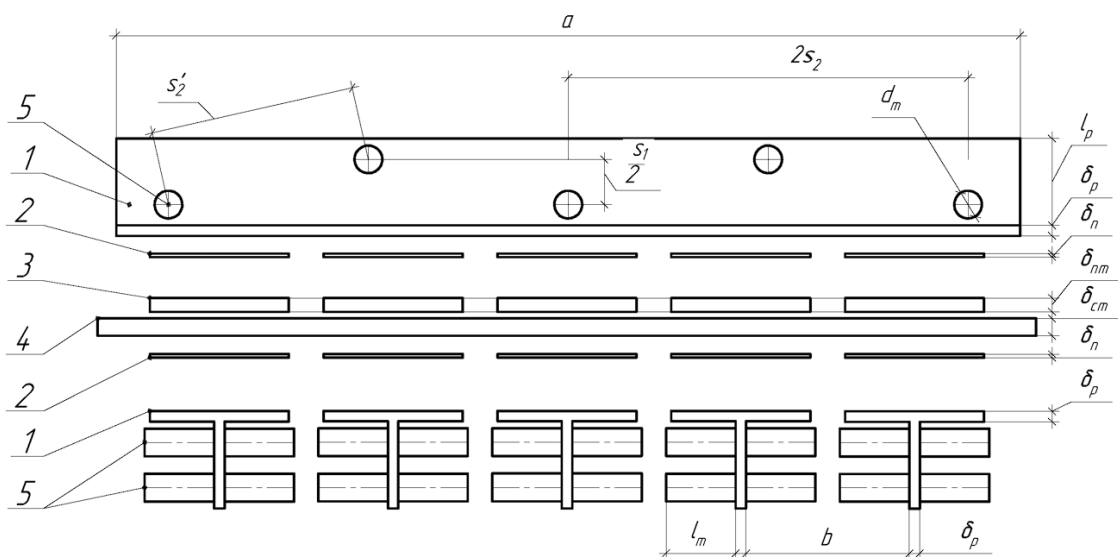


Рис. 2. Многослойная стенка с шахматным расположением турбулизаторов: 1 – алюминиевый Т-образный радиатор; 2 – термическая прокладка; 3 – элемент Пельтье; 4 – алюминиевая стенка рекуператора; 5 – цилиндрические турбулизаторы

Fig. 2. Multilayer wall with staggered turbulators: 1 – aluminum T-shaped radiator; 2 – thermal gasket; 3 – Peltier element; 4 – aluminum recuperator wall; 5 – cylindrical turbulators

Из рис. 1 и 2 следует: $d = 8$ мм.

Для определения формулы расчета числа Эйлера необходимо определить диагональный шаг расположения турбулизаторов:

$$s'_2 = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2}\right)^2 + s_2^2} = \sqrt{25^2 + 16^2} = \\ = \sqrt{881} \approx 26,2488,$$

$$\text{далее: } \frac{1 - \frac{d}{s'_2}}{\frac{s_1}{d} - 1} \approx \frac{1 - \frac{8}{26,2488}}{\frac{50}{8} - 1} \approx 0,1324 < 0,53.$$

В этом случае $Eu_{\text{тгш}}$ вычисляется по формуле (13), предварительно определив соответствующее число $Re_{\text{тгш}}$, и таблицам динамической вязкости для 6-ти моментов времени.

Вычисляются средние температуры $\bar{t}_Г$, $\bar{t}_Х$ соответственно в горячем и холодном каналах:

$$\bar{t}_Г = \frac{t'_Г + t''_Г}{2}, \quad \bar{t}_Х = \frac{t'_Х + t''_Х}{2}. \quad (15)$$

Расчет эквивалентных диаметров d_1 и d_2 цилиндрических труб находится из отношения:

$$d_Г = \frac{4f_Г}{u_Г}, \quad d_Х = \frac{4f_Х}{u_Х}, \quad (16)$$

где $f_Г, f_Х, u_Г, u_Х$ – соответственно площади сечения и периметры горячего и холодного каналов.

Зависимости (15) и (16) позволяют вычислять значение критерия Рейнольдса в горячем канале:

$$Re_Г = \frac{w_Г d_Г}{\nu_Г}. \quad (17)$$

Полученные данные занесены в табл. 1.

Для коридорных пучков возможны следующие случаи:

$$\text{– если } \frac{\frac{s_2}{d} - 0,8}{\frac{s_1}{d} - 1} \leq 1, \text{ то}$$

$$Eu_{\text{тгк}} = 0,265 \left(\frac{\frac{s_2}{d} - 0,8}{\frac{s_1}{d} - 1} \right)^{2,5} z_{\text{тгк}} Re_{\text{тгк}}^{M_1}; \quad (18)$$

$$\text{– если } \frac{\frac{s_2}{d} - 0,8}{\frac{s_1}{d} - 1} > 1, \text{ то}$$

$$Eu_{\text{тгк}} = 0,265 \left(\frac{\frac{s_2}{d} - 0,8}{\frac{s_1}{d} - 1} \right)^2 z_{\text{тгк}} Re_{\text{тгк}}^{M_1}. \quad (19)$$

Показатель степени M_1 в соотношениях (18) и (19) определяется следующим образом:

$$\text{– если } \frac{s_2}{d} \geq 1,24, \text{ то}$$

$$M_1 = 0,88 \left(\frac{\frac{s_1}{d} - 1}{\frac{s_2}{d} - 1} - 0,1 \right)^{0,138} - 1; \quad (20)$$

$$\text{– если } \frac{s_2}{d} \leq 1,24, \text{ то}$$

$$M_2 = 0,88 \left(\frac{\frac{s_2}{d}}{1,24} \right)^{0,7} \left(\frac{\frac{s_1}{d} - 1}{\frac{s_2}{d} - 1} - 0,1 \right)^{0,138} - 1. \quad (21)$$

Для определения формулы расчета числа Эйлера также определяется диагональный шаг расположения турбулизаторов:

$$\frac{\frac{s_2}{d} - 0,8}{\frac{s_1}{d} - 1} = \frac{\frac{16}{8} - 0,8}{\frac{50}{8} - 1} \approx 0,2286 < 1.$$

Следует применить формулу (18), предварительно определив соответствующее число $Re_{тгк}$ по формулам (15) – (17) и таблицам динамической вязкости для 6 моментов времени. Этот интервал наиболее информативен для описания характеристик схем турбулизации, т.к. в интервале 0...10 минут происходит переходный процесс системы, заключающийся в наборе температур в холодном и горячем каналах. А в интервале 15...60 мин происходит процесс насыщения генерации термоЭДС и теплоты.

Полученные результаты занесены в табл. 1 и 2.

Данные из табл. 1 и 2 используем для получения значений функции $y_{г}(\tau) = \frac{Eu_{тгш}(\tau)}{Eu_{тгк}(\tau)}$, которые поместим в табл. 3.

Соответственно график функции приведен на рис. 3, где τ – время эксперимента, мин.

Данные из таблиц 1 – 3 и формул (14) – (21) позволяют определить соотношение функции $y_{г}(\tau) = \frac{Eu_{тгш}(\tau)}{Eu_{тгк}(\tau)}$ в горячем канале.

Таблица 1. Динамика изменения $Eu_{тгш}$ от времени τ в горячем канале

Table 1. Dynamics of the change in $Eu_{тгш}$ from time τ in the hot channel

Параметры / Parameters	Время, мин / Time, min					
	5	10	15	30	45	60
$\bar{t}_{гi}, ^\circ\text{C}$	95	114	137,5	141,5	145	150
$Eu_{тгш}$	1,0521	1,0763	1,1047	1,1091	1,1133	1,1188

Таблица 2. Динамика изменения $Eu_{тгк}$ от времени τ в горячем канале

Table 2. Dynamics of the $Eu_{тгк}$ change from time τ in the hot channel

Параметры / Parameters	Время, мин / Time, min					
	5	10	15	30	45	60
$\bar{t}_{гi}, ^\circ\text{C}$	106,5	125,5	149	153	160	165
$Eu_{тгк}$	0,1903	0,1902	0,1884	0,1879	0,1873	0,1869

Таблица 3. Динамика изменения $y_{г}(\tau)$ от времени τ в горячем канале

Table 3. Dynamics $y_{г}(\tau)$ of time variation of τ in the hot channel

Параметры / Parameters	Время, мин / Time, min					
	5	10	15	30	45	60
$y_{г}(\tau) = \frac{Eu_{тгш}}{Eu_{тгк}}$	5,4817	5,6585	5,8698	5,9041	5,9417	5,9836

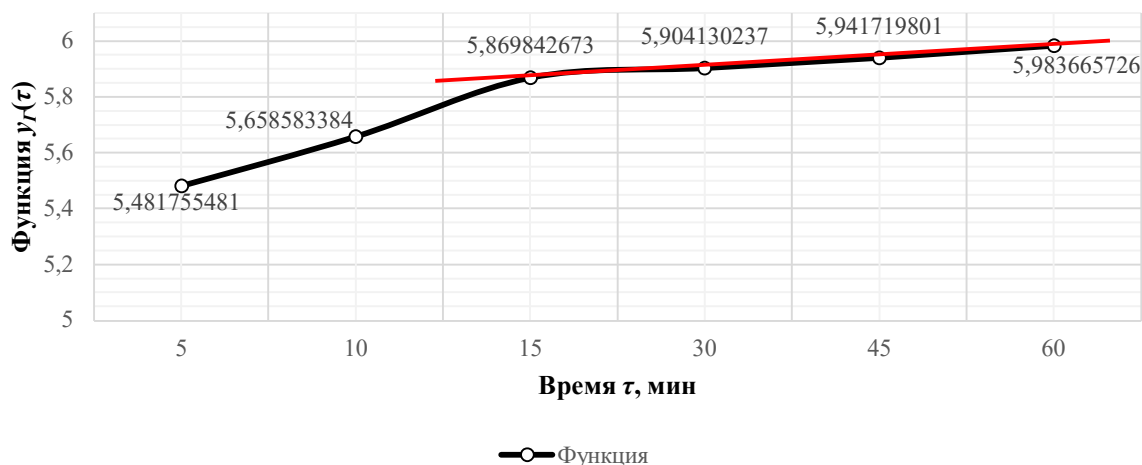


Рис. 3. График динамики изменения $y_{\Gamma}(\tau)$ от времени τ

Fig. 3. Graph of the dynamics of change $y_{\Gamma}(\tau)$ from time τ

На рис. 3 следует отметить участок «разгона» в интервале 5-15 мин значений функции $y_{\Gamma}(\tau)$ в горячем канале от 5,48 до 5,86. Начиная с момента времени $\tau = 15$ мин процесс передачи тепла стабилизируется и уравнение функции $y_{\Gamma}(\tau)$ можно линеаризировать с помощью метода наименьших квадратов (МНК) в виде функции:

$$\bar{y}_{\Gamma}(\tau) = 0,002526337\tau + 5,830093257, \quad (22)$$

значение которой отличаются от соответствующих значений $y_{\Gamma}(\tau)$ в каждой точке интервала 15...60 мин не более чем на 0,035% (см. табл. 3), что позволяет продолжить линеаризацию функции $y_{\Gamma}(\tau)$ в точке 5 и 10 мин с помощью. Для упрощения вычислений округлим коэффициенты соотношения (22) до четырех знаков после запятой:

$$\bar{y}_{\Gamma}(\tau) = 0,0025\tau + 5,8301. \quad (23)$$

Проведя анализ значений указанных функций в табл. 3, можно сделать вывод: при $\tau \rightarrow \infty$, $y_{\Gamma}(\tau) \rightarrow 6,00$.

Функция $y_{\Gamma}(\tau)$ сохраняет монотонность в этом интервале.

Аналогично параметрам работы горячего канала установки проведем анализ работы холодного канала указанного устройства. Как и в горячем канале, в этом случае отсутствие турбулизаторов в холодном канале обнуляет образование дополнительных завихрений воздуха и, соответственно, исключает появление дополнительного тепла, т. е. при $i = 0$, $\alpha_{r0} = 0$.

Как и в п. 1, все соотношения (1) – (21) справедливы и в этом случае.

Полученные результаты занесены в табл. 4 – 6. Данные из этих таблиц используем для получения значений функции $y_{\chi}(\tau) = \frac{Eu_{\Gamma\chi\text{III}}(\tau)}{Eu_{\Gamma\chi\text{K}}(\tau)}$, график которой изображен на рис. 4.

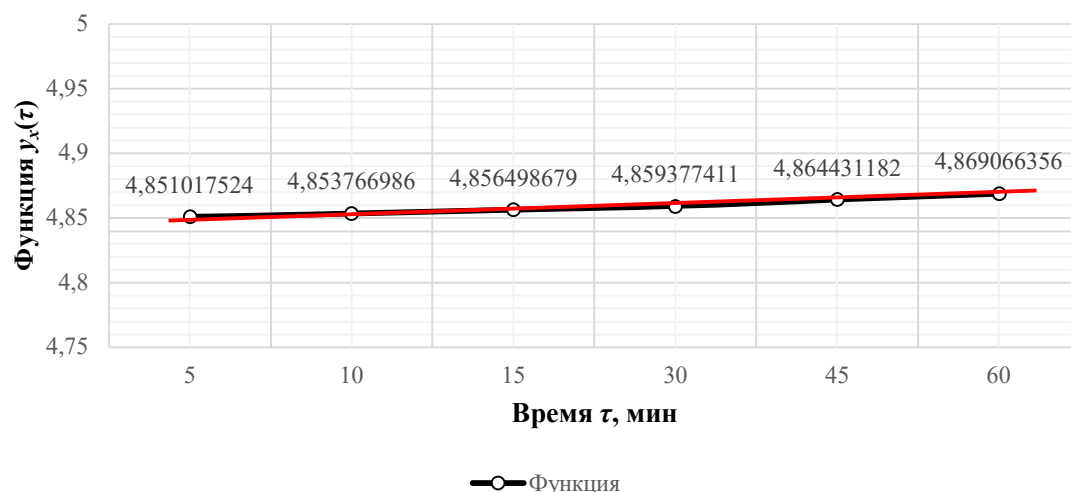


Рис. 4. Динамика изменения $y_x(\tau)$ от времени τ

Fig. 4. Graph of the dynamics of change $y_{cl}(\tau)$ from time τ

Данные из табл. 4 – 6 и анализ выражений (1) – (21) позволяют определить соотношение $y_x(\tau)$ в холодном канале.

Начиная с момента времени 5 мин, процесс передачи тепла стабилизируется, зависимость $y_x(\tau)$ можно реализо-

вать с помощью метода наименьших квадратов (МНК) в виде функции:

$$\bar{y}_x(\tau) = 0,000328054\tau + 4,849376730. \quad (24)$$

Значения функции отличаются от соответствующих значений $y_x(\tau)$ в каждой точке интервала 5...60 минут не более чем на 0,03022% (см. табл. 6).

Таблица 4. Динамика изменения $Eu_{ТХШ}$ от времени τ в холодном канале

Table 4. Dynamics of time-dependent $Eu_{tb.cl.st}$ changes in the cold channel

Параметры / Parameters	Время, мин / Time, min					
	5	10	15	30	45	60
$\bar{t}_{ши}, ^\circ\text{C}$	33,5	34	34,3	34,6	35,25	35,8
$Eu_{ТХШ}$	0,97	0,9704	0,9709	0,9713	0,97224	0,97302

Таблица 5. Динамика изменения $Eu_{ТХК}$ от времени τ в холодном канале

Table 5. Dynamics $Eu_{tb.cl.c}$ of time-dependent changes in the cold channel

Параметры / Parameters	Время, мин / Time, min					
	5	10	15	30	45	60
$\bar{t}_{ки}, ^\circ\text{C}$	30,3	30,5	30,7	30,95	31,1	31,35
$Eu_{ТХК}$	0,19996	0,19994	0,19991	0,19988	0,19986	0,19983

Таблица 6. Динамика изменения $y_x(\tau)$ от времени τ в холодном канале**Table 6.** Dynamics $y_x(\tau)$ of time variation of τ in the cold channel

Параметры / Parameters	Время, мин / Time, min					
	5	10	15	30	45	60
$y_x(\tau) = \frac{Eu_{\text{ТХШ}}}{Eu_{\text{ТХК}}}$	4,85102	4,85376	4,85649	4,85937	4,86443	4,86906

Проведя анализ значений указанной функции, можно сделать выводы:

- при $\tau \rightarrow \infty$, то $y_x(\tau) \rightarrow 4,87$;
- функция $y_x(\tau)$ сохраняет практически постоянное значение $y_x(\tau) \approx 4,855$ на всем интервале исследования $\tau \in [0; 60]$, что указывает на стационарный режим работы рекуператора.

Итак, в обоих случаях наблюдается преимущество шахматной схемы расположения турбулизаторов по сравнению с коридорной схемой, т. к. на основе формулы (12) $\alpha_{\text{пр}}$ пропорциональна Eu .

Выводы

Исследование показало, что шахматная конфигурация цилиндрических турбулизаторов значительно повышает эффективность теплопередачи по сравнению с другими схемами, что делает ее предпочтительной для использования в горячих каналах пластинчатых рекуператоров систем комбинированной утилизации низкопотенциальной теплоты. Раз-

работанная математическая модель позволяет прогнозировать и оптимизировать тепловые процессы, учитывая влияние турбулизаторов. Методика определения коэффициентов теплоотдачи обеспечивает высокую точность расчетов, а сравнительный анализ критериев Эйлера на основе теории подобия подтвердил преимущество шахматной схемы. Были также определены области режимных параметров и влияния геометрических характеристик турбулизаторов на эффективность процесса рекуперации тепла, что подчеркивает важность их оптимизации. Результаты исследования подтверждают, что шахматная конфигурация и разработанная методика являются ключевыми для создания более эффективных комбинированных систем утилизации низкопотенциальной теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов, способствуя снижению энергозатрат и экологической безопасности.

Список литературы

1. Численное определение границ вихревых зон на входе в круглые отсосы-раструбы над плоскостью / К. И. Логачев, А. М. Зиганшин, О. В. Тирон [и др.]. // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № S1. С. 251–260.

2. Системы отопления при нестационарном температурном режиме на основе комбинированного теплогенератора / Ф. А. Кешвединова, А. С. Умеров, С. А. Егоров [и др.] // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25(77). С. 87–90.

3. Елистратова Ю. В. Повышение эффективности пластинчатых теплообменных устройств в системах теплоснабжения. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2022. 182 с.

4. Интенсифицированный пластинчатый теплообменный аппарат в системах теплоснабжения ЖКХ РФ / Л. А. Куцев, В. А. Уваров, Н. Ю. Саввин, С. В. Чуйкин // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 2(62). С. 60-69. DOI 10.36622/VSTU.2021.62.2.004.

5. Исследование влияния структуры потока на коэффициент гидравлического сопротивления / Т. В. Дихтярь, О. Н. Зайцев, К. С. Дихтярь, И. П. Ангелюк // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22(74). С. 129-133. DOI 10.37279/2413-1873-2021-22-129-133.

6. Куцев Л. А., Саввин Н. Ю. Исследования пластинчатого теплообменного аппарата с развитой поверхностью теплообмена // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XV Международной научно-технической конференции, Вологда, 8 декабря 2020 г. Вологда: ВоГУ, 2021. С. 130–133.

7. Саввин Н. Ю., Никулин Н. Ю. Высокоэффективный теплообменный аппарат для системы жилищно-коммунального хозяйства // Наука. Технологии. Инновации : сборник научных трудов: в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. Новосибирск: НГШТУ, 2019. Ч. 4. С. 256–261.

8. Зайцев О. Н., Ангелюк И. П. Технико-экономическое обоснование использования системы рекуперации теплоты дымовых газов // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 16(68). С. 99–104.

9. Zaycev O. N., Angeluck I. P., Toporen S. S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. International Scientific Conference, Kislovodsk, 1–5 october 2019. Vol. 698 (5). P. 055033. DOI 10.1088/1757-899X/698/5/055033.

10. Ангелюк И. П. Утилизация теплоты отходящих дымовых газов бытовых котлов // Строительство и техногенная безопасность. 2016. № 5(57). С. 32–33.

11. Разработка кожухотрубного теплообменного аппарата с измененной геометрической поверхностью / Н. Ю. Никулин, Л. А. Куцев, В. С. Семенов, Д. А. Немцев // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3-1. С. 99–101.

12. Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П. Один из вариантов управления системой тепло-снабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 56-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

13. Федоров С. С., Тютюнов Д. Н. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям. Курск, 2017. 182 с.
14. Бурцев А. П. Экспериментальное исследование конструкции многослойного пластинчатого рекуператора в процессе утилизации теплоты вентиляционных выбросов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 10(1070). С. 24-26.
15. Integrated Heat Recovery of Waste Gases and Ventilation Emissions in a Multilayer Plate Heat Exchanger / A. Burtsev, V. Yezhov, N. Semicheva [et al.] // Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2022, Kursk, 17–18 ноября 2022 года. Kursk: Springer Nature Switzerland AG , 2024. P. 1-8.
16. Version of a mathematical model of purge ventilation system with a complex recuperative heat exchanger / V. Ezhov, N. Semicheva, A. Burtsev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19, no 1. P. 246–251. DOI 10.5937/jaes0-30068.
17. Independant power supply source for the station of cathodic protection of pipelines against corrosion / V. S. Ezhov, N. E. Semicheva, A. Burtsev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15, no 4. P. 501–504. DOI 10.5937/jaes15-15450.
18. Experimental calculation of the main characteristics of thermoelectric EMF source for the cathodic protection station of heat supply system pipelines / V. Yezhov, N. Semicheva, A. Burtsev, N. Perepelitsa // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1259. P. 225–237. DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_19.
19. Development of experimental designs of the integrated heater for the disposal of low-potential waste heat of ventilation emissions / V. S. Ezhov, N. S. Semicheva, A. P. Burtsev [et al.]. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Brasov, 1–2 november 2020. Vol. 789. P. 012020. DOI 10.1088/1757-899X/789/1/012020.

References

1. Logachev K. I., Ziganshin A.M., Tiron O. V., et al. Numerical determination of the boundaries of vortex zones at the entrance to circular suction sockets above the plane. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2022; (S1): 251-260. (In Russ.).
2. Keshvedinova F. A., Umerov A. S., Egorov S. A., et al. Heating systems for non-stationary temperature conditions based on a combined heat generator. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2022; (25): 87-90. (In Russ.).
3. Elistratova Yu.V. Improving the efficiency of plate heat exchange devices in heat supply systems. Belgorod: Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova; 2022. 182 p. (In Russ.).
4. Kushchev L. A., Uvarov V. A., Savvin N. Yu., Chuikin S. V. The intensified plate heat exchanger in heat supply systems of housing and communal services of the Russian

Federation. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2021; (2): 60-69. (In Russ.). DOI 10.36622/VSTU.2021.62.2.004.

5. Dikhtyar T. V., Zaitsev O. N., Dikhtyar K. S., Angelyuk I. P. Investigation of the influence of the flow structure on the coefficient of hydraulic resistance. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2021; (22): 129-133. (In Russ.). DOI 10.37279/2413-1873-2021-22-129-133.

6. Kushchev L. A., Savvin N. Yu. Studies of a plate heat exchanger with a developed heat exchange surface. In: *Avtomatizatsiya i energosberezhenie v mashinostroenii, energetike i na transporte: materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Automation and energy saving in mechanical engineering, energy and transport: proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference*. Vologda; 2021. P. 130-133. (In Russ.).

7. Savvin N. Y., Nikulin N. Y. Highly efficient heat exchanger for housing and communal services. In: *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii : sbornik nauchnykh trudov = Science. Technologies. Innovations. Collection of scientific papers*. Novosibirsk: NGSTU; 2019. P. 256-261. (In Russ.).

8. Zaitsev O. N., Angelyuk I. P. Feasibility study of the use of flue gas heat recovery system. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2019; (16): 99-104. (In Russ.).

9. Zaycev O. N., Angeluck I. P., Toporen S. S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases. In: *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. International Scientific Conference*. Kislovodsk; 2019; 698 (5): 055033. DOI 10.1088/1757-899X/698/5/055033

10. Angelyuk, I. P. Utilization of heat from exhaust flue gases of domestic boilers. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2016; (5): 32-33. (In Russ.).

11. Nikulin N. Y., Kushchev L. A., Semenok V. S., Nemtsev D. A. Development of a shell-and-tube heat exchanger with a modified geometric surface. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2015; (3-1): 99-101. (In Russ.).

12. Zhilina K. V., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P. One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 56-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

13. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N. Management of a multi-circuit heating supply system for buildings with dependent connection to heating networks. Kursk; 2017. 182 p. (In Russ.).

14. Burtsev A. P. Experimental study of the design of a multilayer plate heat exchanger in the process of heat recovery of ventilation emissions. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of construction machinery*. 2023; (10): 24-26. (In Russ.).

15. Burtsev A., Yezhov V., Semicheva N., et al. Integrated Heat Recovery of Waste Gases and Ventilation Emissions in a Multilayer Plate Heat Exchanger. In: *Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2022*. Kursk: Springer Nature Switzerland AG; 2024. P. 1-8.
16. Ezhov V., Semicheva N., Burtsev A., et al. Version of a mathematical model of purge ventilation system with a complex recuperative heat exchanger. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021; 19(1): 246–251. DOI 10.5937/jaes0-30068.
17. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A., et al. Independant power supply source for the station of cathodic protection of pipelines against corrosion. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017; 15(4): 501–504. DOI 10.5937/jaes15-15450.
18. Yezhov V., Semicheva N., Burtsev A., Perepelitsa N. Experimental calculation of the main characteristics of thermoelectric EMF source for the cathodic protection station of heat supply system pipelines. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021; 1259: 225–237. DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_19.
19. Ezhov V. S., Semicheva N. S., Burtsev A. P., et al. Development of experimental designs of the integrated heater for the disposal of low-potential waste heat of ventilation emissions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Brasov, 1–2 november 2020, 789: 012020. DOI 10.1088/1757-899X/789/1/012020.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ежов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры инфраструктурных теплоэнергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-5610>, ScopusID: P-4377-2015

Vladimir S. Yezhov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-5610>, ScopusID: P-4377-2015

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

УДК 681.51

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-53-69>



Гибридный двухуровневый метод автоматического выявления подмены лица оператора на изображении

М.Д. Халеев ¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук
ул. Корпусная, д. 18, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: Haleev.M@iias.spb.su

Резюме

Цель исследования: Разработка гибридного двухуровневого метода для повышения как точности, так и устойчивости выявления подмены лица оператора на изображениях, что является актуальной задачей в условиях постоянного роста и усложнения угроз со стороны дипфейк-технологий.

Методы. Предложена архитектура, объединяющая сверточную нейронную сеть EfficientNet для извлечения глубоких паттернов и ансамбль из четырех классификаторов. Эти классификаторы целенаправленно анализируют специфические группы признаков: экспертные, текстурные, статистические и основанные на координатах лицевых ориентиров, что позволяет выявлять конкретные артефакты синтеза. Для обучения и тестирования был сформирован обширный и репрезентативный комплексный набор данных объемом 34 000 изображений, включающий как сгенерированные дипфейки, так и публичные датасеты.

Результаты. Экспериментально подтверждена высокая эффективность предложенного метода: точность составила 0,921, а F1-мера – 0,914. Эти показатели значительно превосходят результаты любой из моделей, использованных по отдельности, что доказывает ярко выраженный и практически значимый синергетический эффект от их объединения.

Заключение. Работа демонстрирует, что синергия глубокого обучения и классических признаковых моделей позволяет создать действительно более надежный и точный детектор. Предложенный метод повышает общую точность и увеличивает надежность системы, эффективно компенсируя индивидуальные слабости отдельных классификаторов. Это подтверждает гипотезу о том, что сочетание способности нейросети извлекать сложные, неявные паттерны и способности признаковых моделей анализировать конкретные, заранее известные специфические артефакты (например, геометрические искажения) ведет к созданию более мощного и устойчивого детектора.

Ключевые слова: подмена лиц; компьютерное зрение; искусственный интеллект; глубокое обучение; дипфейк; информационная безопасность.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках бюджетной темы FFZF-2025-0003.

Для цитирования: Халеев М.Д. Гибридный двухуровневый метод автоматического выявления подмены лица оператора на изображении // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 53-69. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-53-69>.

Поступила в редакцию 14.10.2025

Подписана в печать 19.11.2025

Опубликована 22.12.2025

Hybrid two-level method for automatic detection of face substitution in an image

Mikhail D. Haleev ¹ ✉

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
18, Korpusnaya str., St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: Haleev.M@ias.spb.su

Abstract

Purpose of research. The development of a hybrid, two-level method to enhance both the accuracy and robustness of detecting operator face spoofing in images, which is a pressing issue given the constant growth and sophistication of threats from deepfake technologies.

Methods. A novel architecture is proposed, combining the EfficientNet convolutional neural network for deep pattern extraction with an ensemble of four classifiers. These classifiers specifically analyze distinct feature groups: expert-based, textural, statistical, and those based on facial landmark coordinates, enabling the detection of specific synthesis artifacts. For training and testing, an extensive and representative dataset of 34,000 images was compiled, including deepfakes generated by several modern tools as well as public datasets.

Results. The high efficacy of the proposed method was experimentally confirmed: accuracy reached 0.921 and the F1-score was 0.914. These metrics significantly surpass the performance of any of the individual models used separately, demonstrating a pronounced and practically significant synergistic effect from their combination.

Conclusion. This work demonstrates that the synergy between deep learning and classical feature-based models allows for the creation of a genuinely more reliable and precise detector. The proposed method improves overall accuracy and enhances system robustness by effectively compensating for the individual weaknesses of separate classifiers. This validates the hypothesis that combining a neural network's ability to extract complex, implicit patterns with feature-based models' capacity to analyze specific, predefined artifacts (such as geometric distortions) leads to a more powerful and resilient detector.

Keywords: face swapping; computer vision; artificial intelligence; deep learning; deepfake; information security.

Conflict of interest. The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding. Research was supported by Russian State Research FFZF-2025-0003.

For citation: Haleev M. D. Hybrid two-level method for automatic detection of face substitution in an image. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 53-69 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-53-69>.

Received 14.10.2025

Accepted 19.11.2025

Published 22.12.2025

Введение

Создание и распространение синтетических медиафайлов, в частности изображений с подмененными лицами (дипфейков), стало одной из ключевых проблем информационной безопасности. Алгоритмы на основе глубокого обучения достигли такого уровня реализма, что визуально отличить подделку от оригинала становится практически невозможно. Это создает значительные риски, связанные с распространением дезинформации, манипуляцией общественным мнением, мошенничеством и компрометацией личных данных, что требует разработки эффективных средств автоматического противодействия.

В предыдущем исследовании [1] был предложен метод, основанный на анализе геометрических признаков, извлеченных из лицевых ориентиров. Этот метод, используя модель персептрона, позволил подтвердить эффективность признакового анализа и достичь точности 0.682. Однако оставался значительный потенциал для дальнейшего повышения качества детекции за счет использования более сложных архитектур и комбинирования различных источников информации.

Настоящая работа является развитием предыдущих исследований и предлагает гибридный ансамблевый подход к обнаружению дипфейков. Ключевая гипотеза заключается в том, что максимальной эффективности можно достичь путем объединения сильных сторон двух

парадигм: способности глубоких сверточных сетей самостоятельно извлекать сложные текстурные и высокоуровневые признаки из пиксельного пространства и способности классических моделей целенаправленно анализировать конкретные, заранее определенные аномалии (геометрические, статистические и т.д.). Для проверки этой гипотезы был разработан двухуровневый метод, объединяющий нейросетевую модель EfficientNet и несколько классификаторов, обученных на различных наборах признаков.

Далее в работе представлен обзор релевантных исследований в данной области, подробно описан предложенный метод, методика формирования набора данных и разделения выборок для обучения. В заключительных разделах анализируются результаты проведенных экспериментов и формулируются итоговые выводы о преимуществах разработанного гибридного подхода.

Материалы и методы

Анализ современного состояния исследования

Чтобы обозначить место данной работы среди существующих решений, был проведен анализ ключевых исследований в области обнаружения дипфейков. Современные подходы можно условно разделить на несколько категорий в зависимости от используемых методов и архитектур.

Одной из основополагающих работ является исследование [2], в котором

авторы классифицируют манипуляции с лицами на четыре типа: генерация, замена, модификация и изменение выражения. Эта таксономия помогает систематизировать как сами угрозы, так и методы их обнаружения. В работе [3] предлагается унифицированная архитектура для выявления всех типов дипфейков, которая достигает точности 98% на наборе данных FaceForensics++, демонстрируя возможность создания универсальных детекторов. Исследование [4] концентрируется непосредственно на задаче обнаружения изображений с замененными лицами, что наиболее близко к тематике нашей работы, и представляет сравнительный анализ различных архитектур.

Многие современные решения используют сложные нейросетевые архитектуры. Например, в [5] для анализа видео применяются признаки, извлеченные из трех различных архитектур-трансформеров (DaViT, iFormer и GPViT), что позволяет достигать точности до 97.72%. Другим эффективным подходом является использование ансамблей. В работе [6] предложен двухуровневый ансамбль AWARE-NET, объединяющий модели Xception, Res2Net101 и EfficientNet-B7 с помощью механизма адаптивного взвешивания, что значительно повышает устойчивость детектора. Для обработки видеоданных был предложен SFormer [7] – сквозной пространственно-временной трансформер, который эффективно моделирует как пространственные, так и временные зависимости. Некоторые исследователи также приме-

няют графовые нейронные сети (GNN), как в работе [8], где модель DFGNN используется для агрегации информации и уточнения признаков узлов графа, что повышает интерпретируемость и обобщающую способность детектора.

В последнее время появляются подходы, использующие новейшие достижения в области генеративных моделей. Метод DiffusionFake [9] применяет предварительно обученную модель Stable Diffusion для реконструкции лиц, что заставляет детектор изучать более устойчивые и обобщенные признаки подделки. Аналогично, работа DeCLIP [10] первой использует мощные представления из большой визуально-языковой модели CLIP для локализации областей подделки на изображении. Другой инновационный подход, Real Appearance Modeling (RAM) [11], обучает автоэнкодер восстанавливать исходные лица из искусственно "искаженных" версий, что заставляет модель изучать устойчивое представление подлинных лиц и лучше обобщать его на неизвестные типы подделок. В работе [12] предложен метод JRC, который совмещает неконтролируемую реконструкцию с контролируемой классификацией, используя не только явные артефакты, но и скрытые представления генеративных несоответствий.

Другие исследователи отходят от анализа артефактов и фокусируются на альтернативных признаках. В [13] предлагается метод FreqBlender, который работает в частотной области, смешивая

частотные характеристики реальных и поддельных лиц. Развивая этот подход, метод FreqDebias [14] борется со "спектральным смещением", когда детекторы чрезмерно полагаются на определенные частотные диапазоны, вводя аугментацию "Forgery Mixup" для диверсификации частотных характеристик. В работе [15] акцент смещается на выявление семантических изменений (например, несоответствие возраста), а не специфических артефактов. Метод, описанный в [16], основан на декомпозиции изображения и анализе таких характеристик, как текстура и степень "естественности". Работа [17] представляет детектор TAD, который разделяет признаки на две взаимоисключающие группы – текстурные несоответствия и артефакты – для уменьшения взаимных помех. В [18] предлагается использовать пространственные несоответствия во взгляде (GazeForensics) в качестве биометрического признака для обнаружения подделок.

Помимо традиционного обнаружения, исследуются и смежные задачи. Например, метод TSOM [19] решает задачу последовательного обнаружения дипфейков, предсказывая упорядоченную последовательность манипуляций, что позволяет восстановить историю создания подделки. Другие работы выходят за рамки анализа только визуальных данных. Так, фреймворк ART-AVDF [20] является аудиовизуальным и использует артикуляционное представление, объединяя слуховой энкодер и энкодер для губ, что повы-

шает надежность детекции. Существуют и проактивные методы защиты, такие как NullSwap [21], который не обнаруживает подделки, а "маскирует" исходные изображения, добавляя незаметные возмущения, чтобы предотвратить саму возможность качественной замены лица.

В то время как многие из упомянутых методов ориентированы на видеоданные или используют сложные мультимодальные подходы, наша работа сосредоточена исключительно на обнаружении подмены лиц в статичных изображениях, предлагая гибридный двухуровневый метод для повышения точности и надежности детекции.

Набор данных

Центральной задачей при подготовке исследования было формирование комплексного набора данных, способного обеспечить как широту охвата, так и специфичность для обучения устойчивой модели детекции. Существующие публичные датасеты, несмотря на их объем, зачастую ограничены определенным набором методов генерации дипфейков. Модель, обученная исключительно на таких данных, рискует переобучиться на выявление артефактов, свойственных только этим методам, и показывать низкую эффективность на новых, неизвестных типах подделок.

Чтобы преодолеть это ограничение, был применен двухэтапный подход. На первом этапе была выполнена целевая генерация 6000 дипфейк-изображений для внесения в обучающую выборку кон-

тролируемого разнообразия. Для этой цели были задействованы три различных программных инструмента, на основе каждого из которых было сгенерировано по 2000 изображений: Faceswap v3 Segmind API, расширение Roop для Stable Diffusion и репозиторий Wuhuikai на GitHub. Использование нескольких генераторов было продиктовано необходимостью обучить модель распознавать более общие, фундаментальные признаки подделки, а не специфические артефакты одного инструмента.

Процесс генерации основывался на 6000 исходных и 6000 целевых изображениях из набора данных CelebA. Во избежание пересечений и для обеспечения чистоты данных эти два набора были сделаны полностью непересекающимися. Каждый из трех генераторов обработал по 2000 уникальных пар изображений, что позволило получить сбалансированную выборку из 6000 синтетических изображений (результат работы генератора показан на рис. 1). К ним было добавлено 8000 оригинальных фотографий

для формирования первичного сбалансированного набора.

На втором этапе решалась задача масштабирования данных и обеспечения их обобщающей способности. Хотя наш сгенерированный набор и вносил разнообразие методов, его объем (14000 изображений) был недостаточен для обучения глубокой нейронной сети, устойчивой к переобучению. Именно поэтому первичный набор был объединен с 20 000 изображений из авторитетного тематического датасета DF40 [22]. Добавление данных из DF40 позволило не только значительно увеличить итоговый размер выборки, но и обогатить ее изображениями из другого источника, что критически важно для повышения способности модели к генерализации.

Таким образом, итоговый гибридный набор данных объемом 34000 изображений объединил в себе преимущества двух подходов: специфичность и разнообразие методов из контролируемой генерации и масштаб с широким охватом из устоявшегося публичного датасета.



Рис. 1. Входные оригинальные изображения (1 и 2) и изображение подмены лица с помощью Roop (3)

Fig. 1. Original input images (1 and 2) and the face-swapped image generated using Roop (3)

Для корректного обучения и объективной оценки метода была применена многоуровневая стратегия разделения данных, направленная на предотвраще-

ние утечки информации между базовыми моделями и мета-моделью (как показано на рис. 2).

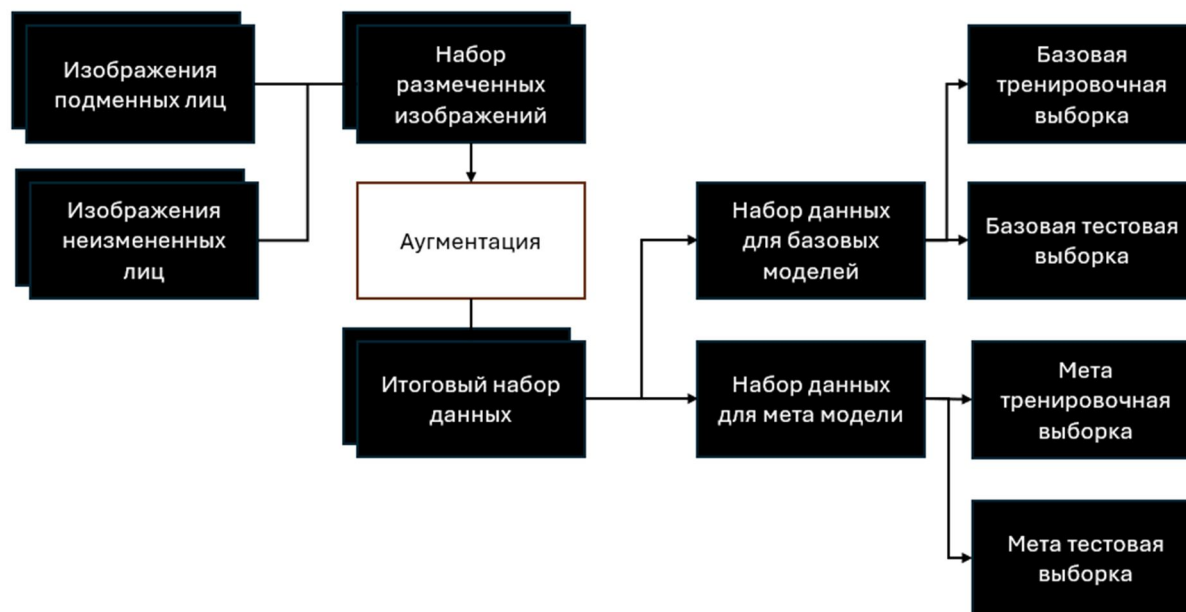


Рис. 2. Схема разделения набора данных для обучения и оценки

Fig. 2. Dataset splitting scheme for ensemble training and evaluation

Процесс был организован следующим образом:

- Формирование итогового набора таким образом, чтобы исходные изображения с подмененными и неизменными лицами были объединены в единый размеченный набор данных. К этому набору был применен комплекс техник аугментации (повороты, отражения, изменение яркости) для увеличения его объема и разнообразия, что способствует повышению устойчивости моделей.

- Первичное разделение выполнено таким образом, что итоговый аугментированный набор данных был разделен на два основных непересекающихся подмножества:

- Набор данных для базовых моделей использовался исключительно для обучения и тестирования четырех признаков классификаторов и глубокой нейронной сети.

- Набор данных для мета-модели является второй, полностью независимой частью, и был зарезервирован для обучения и финальной оценки мета-модели.

- Вторичное разделение выполнено так, что каждое из двух основных подмножеств было разделено на тренировочную и тестовую выборки в стандартной пропорции.

Такая строгая изоляция гарантирует, что мета-модель обучается на предсказаниях, которые базовые модели

сделали на совершенно новых для них данных. Это позволяет мета-классификатору эффективно учиться обобщать и корректировать ошибки базовых моделей, не подстраиваясь под артефакты их обучающей выборки, что ведет к созданию более надежной итоговой системы.

Метод определения подмены лиц на изображении

Предложенный метод состоит из двух шагов. На первом шаге предполагается, что значимые для детекции артефакты проявляются в нарушении естественной геометрии лица и антропометрических соотношений, которые можно зафиксировать с помощью набора признаков. Вторым шагом является использование сверточной нейронной сети (в данном случае EfficientNet), которая способна самостоятельно, без предварительной инженерии признаков, извлекать сложные паттерны и текстурные аномалии непосредственно из пиксельного пространства изображения.

Предложенный метод объединяет предсказания глубокой нейросетевой модели и четырех моделей, построенных на различных группах признаков. Для построения этих признаковых моделей рассматривались два основных алгоритма: случайный лес (Random Forest) и градиентный бустинг (CatBoost). Выбор итоговой модели для каждой из четырех групп признаков производился на основе экспериментальной оценки. В рамках метода предложено использовать тот классификатор, который продемонстрировал наибольшую прогностическую точность на соответствующем наборе данных, что позволило подобрать наиболее подходящую архитектуру для каждого типа признаков, максимизируя их индивидуальный вклад в итоговое решение.

Схема предложенного метода, включающая обучение базовых моделей и последующее обучение мета-модели на их предсказаниях, представлена на рис. 3.

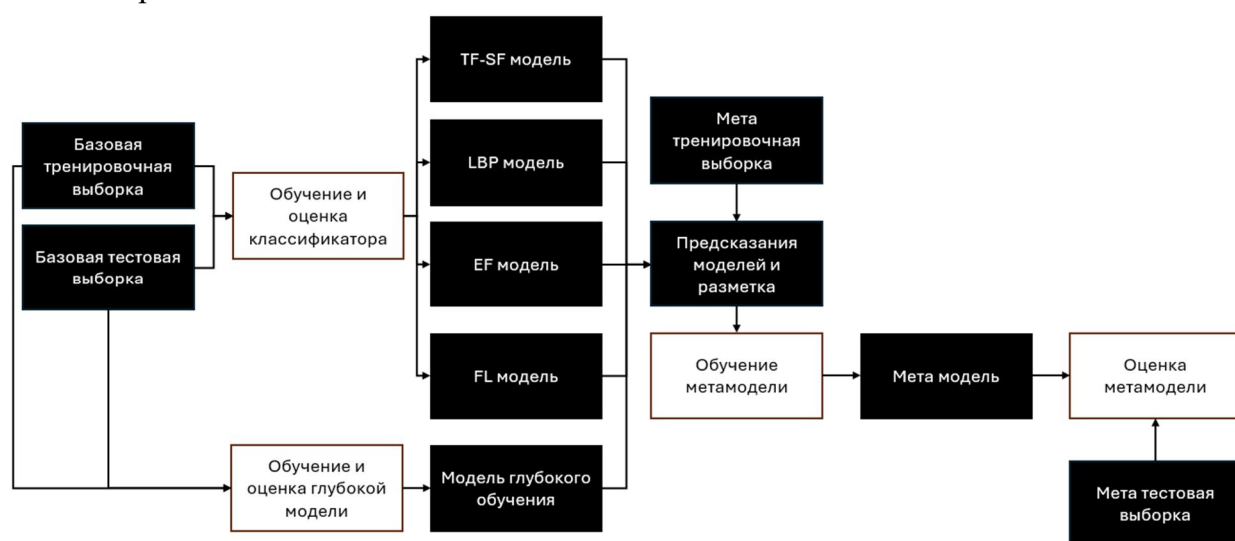


Рис. 3. Метод определения подмены лиц на изображении

Fig. 3. The proposed face spoofing detection method

В рамках метода были разработанные следующие модели:

1. Модели на основе экспертные признаки (EF), которые были рассчитаны на основе лицевых ориентиров, полученных с помощью фреймворка Google MediaPipe. Они включают в себя метрики, оценивающие форму лица, такие как его условная площадь и объем, а также набор соотношений ключевых межлицевых расстояний. В частности, анализировались отношения расстояний между глазами, носом, ртом и ушами для оценки пространственного расположения черт лица. Для классификации на основе этого набора признаков использовалась модель случайного леса.

2. Признаки на основе лицевых ориентиров (FL), которые использовались в качестве отдельного набора признаков использовались непосредственно координаты ключевых точек лица, извлеченные с помощью Google MediaPipe. Для этого набора также была обучена отдельная модель случайного леса.

3. Статистические и текстурные признаки (TF-SF) извлекались с помощью специализированных библиотек Python. Статистические признаки фиксируют распределение и изменчивость интенсивности пикселей, в то время как текстурные анализируют паттерны и градиенты изображения для выявления неестественных переходов и артефактов. Признаки были объединены в один набор, для которого была обучена модель на основе градиентного бустинга CatBoost.

4. Локальные бинарные паттерны (LBP) использовались для кодирования микротекстурной информации изображения путем сравнения значений пикселей в локальной окрестности. Этот подход обеспечивает детальное представление мелкозернистых структур, часто искажаемых при создании дипфейков. Для данного набора признаков была обучена модель CatBoost.

Итоговый сценарий работы системы, реализующей предложенный метод в режиме предсказания выглядит следующим образом (рис. 4): по одному входному изображению формируется вектор из пяти предсказаний (одно от глубокой модели EfficientNet и по одному от каждой из четырех описанных признаков моделей). Этот вектор подается на вход мета-модели, также реализованной на основе CatBoost. Выбор CatBoost в качестве мета-классификатора обусловлен его способностью эффективно агрегировать предсказания от разнородных базовых моделей и строить сильную решающую границу. В результате мета-модель формирует окончательное, более точное и устойчивое предсказание.

Результаты и их обсуждение

В данном разделе представлены результаты экспериментальной оценки эффективности предложенного гибридного подхода к детекции дипфейков. Исследование было разделено на два ключевых этапа. Сначала была проведена оценка производительности каждой из четырех

признаковых моделей по отдельности, чтобы определить базовое качество каждого набора признаков. Затем была проанализирована работа глубокой нейросетевой модели EfficientNet и итогового ан-

самбля, объединяющего все базовые классификаторы. В качестве основных метрик для всех экспериментов использовались точность (Accuracy) и F1-мера (F1-score).

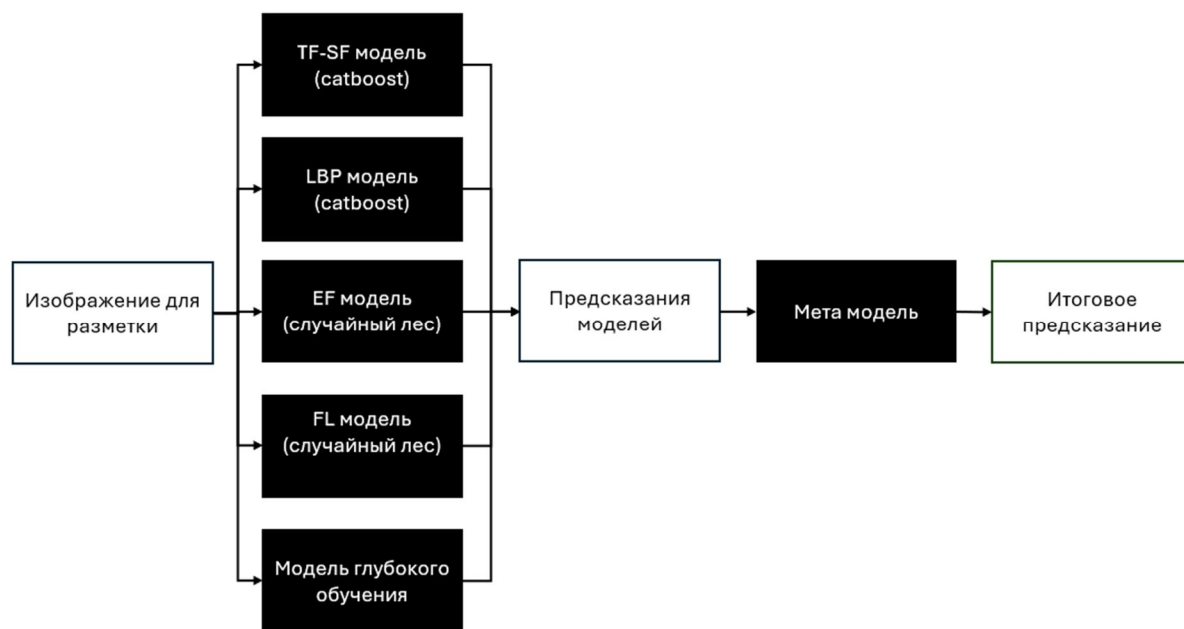


Рис. 4. Сценарий определения подмены лиц на изображении

Fig. 4. Face swap detection scenario

Результаты тестирования признаковых моделей

В табл. 1 представлены результаты оценки эффективности четырех признаковых моделей, обученных для задачи детекции дипфейков. Для каждой модели были рассчитаны метрики Ассигасу и F1-score.

Анализ полученных метрик показывает, что наилучшую производительность продемонстрировала модель, использующая в качестве признаков необработанные координаты лицевых ориентиров (facial landmarks). Данная модель достигла значения Ассигасу 0,772 и F1-score 0,711, что является самым высо-

ким показателем среди всех рассмотренных подходов. Этот результат свидетельствует о том, что прямое использование координат ключевых точек лица содержит наиболее сильный и явный сигнал для различения аутентичных и синтетических изображений.

Остальные три модели показали сопоставимые, хотя и более низкие, результаты. Модели, основанные на локальных бинарных паттернах (LBP) и объединенных текстурно-статистических признаках, продемонстрировали близкие значения Ассигасу (0,727 и 0,716 соответственно), подтверждая важность анализа микротекстур и распределения пикселей для выявления аномалий.

Наименее эффективной оказалась модель, построенная на экспертных признаках (Accuracy 0,704, F1-score 0,614). Заметное снижение метрики F1-score по сравнению с Accuracy может указывать на сложности в классификации одного из классов. Можно предположить, что, хотя вычисление высокоуровневых признаков (площадей, объемов, соотношений) обеспечивает интерпретируемость, оно приводит к потере части важной

информации, содержащейся в исходных координатах ориентиров.

В целом, полученные результаты, хоть и недостаточны для самостоятельного практического применения, подтверждают корректность выбора всех четырех наборов признаков. Каждый из них улавливает уникальные аспекты данных, что делает их ценными компонентами для последующего ансамблирования в рамках мета-модели.

Таблица 1. Метрики признаковых моделей

Table 1. Feature-Based Model Metrics

Экспертные характеристики / Expert characteristics		Лицевые ориентиры / Facial landmarks		Текстурные и статистические признаки / Textural and statistical features		Локальные бинарные паттерны / Local binary patterns	
Точность	F1-мера	Точность	F1-мера	Точность	F1-мера	Точность	F1-мера
0,703874	0,61442	0,771722	0,71132	0,716349	0,661619	0,727293	0,684077

Результаты тестирования предложенного метода

В табл. 2 представлены результаты экспериментов по оценке производительности глубокой модели (EfficientNet) и ансамбля, объединяющего ее с четырьмя признаковыми классификаторами. Исследовалось влияние различных методов предобработки изображений на итоговые метрики, а также эффективность самого ансамблевого подхода.

Для оптимизации вычислительных ресурсов и эффективной проверки гипотез эксперименты были разделены на два этапа. Первый, поисковый, этап включал в себя широкое тестирование всех семи

методов предобработки на сокращенном наборе данных (половина от общего объема, half) с ограниченным числом эпох обучения (8). Такой подход позволил быстро выявить общие тенденции и определить наиболее перспективные методы, поскольку этой конфигурации было достаточно для выявления относительной эффективности подходов при меньших временных затратах. На втором, основном, этапе лучшие из выявленных методов (RGB и Grayscale) были подвергнуты полноценному обучению на полном наборе данных (full) в течение 25 эпох для достижения максимально возможного качества и точной оценки их потенциала.

Таблица 2. Метрики глубоких моделей и предложенного метода**Table 2.** Metrics of deep models and the proposed method

Формат обработки / Processing format	Число эпох / Number of epochs	Размер набора данных / Dataset size	Точность EfficientNet / Accuracy EfficientNet	F1-мера EfficientNet / F1-Measure EfficientNet	Точность метода / Method accuracy	F1-мера метода / F1-method measure
rgb	8	0,5	0,852046	0,8375	0,888159	0,878362
grayscale	8	0,5	0,85336	0,844186	0,883563	0,87156
srm	8	0,5	0,738236	0,735515	0,839352	0,818676
dct	8	0,5	0,644342	0,653148	0,81265	0,781298
ela	8	0,5	0,641935	0,672407	0,815933	0,784635
svd	8	0,5	0,603195	0,635578	0,811556	0,780077
dft	8	0,5	0,528781	0,577097	0,811337	0,778974
rgb	25	1	0,90545	0,897192	0,920552	0,914164
grayscale	25	1	0,904137	0,896601	0,913548	0,90673

Анализ результатов одиночной модели EfficientNet, особенно на полном наборе данных, показал, что наиболее эффективными являются базовые представления изображений. Модели, обученные на стандартных RGB-изображениях и их Grayscale-версиях, продемонстрировали наилучшие и практически идентичные результаты, достигнув Accuracy 0,905 и F1-score 0,897. Это говорит о том, что архитектура EfficientNet способна самостоятельно извлекать необходимые признаки из стандартного пиксельного пространства без необходимости в сложной предварительной обработке.

Напротив, методы предобработки, основанные на частотных преобразованиях (DCT, DFT) или анализе уровня ошибок (ELA), показали значительное снижение

производительности. Это может быть связано с тем, что такие преобразования нарушают локальные пространственные зависимости в изображении, которые критически важны для сверточных нейронных сетей.

Ключевым выводом экспериментов является стабильное и повсеместное улучшение метрик при использовании метода. Во всех без исключения конфигурациях результирующая модель превзошла по качеству соответствующую ей одиночную глубокую модель.

Наивысший результат всего исследования был достигнут именно ансамблем, использующим глубокую модель на RGB-изображениях: Accuracy 0,921 и F1-score 0,914. Это представляет собой

значимое улучшение по сравнению с лучшей одиночной моделью.

Особенно ярко преимущество предложенного метода проявляется на слабых глубоких моделях. Например, для предобработки DFT, где EfficientNet показала Accurasy всего 0,528, метод смог поднять этот показатель до 0,811. Это демонстрирует, что признаковые модели вносят устойчивый и независимый вклад, компенсируя недостатки глубокой модели и делая итоговую систему более надежной.

Таким образом, эксперименты подтвердили, что гибридный подход, совмещающий глубокое обучение с классическими признаковыми моделями, позволяет достичь более высокой точности и устойчивости по сравнению с использованием исключительно глубокого ней-росетевого подхода.

Выводы

В настоящей работе была поставлена и решена задача повышения эффективности автоматического выявления подмены лица на изображениях на статичных изображениях. В качестве развития предыдущих исследований, основанных на признаковых методах, был разработан и протестирован гибридный двухуровневый метод, объединяющий сильные стороны глубокого обучения и классических моделей машинного обучения.

Предложенная архитектура нейронной сети, в рамках разработанного метода состоит из пяти базовых моделей (сверточной нейронной сети EfficientNet

и четырех классификаторов на различных наборах признаков: геометрических, текстурных, статистических и основанных на лицевых ориентирах) и мета-модели CatBoost, агрегирующей их предсказания. Эксперименты, проведенные с использованием строгой методологии разделения данных для предотвращения переобучения, убедительно продемонстрировали преимущество предложенного метода.

Ключевым результатом исследования является достижение итоговой точности 0.921 и F1-меры 0.914, что существенно превосходит показатели любой из моделей, использованных по отдельности. Было установлено, что предложенный метод не только повышает общую точность, но и значительно увеличивает надежность системы, эффективно компенсируя слабости отдельных классификаторов. Это подтверждает основную гипотезу работы о том, что синергия между способностью нейросети извлекать сложные паттерны из пикселей и способностью признаковых моделей анализировать специфические артефакты (такие как геометрические искажения) ведет к созданию более мощного и устойчивого детектора.

Таким образом, данное исследование вносит вклад в область информационной безопасности, предлагая валидированную и эффективную архитектуру для противодействия распространению синтетического контента.

В качестве направлений для будущей работы планируется дальнейшее

расширение набора данных за счет использования более разнообразных генераторов дипфейков, а также исследование других архитектур глубокого обучения в качестве базовой модели. Дополни-

тельно, перспективным видится анализ различных мета-классификаторов и добавление новых групп признаков для дальнейшего повышения точности и обобщающей способности метода.

Список литературы

1. Халеев М.Д. Интеллектуальный метод автоматического выявления подмены лица на изображении // Системы анализа и обработки данных. 2025. Т. 97, №1. С. 105-120.
2. Tolosana R., Vera-Rodriguez R., Fierrez J., Morales A., Ortega-Garcia J. Deepfakes and beyond: A Survey of face manipulation and fake detection // Information Fusion. 2020. Vol. 64. P. 131–148. [https://doi: 10.1016/J.INFFUS.2020.06.014](https://doi.org/10.1016/J.INFFUS.2020.06.014).
3. Nawaz M., Javed A., Irtaza A. A deep learning model for FaceSwap and face-reenactment deepfakes detection // Applied Soft Computing. 2024. Vol. 162. P. 111854. [https://doi: 10.1016/J.ASOC.2024.111854](https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2024.111854).
4. Ding X. и др. Swapped face detection using deep learning and subjective assessment // EURASIP Journal on Information Security. 2020. Vol. 2020, № 1. [https://doi: 10.1186/S13635-020-00109-8](https://doi.org/10.1186/S13635-020-00109-8).
5. Essa E. Feature fusion Vision Transformers using MLP-Mixer for enhanced deepfake detection // Neurocomputing. 2024. Vol. 598. P. 128128. [https://doi: 10.1016/J.NEUCOM.2024.128128](https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2024.128128)
6. Salman M., et al. AWARE-NET: Adaptive Weighted Averaging for Robust Ensemble Network in Deepfake Detection // Computer Vision and Pattern Recognition. 2025.
7. Kingra S., Aggarwal N., Kaur N. SFormer: An end-to-end spatio-temporal transformer architecture for deepfake detection // Forensic Science International: Digital Investigation. 2024. Vol. 51. P. 301817. [https:// doi: 10.1016/J.FSIDI.2024.301817](https://doi.org/10.1016/J.FSIDI.2024.301817)
8. Khalid F., Javed A., ul ain Q., Ilyas H., Irtaza A. DFGNN: An interpretable and generalized graph neural network for deepfakes detection // Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 222. P. 119843. [https://doi: 10.1016/J.ESWA.2023.119843](https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2023.119843)
9. Sun K., et al. DiffusionFake: Enhancing Generalization in Deepfake Detection via Guided Stable Diffusion // 38th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024). 2024.
10. Smeu S., Oneata E., Oneata D. DeCLIP: Decoding CLIP Representations for Deepfake Localization // Proceedings of the Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2025. С. 149-159.
11. Tian J., et al. Real Appearance Modeling for More General Deepfake Detection // ECCV. 2025.
12. Yan B., Li C. T., Lu X. JRC: Deepfake detection via joint reconstruction and classification // Neurocomputing. 2024. Vol. 598. P. 127862. [https://doi: 10.1016/J.NEUCOM.2024.127862](https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2024.127862)

13. Li H., et al. FreqBlender: Enhancing DeepFake Detection by Blending Frequency Knowledge // 38th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024). 2024.
14. Kashiani H., Talemi N. A., Afghah F. FreqDebias: Towards Generalizable Deepfake Detection via Consistency-Driven Frequency Debiasing // CVPR. 2025.
15. Zou M., et al. Semantic Contextualization of Face Forgery: A New Definition, Dataset, and Detection Method // Computer Vision and Pattern Recognition. 2025.
16. Chew C. J., et al. Preserving manipulated and synthetic Deepfake detection through face texture naturalness // Journal of Information Security and Applications. 2024. Vol. 83. P. 103798. [https://doi: 10.1016/J.JISA.2024.103798](https://doi.org/10.1016/J.JISA.2024.103798).
17. Gao J., et al. Texture and artifact decomposition for improving generalization in deep-learning-based deepfake detection // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024. Vol. 133. P. 108450. [https://doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2024.108450](https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2024.108450)
18. He Q., Peng C., Liu D., Wang N., Gao X. GazeForensics: DeepFake detection via gaze-guided spatial inconsistency learning // Neural Networks. 2024. Vol. 180. P. 106636. [https://doi: 10.1016/J.NEUNET.2024.106636](https://doi.org/10.1016/J.NEUNET.2024.106636)
19. Li Y., et al. Texture Shape and Order Matter: A New Transformer Design for Sequential DeepFake Detection // Proceedings of the Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2025. P. 202-211.
20. Wang Y., Huang H. Audio–visual deepfake detection using articulatory representation learning // Computer Vision and Image Understanding. 2024. Vol. 248. P. 104133. [https://doi: 10.1016/J.CVIU.2024.104133](https://doi.org/10.1016/J.CVIU.2024.104133)
21. Wang T., Cheng H., Zhang X., Wang Y. NullSwap: Proactive Identity Cloaking Against Deepfake Face Swapping // CVPR. 2025.
22. Yan Z., et al. DF40: Toward Next-Generation Deepfake Detection // arXiv preprint arXiv:2406.13495. 2024.

References

1. Haleev M. D. Intelligent method for automatic detection of face substitution in an image. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*. 2025; 97(1): 105-120. (In Russ.).
2. Tolosana R., Vera-Rodriguez R., Fierrez J., Morales A., Ortega-Garcia J. Deepfakes and beyond: A Survey of face manipulation and fake detection. *Information Fusion*. 2020; 64: 131–148. [https://doi: 10.1016/J.INFFUS.2020.06.014](https://doi.org/10.1016/J.INFFUS.2020.06.014).
3. Nawaz M., Javed A., A. Irtaza A deep learning model for FaceSwap and face-reenactment deepfakes detection. *Appl Soft Comput*. 2024; 162: 111854. [https://doi: 10.1016/J.ASOC.2024.111854](https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2024.111854).

4. Ding X., Raziei Z., Larson E. C., E Olinick. V., Krueger P., Hahsler M. Swapped face detection using deep learning and subjective assessment. *EURASIP J Inf Secur.* 2020; 2020(1). [https://doi: 10.1186/S13635-020-00109-8](https://doi.org/10.1186/S13635-020-00109-8).
5. Essa E. Feature fusion Vision Transformers using MLP-Mixer for enhanced deepfake detection. *Neurocomputing.* 2024; 598: 128128. [https://doi: 10.1016/J.NEUCOM.2024.128128](https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2024.128128).
6. Muhammad Salman, Iqra Tariq, Mishal Zulfiqar, Muqadas Jalal, Sami Aujla, Sumbal Fatima, AWARE-NET: Adaptive Weighted Averaging for Robust Ensemble Network in Deepfake Detection. *Computer Vision and Pattern Recognition.* 2025.
7. Kingra S., N Aggarwal., Kaur N. SFormer: An end-to-end spatio-temporal transformer architecture for deepfake detection. *Forensic Science International: Digital Investigation.* 2024; 51: 301817. [https://doi: 10.1016/J.FSIDI.2024.301817](https://doi.org/10.1016/J.FSIDI.2024.301817).
8. Khalid F., Javed A., ul ain Q., Ilyas H., Irtaza A. DFGNN: An interpretable and generalized graph neural network for deepfakes detection. *Expert Syst Appl.* 2023; 222: 119843. [https://doi: 10.1016/J.ESWA.2023.119843](https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2023.119843).
9. Ke Sun, Shen Chen, Taiping Yao, Hong Liu, Xiaoshuai Sun, Shouhong Ding, Rongrong Ji, DiffusionFake: Enhancing Generalization in Deepfake Detection via Guided Stable Diffusion. *38th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024).* 2024.
10. Stefan Smeu, Elisabeta Oneata, Dan Oneata, DeCLIP: Decoding CLIP Representations for Deepfake Localization. *Proceedings of the Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV).* 2025. P. 149-159.
11. Jiahe Tian, Cai Yu, Xi Wang, Peng Chen, Zihao Xiao, Jiao Dai, Jizhong Han, and Yesheng Chai, Real Appearance Modeling for More General Deepfake Detection. *ECCV*, 2025.
12. Yan B., Li C. T., Lu X. JRC: Deepfake detection via joint reconstruction and classification, *Neurocomputing.* 2024; 598: 127862. [https://doi: 10.1016/J.NEUCOM.2024.127862](https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2024.127862).
13. Hanzhe Li, Jiaran Zhou, Yuezun Li, Baoyuan Wu, Bin Li, Junyu Dong, FreqBlender: Enhancing DeepFake Detection by Blending Frequency Knowledge. *38th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024).* 2024.
14. Hossein Kashiani, Niloufar Alipour Talemi, Fatemeh Afghah, FreqDebias: Towards Generalizable Deepfake Detection via Consistency-Driven Frequency Debiasing. *CVPR*, 2025.
15. Mian Zou, Baosheng Yu, Yibing Zhan, Siwei Lyu, and Kede Ma, Semantic Contextualization of Face Forgery: A New Definition, Dataset, and Detection Method. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2025.
16. Chew C. J., Lin Y. C., Chen Y. C., Fan Y. Y., Lee J. S. Preserving manipulated and synthetic Deepfake detection through face texture naturalness. *Journal of Information Security and Applications.* 2024; 83: 103798. [https://doi: 10.1016/J.JISA.2024.103798](https://doi.org/10.1016/J.JISA.2024.103798).

17. Gao J., et al. Texture and artifact decomposition for improving generalization in deep-learning-based deepfake detection. *Eng Appl Artif Intell*. 2024; 133: 108450. [https://doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2024.108450](https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2024.108450).
18. He Q., Peng C., Liu D., Wang N., Gao X. GazeForensics: DeepFake detection via gaze-guided spatial inconsistency learning. *Neural Networks*. 2024; 180: 106636. [https://doi: 10.1016/J.NEUNET.2024.106636](https://doi.org/10.1016/J.NEUNET.2024.106636).
19. Yunfei Li, Yuezun Li, Xin Wang, Baoyuan Wu, Jiaran Zhou, Junyu Dong, Texture Shape and Order Matter: A New Transformer Design for Sequential DeepFake Detection. *Proceedings of the Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2025. P. 202-211.
20. Wang Y., H. Huang Audio–visual deepfake detection using articulatory representation learning. *Computer Vision and Image Understanding*. 2024; 248: 104133. [https://doi: 10.1016/J.CVIU.2024.104133](https://doi.org/10.1016/J.CVIU.2024.104133).
21. Tianyi Wang, Harry Cheng, Xiao Zhang, Yinglong Wang, NullSwap: Proactive Identity Cloaking Against Deepfake Face Swapping, *CVPR*, 2025.
22. Yan Z., et al. DF40: Toward Next-Generation Deepfake Detection. *arXiv preprint arXiv:2406.13495*, 2024.

Информация об авторе / Information about the Author

Халеев Михаил Дмитриевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Haleev.M@iias.spb.su

Mikhail D. Haleev, Cand. of Sci. (Engineering), Junior Research Fellow, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: Haleev.M@iias.spb.su

УДК 625.7:004.9

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-70-92>

Выбор разрядности компонентов нелинейного нейрона при реализации на ПЛИС

О.Г. Бондарь¹ ✉, Е.О. Брежнева¹, Д.А. Голубев¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: b.og@mail.ru

Резюме

Цель работы: исследование зависимости между погрешностью данных на входе нейрона, предназначенного для применения в искусственной нейронной сети на ПЛИС, и погрешностью вычислений, а также разработка методики выбора разрядности компонентов нейрона, направленной на снижение аппаратных затрат при сохранении точности вычислений, адекватной точности исходных данных.

Методы. В работе использовались методы проектирования цифровых устройств на основе языка описания VHDL, анализа погрешностей вычислений относительно эталонной модели с плавающей точкой, а также методы синтеза устройств и оценки используемых аппаратных ресурсов ПЛИС встроенные в Xilinx ISE. Для обработки результатов применялись методы математической статистики, включая построение регрессионных моделей зависимости точности и аппаратных затрат от разрядности исходных данных.

Результаты. Предложен вариант оценки разрядности устройства обработки, позволяющий согласовать его разрядность с погрешностью исходных данных, исследовано влияние разрядности представления входных данных и весовых коэффициентов на точность вычислений и объем занимаемых нейроном аппаратных ресурсов, реализованном на ПЛИС. На основе VHDL-описания устройства создана параметризуемая модель, позволяющая согласованно изменять разрядность элементов нейрона при изменении разрядности входных сигналов. Для оценки влияния разрядности на точность вычислений использовалась эталонная модель на основе арифметики с плавающей точкой. Для каждого варианта разрядности проводились сравнительные вычисления выходного значения устройства, и рассчитывалась погрешность. Также анализировалось влияние разрядности на использование аппаратных ресурсов ПЛИС: количество LUT, регистров (FF). Апробация метода проводилась на базе ПЛИС Xilinx Spartan-3E XC3S500E (xc3s500e-4rq208), с использованием среды ISE Design Suite 14.7. Были реализованы несколько версий цифрового устройства с разрядностью входных данных от 4 до 12 бит (с учётом знакового разряда). Для каждого случая зафиксированы: тактовая частота работы, используемые ресурсы ПЛИС, точность измерений. На примере 12-битных исходных данных получена экспериментальная оценка объёма таблицы сигмоидальной функции (8192 ячеек), позволяющей достичь компромисса между точностью вычислений (максимальная приведенная погрешность – 0,12%) и объёмом аппаратных затрат (используется 1% аппаратных ресурсов ПЛИС).

Заключение. В данной работе представлено описание схемы нейрона с сигмоидальной функцией активации, реализованной на языке описания аппаратуры VHDL, пригодной для интеграции в нейросетевые решения на программируемых логических интегральных схемах. Устройство принимает входные целочисленные значения фиксированной разрядности со знаком, осуществляет вычисление суммы взвешенных входных сигналов и смещения и формирует выход нейрона на основе таблицы поиска, хранящейся в блочной памяти (RAM). Приведено описание работы модуля, его масштабирование и оптимизация. Предложенный метод позволяет определить оптимальную разрядность устройства обработки, обеспечивающий согласованный с погрешностью исходных данных уровень погрешности при минимальных аппаратных затратах. Полученные зависимости могут быть использованы на этапе проектирования для выбора параметров цифровых модулей обработки информации в системах реального времени и встраиваемых устройствах.

© Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Голубев Д.А., 2025

Ключевые слова: цифровая обработка; искусственный нейрон; вычисления с фиксированной точкой; программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС); VHDL; разрядность данных; аппаратная реализация; функция активации; таблица активации.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Голубев Д.А. Выбор разрядности компонентов нелинейного нейрона при реализации на ПЛИС // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 70-92. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-70-92>.

Поступила в редакцию 09.09.2025

Подписана в печать 03.10.2025

Опубликована 22.12.2025

Choice of component bit width for nonlinear neuron implementation on FPGA

Oleg G. Bondar ¹ ✉, Ekaterina O. Brezhneva ¹, Dmitry A. Golubev ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: b.og@mail.ru

Abstract

Purpose. Investigation of the relationship between input data error of a neuron intended for use in an artificial neural network implemented on FPGA, and computational error, as well as development of a methodology for selecting the bit width of neuron components aimed at reducing hardware costs while maintaining computational accuracy consistent with the accuracy of the input data.

Methods. The study employed methods of digital circuit design based on the VHDL hardware description language, error analysis of computations relative to a floating-point reference model, as well as device synthesis and FPGA resource utilization estimation methods integrated into Xilinx ISE. Mathematical statistics techniques, including the construction of regression models describing the dependence of accuracy and hardware costs on input data bit width, were applied to process the experimental results.

Results. A method has been proposed for estimating the bit width of the processing unit, enabling its precision to be matched with the inherent error level of the input data. The impact of the bit width of input data and weight coefficients on computational accuracy and the amount of FPGA hardware resources consumed by the implemented neuron was investigated. Based on the VHDL description of the device, a parameterized model was developed that enables coordinated adjustment of the neuron's internal component bit widths as the bit width of input signals is varied. To assess the effect of bit width on computational accuracy, a floating-point-based reference model was used. For each bit-width configuration, comparative computations of the device's output were performed, and the resulting error was quantified. The influence of bit width on FPGA resource utilization — specifically the number of LUTs and flip-flops (FFs) — was also analyzed. The proposed methodology was validated on the Xilinx Spartan-3E XC3S500E (xc3s500e-4pq208) FPGA platform using the ISE Design Suite 14.7 environment. Multiple versions of the digital neuron were implemented, with input data bit widths ranging from 4 to 12 bits (including the sign bit). For each variant, the operating clock frequency, utilized FPGA resources, and computational accuracy were recorded.

As a case study using 12-bit input data, an experimental evaluation determined that a sigmoid function lookup table with 8,192 entries achieves an optimal trade-off between computational accuracy (maximum relative error — 0.12%) and hardware cost (occupying only 1% of the FPGA's available resources).

Conclusion. This paper presents a description of a neuron circuit with a sigmoid activation function, implemented in the VHDL hardware description language and suitable for integration into neural network solutions on Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs). The device accepts signed integer input values of fixed bit width, computes the weighted sum of inputs and bias, and generates the neuron's output using a precomputed lookup table stored in block RAM. The operation, scaling, and optimization of the module are described in detail.

The proposed method enables determination of the optimal bit width for the processing unit, ensuring that computational error remains consistent with the error level of the input data while minimizing hardware resource consumption. The obtained relationships can be utilized during the design phase to select parameters for digital processing modules in real-time systems and embedded devices.

Keywords: digital processing; artificial neuron; fixed-point arithmetic; Field-Programmable Gate Array (FPGA); VHDL; data bit width; hardware implementation; activation function; lookup table.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Bondar O. G., Brezhnev E. O., Golubev D. A. Choice of component bit width for nonlinear neuron implementation on FPGA. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 70-92 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-70-92>.

Received 09.09.2025

Accepted 03.10.2025

Published 22.12.2025

Введение

Использование программно-аппаратных ускорителей на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) становится всё более актуальным при решении задач машинного обучения, особенно в условиях ограниченных ресурсов и необходимости высокой производительности на единицу энергопотребления [1]. Одним из ключевых элементов таких систем является искусственный нейрон – базовая вычислительная единица, реализующая операции скалярного произведения и применения функции активации. Актуальность аппаратной реализации ИНС на ПЛИС подчеркивается конкретными применениями, например, эффективной и экономичной реализацией нейронной сети на ПЛИС для цифрового предсказания (DPD) в многоканальных (MIMO) системах связи, где критически важны одновременно высокая пропускная способ-

ность, малое время отклика и рациональное использование аппаратных ресурсов [2]. Такая реализация позволяет решать практические инженерные задачи, такие как линеаризация усилителей мощности в базовых станциях сотовых сетей, что требует высокой скорости обработки и эффективного использования доступных ресурсов ПЛИС.

Дальнейшее расширение областей применения аппаратных ускорителей на ПЛИС включает даже экстремальные условия, например, космические миссии, где ценятся такие характеристики ПЛИС, как радиационная стойкость, энергоэффективность и гибкость. Как показывает обзор, ПЛИС рассматриваются как перспективная платформа для реализации нейронных сетей, способных выполнять задачи автономных операций, анализа данных сенсоров и сжатия данных непосредственно на борту космических аппаратов [3]. Анализ существующих

подходов, представленный в работах, подобных обзору [4], подтверждает растущий интерес к оптимизации архитектур и методов реализации нейронных сетей на ПЛИС, направленных на достижение максимальной эффективности и энергоэкономичности для разнообразных приложений.

Реализация нейронных сетей и других нелинейных устройств цифровой обработки на ПЛИС является одной из актуальных задач в области встраиваемых систем и распределённых вычислений (эдж-компьютинг) [5]. Искусственный нейрон может быть реализован различными способами: от простых сумматоров и умножителей до сложных параллельных архитектур с конвейерной обработкой. Среди известных решений можно выделить работы, в которых используются VHDL/Verilog для проектирования параметризуемых модулей, поддерживающих различные типы активации и форматы представления чисел [6]. Анализ существующих подходов к аппаратной реализации, включая обзоры открытых инструментов [7], подчеркивает важность оптимизации базового вычислительного элемента – отдельного искусственного нейрона. Повышение точности вычислений на уровне отдельного нейрона, например, путем выбора подходящей функции активации, оптимизации разрядности представления данных или минимизации ошибок округления, является критически важным для обеспечения общей точности и надежности работы всей нейронной сети.

Функция активации является одним из самых ресурсоёмких этапов вычисления нейрона. Одним из эффективных способов её реализации является использование внешней таблицы (LUT), хранящейся в блочной памяти ПЛИС. В работах [1,8] представлено описание цифрового нейрона с использованием блочной памяти для реализации функции активации. Такой подход позволяет исключить дорогостоящие операции возведения в степень или деления, характерные для сигмоидальной функции, за счёт предварительного расчёта таблицы значений. Это делает возможным снижение аппаратных затрат и задержки вычисления функции активации.

Как отмечается в работе [9], реализация традиционных функций активации, таких как гиперболический тангенс и сигмоида, на ПЛИС может быть ресурсоемкой из-за необходимости выполнения сложных операций, таких как возведение в степень (\exp) и деление ($1/x$), что может приводить к высокой задержке. В этой же работе рассматривается применение блочной памяти (LUT) для аппроксимации функции гиперболического тангенса. Такой подход позволяет обойти сложные вычисления, снижая аппаратные затраты и уменьшая вычислительную задержку.

Одним из ключевых направлений снижения аппаратных затрат является уменьшение разрядности используемых данных [10,11]. Многие исследования показывают, что переход от 32-битных чисел с плавающей точкой к 8- или да-

же 4-битным числам с фиксированной точкой позволяет значительно сократить использование DSP-блоков и регистров без существенной потери точности модели [12,13]. В [14] показано, что снижение разрядности может значительно уменьшить использование ресурсов ПЛИС (например, уменьшение LUT на более чем 40% при переходе с 8 бит до 4 бит) с минимальной потерей чувствительности. Актуальность точного и эффективного квантования подчеркивается необходимостью обеспечения гарантий точности, особенно в задачах регрессии и критически важных приложениях. В работе [15] представлена методология и программный инструмент (Aster), которые позволяют автоматически определять оптимальное распределение разрядности (назначать смешанную точность) для представления чисел с фиксированной точкой в нейронной сети. Инструмент строго гарантирует, что совокупная ошибка округления на выходе сети не превысит заданную пользователем границу. Это особенно важно для применения нейронных сетей в системах управления и других задачах, где точность вычислений критична. Дальнейшее развитие методов квантования, включая разработку алгоритмов с настраиваемой точностью, таких как описанный в работе [16], где представлен алгоритм квантования с фиксированной точкой и регулируемой точностью для сверточных нейронных сетей, направлено на оптимизацию потока данных внутри сети и повышение эффектив-

ности использования ресурсов FPGA без ущерба для производительности.

Для количественной оценки влияния разрядности на точность вычислений применяются методы сравнения результатов работы с фиксированной точкой с эталонными значениями, полученными с помощью вычислений с плавающей точкой [13]. При этом проводится статистическая обработка ошибок – вычисление средней абсолютной и относительной погрешностей, дисперсии и доверительных интервалов.

Анализ существующих подходов к аппаратной реализации нейронных сетей на ПЛИС показывает, что важными особенностями ПЛИС являются параллелизм и конвейеризация [17]. Благодаря параллелизму можно многократно распределять и вычислять ресурсы, когда несколько модулей могут работать независимо, одновременно. Конвейеризация делает аппаратные ресурсы многоразовыми, что может значительно улучшить параллельную производительность. Однако, как отмечается в ряде работ, в условиях ограниченных ресурсов ПЛИС эти подходы могут быть недоступны или менее эффективны [8]. Например, в [18] для повышения вычислительной эффективности и минимизации использования ресурсов логических элементов (LUTs) и триггеров (flip-flops) применяются методы, такие как введение конвейерных регистров между промежуточными операциями и совместное использование арифметических операций (сложение, сдвиг) для разных вычислений нейронов.

Эффективность аппаратных ускорителей на ПЛИС подтверждается многочисленными исследованиями, демонстрирующими их превосходство в энергоэффективности и задержке по сравнению с традиционными процессорами и графическими ускорителями (GPU) для целого ряда задач ИНС, особенно в условиях ограниченных ресурсов [19]. Гибкость архитектуры ПЛИС позволяет адаптировать аппаратную реализацию под конкретную модель и сценарий использования, что делает их привлекательным выбором для разработки специализированных решений в области машинного обучения.

Таким образом, наряду с квантованием и оптимизацией функций активации, методы структурной оптимизации, такие как конвейеризация и параллелизм, играют важную роль в разработке эффективных аппаратных ускорителей на ПЛИС. Однако, как показывает практика [15, 16], в условиях ограниченных ресурсов поиск оптимального баланса между производительностью, точностью и аппаратной сложностью требует комплексного подхода, включающего все указанные методы.

В работах [20,21] предлагаются автоматизированные методы определения оптимальной разрядности, основанные на машинном обучении и статистическом анализе. В [20] описан метод автоматизированного гетерогенного квантования, который оптимизирует разрядность отдельных слоев или операций глубокой нейронной сети. Этот подход поз-

воляет находить баланс между точностью модели и задержкой, используя методы анализа чувствительности и оптимизации. В работе [21] авторы охватывают широкий спектр методов квантования, включая адаптивные и автоматизированные подходы, направленные на поиск оптимальной конфигурации разрядности для минимизации потерь точности при снижении вычислительной сложности и объема памяти. Такие автоматизированные методы позволяют эффективно снижать аппаратные затраты без существенной потери качества модели.

Использованный авторами статьи подход основывается на использовании информации о погрешности исходных данных, а гибкая и параметризуемая модель нелинейного единичного нейрона позволяет: исследовать влияние разрядности устройств обработки данных на погрешность вычислений, оценить объем используемых аппаратных средств конкретной ПЛИС, использовать полученные данные для обоснованного выбора разрядности на этапе проектирования.

Точность обработки данных, объем аппаратных средств и производительность – конкурирующие характеристики при построении цифровых устройств обработки данных. Известным способом повышения быстродействия и упрощения устройств является применение целочисленной математики. При этом ограничение разрядности вычислителей оправданно ограниченной точностью исходных данных. В работе пока-

зана взаимосвязь разрядности компонентов искусственного нейрона образующих каскадную структуру. Демонстрация подхода осуществляется на примере ПЛИС Xilinx Spartan-3E XC3S500E, и иллюстрирует его эффективность в условиях жестких ограничений аппаратных ресурсов.

Приведены выражения, позволяющие произвести оценку разрядности ступеней вычислителя, результаты оценки аппаратных затрат и погрешности вычислений при разной разрядности исходных данных, подтвержденные моделированием.

Материалы и методы

Математическая основа метода базируется на формуле скалярного произведения с последующим добавлением смещения и нелинейным преобразованием через функцию активации:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^N x_i w_i + b\right),$$

где x_i – входные значения; w_i – весовые коэффициенты; b – смещение; $f()$ – функция активации (в данном случае сигмоида), реализованная через таблицу, хранящуюся в блочной памяти ПЛИС.

В данной статье представлена VHDL-модель нелинейного нейрона, поддерживающая:

- обработку нескольких входных сигналов;
- учет весовых коэффициентов и смещения;

- нелинейное преобразование выхода с использованием табличного представления сигмоидальной функции;

- настройку разрядности входных сигналов, весовых коэффициентов и промежуточных результатов.

Структурная схема устройства представлена на рис. 1.

Она включает следующие основные компоненты:

- `[k*INPUT_WIDTH]` – вектор входных сигналов фиксированной разрядности;
- `[k*WEIGHT_WIDTH]` – вектор весовых коэффициентов;
- `Multiplier Array` – массив умножителей для вычисления произведений входных сигналов и весов и форматирования результата (отсечение младших разрядов и конкатенация для исключения последующего переполнения);
- `Summation Unit` – сумматор произведений и смещения;
- `Address Generator` – преобразует сумму в адрес для таблицы активации;
- `Activation Table` – хранит предварительно вычисленные значения сигмоидальной функции активации для положительных значений аргумента;
- `Output value Generator` – формирует значение сигмоидальной функции и преобразование беззнакового целого в знаковое.

Модель нейрона параметризуема и может быть адаптирована под различные задачи за счет изменения параметров общего назначения: количества входов нейрона (`INPUT_SIZE`), разрядности входных сигналов (`INPUT_WIDTH`), разрядности весовых коэффициентов (`WEIGHT_WIDTH`).

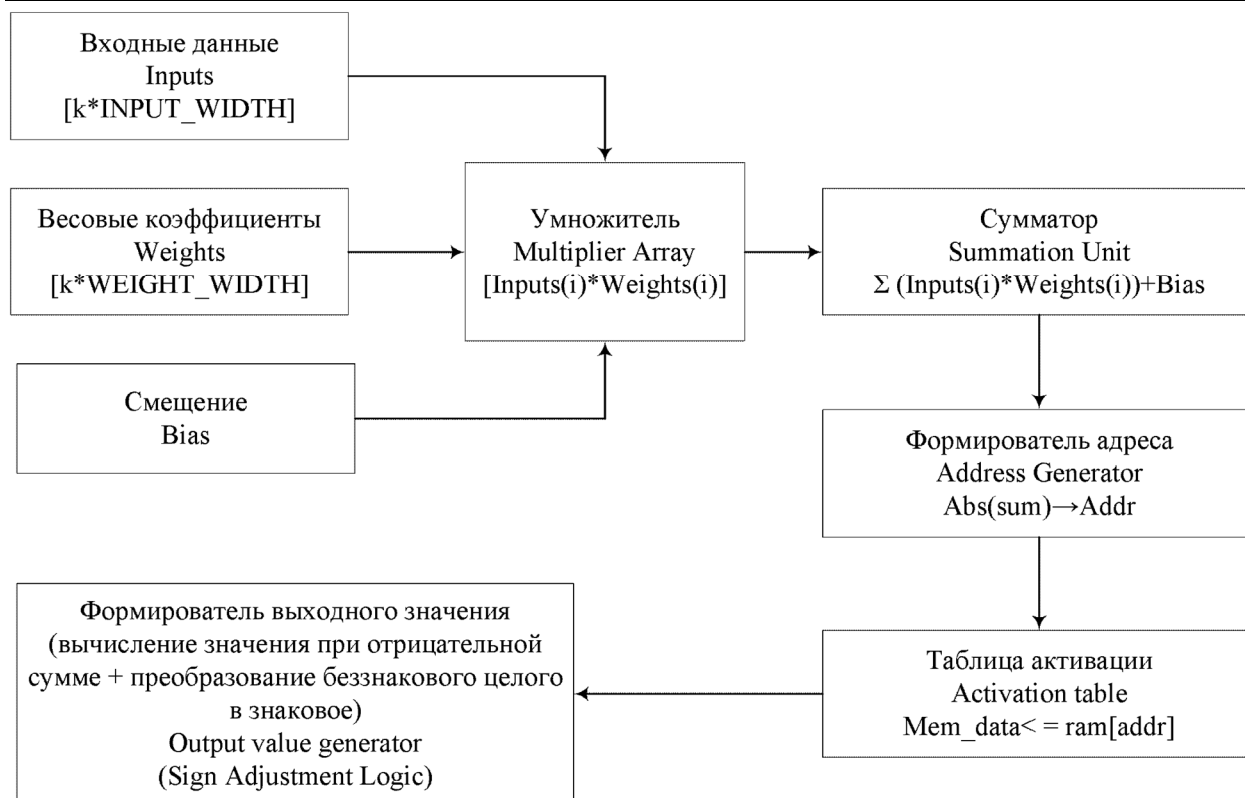


Рис. 1. Структурная схема нелинейного нейрона на ПЛИС

Fig. 1. Structural diagram of a nonlinear neuron implemented on an FPGA

Функционирование устройства:

1. Умножение входов на веса. Для каждого входа выполняется операция умножения соответствующего значения на связанный весовой коэффициент. Результат умножения хранится во временном массиве. Для снижения разрядности результата умножения используется усечение младших разрядов произведения с сохранением знака.

2. Суммирование результатов. После умножения все произведения суммируются с учетом знака и переполнения, смещение предварительно нормируется.

3. Формирование адреса для таблицы активации. В качестве адреса RAM, хранящей таблицу функции активации, принимается абсолютное значение сум-

мы. При этом используется свойство симметрии сигмоидальной функции, что уменьшает объем памяти, необходимой для хранения таблицы в два раза.

Значения функции активации для положительных значений аргумента вычисляются заранее и из внешнего файла загружаются в блочную память ПЛИС. Это позволяет избежать сложных вычислений в реальном времени и повысить производительность системы.

4. Верификация и оптимизация. Для целей анализа и тестирования предусмотрены отладочные сигналы.

Для реализации максимального быстродействия и с учетом ограниченных ресурсов ПЛИС все вычисления осуществляются в формате с фиксированной точкой.

Разработанная VHDL- модель может быть адаптирована под параллельную обработку с использованием конвейера для ускорения выполнения операций, допускает простую замену функций активации изменением содержимого таблицы в блочной RAM и заменой формирователя выходного значения.

В коде предусмотрены отладочные сигналы, которые позволяют наблюдать промежуточные значения (например, произведения входных данных на весовые коэффициенты), что облегчает тестирование и поиск ошибок.

Для каждого варианта разрядности входных данных и весов (3-7-9-11), соответствующих дифференциальным режимам распространённых 8-10-12 разрядных АЦП, производился синтез VHDL-описания устройства в среде ISE Design Suite 14.7. Фиксировались метрики использования аппаратных ресурсов ПЛИС: количество LUT (программируемая таблица истинности), количество регистров (FF), определялась тактовая частота после размещения конфигурируемых логических блоков и трассировки схемы. Таблицы LUT и регистры FF — два базовых ресурса ПЛИС, которые используются для реализации любой цифровой логики. Именно поэтому они считаются ключевыми метриками при сравнении аппаратных затрат. Эти параметры позволяют оценить зависимость «разрядность — точность — аппаратные затраты» [2].

Набор входных сигналов, весов и смещений генерировался случайным об-

разом в диапазоне 0-1. Для сгенерированных значений одновременно вычислялись референсные значения выходных сигналов с использованием арифметики с плавающей запятой. Для ПЛИС входные значения преобразовывались к целочисленным, требуемой разрядности предварительным масштабированием (умножением исходного числа на 2^n-1 , где n — разрядность данных без знака) и переводом в двоичную систему счисления.

Выходной сигнал VHDL- модели нейрона делился на 2^l-1 , где l — разрядность значений функции активации нейрона. Полученные значения (y_{VHDL}) сопоставлялись с референсными значениями (y_{float}). Рассчитывалась погрешность, приведенная к максимальному значению:

$$\delta = \frac{y_{VHDL} - y_{float}}{y_{max}} \cdot 100\%.$$

Для моделирования и отладки устройства использовался интегрированный с ISE Design Suite симулятор ISim. На основе полученных данных строились линейные регрессионные зависимости между разрядностью и приведенной погрешностью вычислений.

Методика определения разрядности компонентов нейрона. Предлагаемый вариант оценки разрядности компонентов модели нейрона ориентирован на обработку измерительной информации искусственной нейронной сетью и базируется на том, что разрешающая способность измерительных устройств согласуется с их погрешностью. Исходя из этого, целочисленный нормирующий

множитель для преобразования предварительно нормированных входных данных, представленных в диапазоне $[0, 1]$, выбирается так, чтобы единица младшего разряда соответствовала приведённой погрешности измерений. Сигмоидальная функция активации рассчитывается по следующей формуле:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-s}},$$

где $S = \sum_1^k x_i \cdot w_i + bias$; k – число входных параметров нейрона.

Оценим максимально допустимый шаг табличного представления сигмоидальной функции, обеспечивающий разрешение функции, соответствующее разрешению входных данных. Максимальное значение производной от сигмоидальной функции достигается при значении аргумента $s = 0$ и равно:

$$\left(\frac{dy}{ds} \right)_{\max} = \frac{e^{-s}}{(1 + e^{-s})^2} \Big|_{s=0} = \frac{1}{4}.$$

При этом допустимое абсолютное приращение функции при максимальном шаге аргумента ΔS_{\max} :

$$\Delta y_{\max} = \frac{\Delta s_{\max}}{4} = \frac{1}{2^n},$$

где n – разрядность нормированных исходных данных в двоичной системе счисления. Отсюда можно определить максимально допустимый шаг аргумента при табулировании функции:

$$\Delta s_{\max} = 4 \Delta y_{\max} = \frac{4}{2^n} = \frac{1}{2^{n-2}}.$$

Выразим переменную s в уравнении сигмоидальной функции через целочисленные значения нового аргумен-

та, при этом новый аргумент интерпретируется как номер строки, табулированной функции:

$$s = \frac{x}{2^{n-2}}.$$

Объём таблицы следует ограничить максимальным значением аргумента, при котором значение функции отличается от 1 меньше, чем на величину абсолютной погрешности (которая соответствует разрядности исходного представления входных данных):

$$y_{\max} = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x_{\max}}{2^{n-2}}}} \geq 1 - \frac{1}{2^n}.$$

Отсюда следует:

$$e^{-\frac{x_{\max}}{2^{n-2}}} < \frac{1}{2^n},$$

а x_{\max} определяется из:

$$x_{\max} > 2^{n-2} n \ln 2 = 0,693147 \cdot 2^{n-2} \cdot n, \quad (1)$$

где x_{\max} – это максимальное значение алгебраической суммы взвешенных входных данных и смещения, которому ставится в соответствие максимальное значение аргумента, и при котором значение y_{\max} отличается от единицы не более чем на $1/2^n$.

Альтернативно максимальное значение аргумента может выбираться в соответствии с выражением

$$s_{\max} = \frac{x_{\max}}{2^{n-2}} \approx 8 \div 9;$$

$$x_{\max} = (8 \div 9) \cdot 2^{n-2}. \quad (2)$$

Следует учитывать, что максимальное значение аргумента сигмоидальной функции должно быть достижимо, потому максимальное значение взвешенных сумм и смещения должно быть гарантировано равно, или больше x_{\max} .

Максимальное значение x_{\max} определяется разрядностью входных данных n и их количеством:

$$x_{\max} = (2^n - 1)(k + 1) \approx 2^{n-2} 2^{2+\log_2(k+1)},$$

где k – количество входных параметров, а единица учитывает смещение.

Оно достигается при $k > 1$. При значениях x_{\max} , превышающих условия (1) или (2), значение функции принимается равным максимальному.

Поскольку количество входов сумматора определяется количеством параметров, влияющих на значение функции, то для исключения переполнения разрядной сетки сумматор должен иметь количество дополнительных разрядов

$$m = \lceil \log_2(k + 1) \rceil.$$

Таблица сигмоидальной функции заполняется целочисленными масштабированными значениями.

$$Y(|x|) = (2^n - 1)y(|x|).$$

В силу симметрии сигмоидной функции относительно точки $(0, 0.5)$ её значения при отрицательном значении аргумента определяются как:

$$y(-s) = 1 - y(|x|).$$

Поэтому

$$Y(-x) = Y_{\max} - Y(|x|) = (2^n - 1) - Y(|x|). \quad (3)$$

Предлагаемый вариант оценки оптимального объема памяти (разрядности адреса) для табличной реализации сигмоидальной функции с учетом разрядности входных данных исследован экспериментально.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты исследования зависимости приведённой погрешности (δ) модели нелинейного нейрона и аппаратных затрат в виде таблиц поиска (LUT) и триггеров (FF) от разрядности исходных данных. Следует отметить, что при анализе аппаратных затрат учитывалось наличие дополнительных отладочных сигналов в коде, что приводит к повышенному расходу ресурсов, но не влияет на закономерность зависимости ресурсопотребления от разрядности данных. При максимальной разрядности исходных данных процент затрачиваемого оборудования от общих ресурсов ПЛИС составляет всего 1%, что особенно важно для встраиваемых устройств и встроенных вычислительных систем с ограниченными возможностями.

Таблица 1. Зависимость погрешности и аппаратных ресурсов от разрядности входных данных

Table 1. Dependence of error and hardware resources on input data bit-width

Разрядность / Bit depth	LUT / (%)	FF / (%)	δ , %	Тактовая частота, МГц / Clock frequency, MHz
4	55	86	12,02	138,274
8	70	129	1,04	92
10	79	143	0,34	85
12	81 (1%)	147 (1%)	0,1	130,174

При ссылке на разрядность далее учитывается и дополнительный знаковый разряд.

На рис. 2-9 представлены гистограммы распределений абсолютных ошибок, представляющие собой зависимость частот (f) от абсолютной погрешности

(Δ), и графики, демонстрирующие разброс приведенной погрешности (δ) для разрядности исходных данных 4-8-10-12 (M – порядковый номер измерения).

На рис. 10 представлен график зависимости приведенной погрешности от разрядности исходных данных.

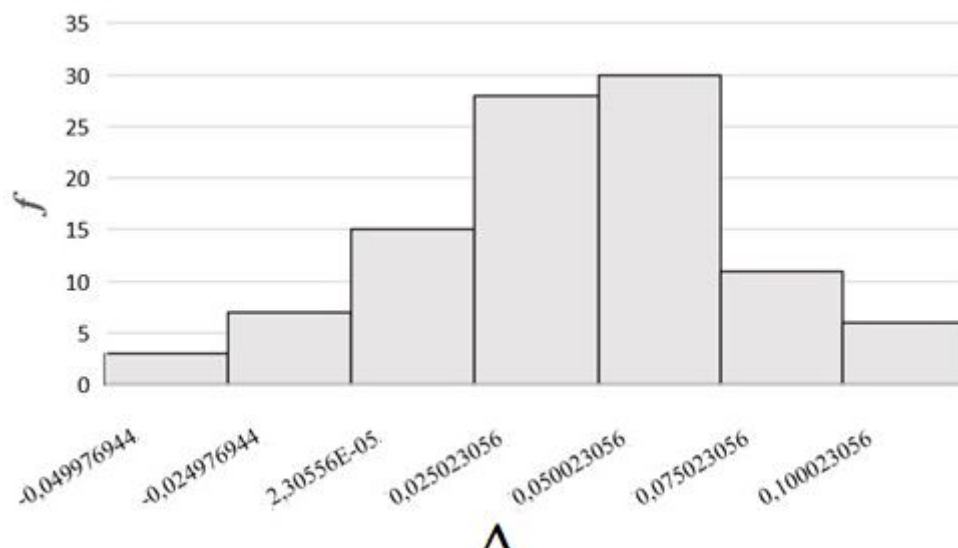


Рис. 2. Гистограмма распределений абсолютных ошибок ($w=4$)

Fig. 2. Histogram of absolute error distributions ($w=4$)

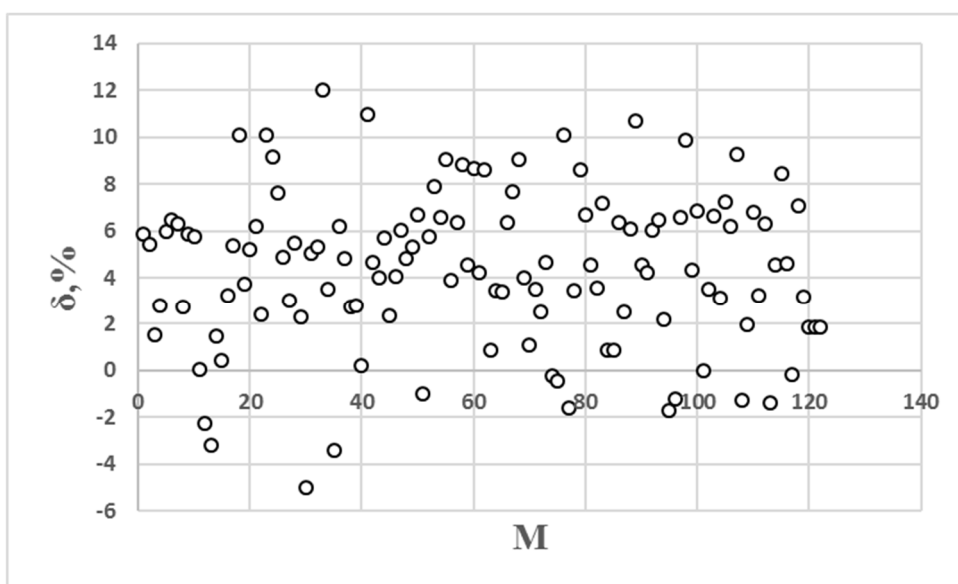


Рис. 3. Разброс приведенных погрешностей ($w=4$, $\delta_{\max} = 12.02\%$)

Fig. 3. Scatter plot of relative errors ($w=4$, $\delta_{\max} = 12.02\%$)

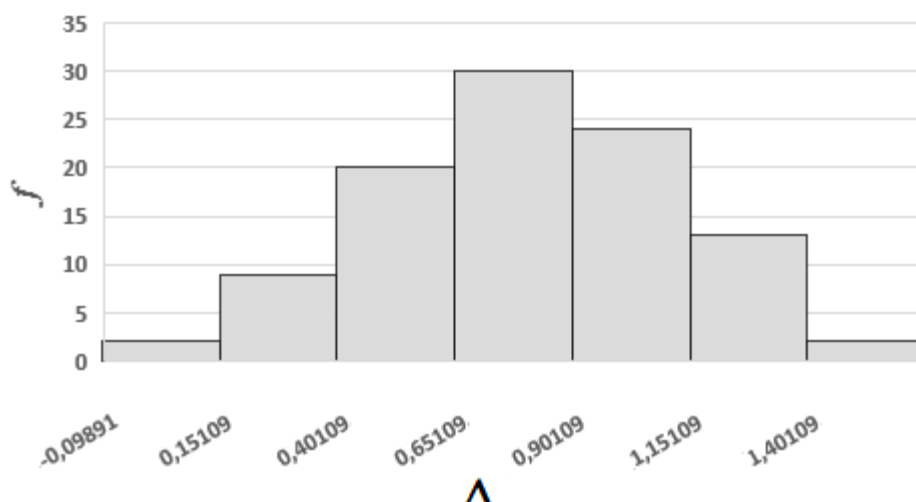


Рис. 4. Гистограмма распределений абсолютных ошибок ($w=8$)

Fig. 4. Histogram of absolute error distributions ($w=8$)

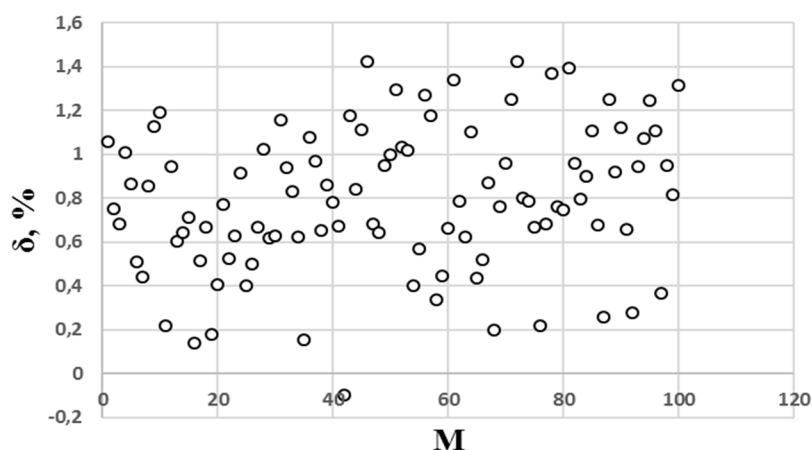


Рис. 5. Разброс приведенных погрешностей ($w=8$, $\delta_{\max} = 1,4\%$)

Fig. 5. Scatter plot of relative errors ($w=8$, $\delta_{\max} = 1.4\%$);

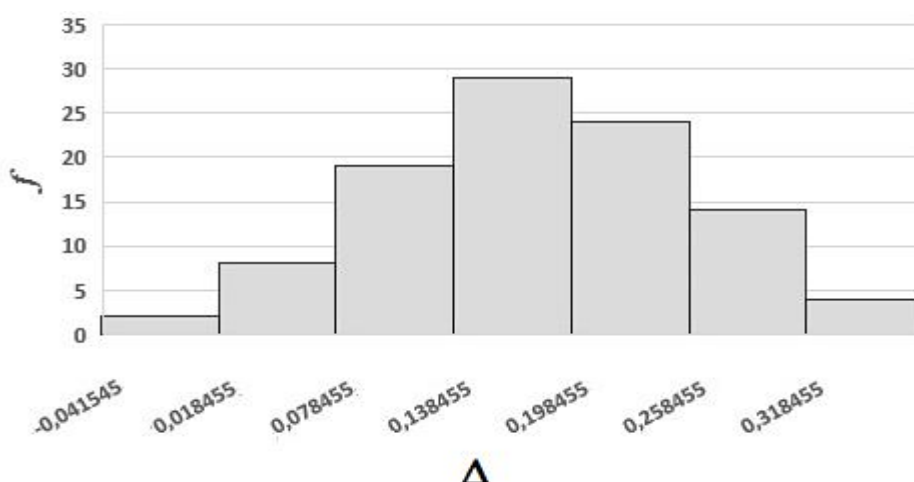


Рис. 6. Гистограмма распределений абсолютных ошибок ($w=10$)

Fig. 6. Histogram of absolute error distributions ($w=10$)

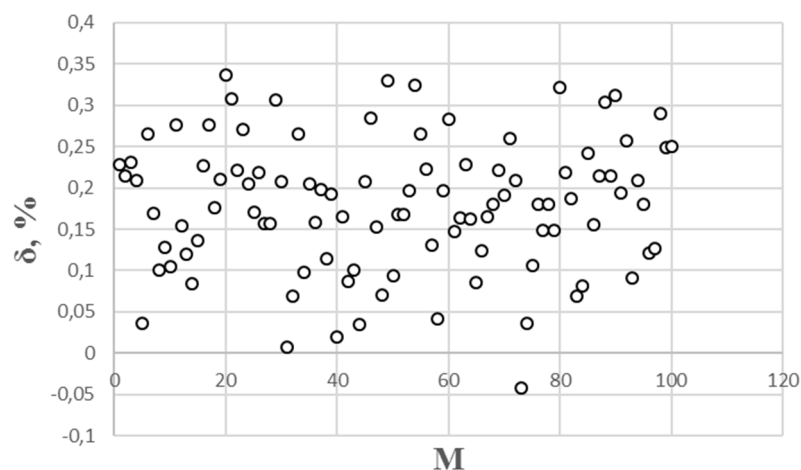


Рис. 7. Разброс приведенных погрешностей ($w=10$, $\delta_{\max} = 0,34\%$)

Fig. 7. Scatter plot of relative errors ($w = 10$, $\delta_{\max} = 0.34\%$)

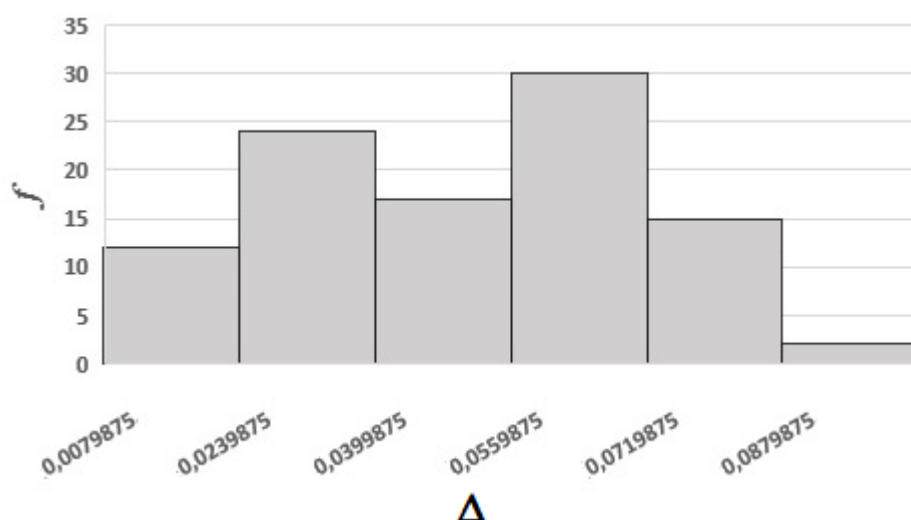


Рис. 8. Гистограмма распределений абсолютных ошибок ($w=12$)

Fig. 8. Histogram of absolute error distributions ($w = 12$)

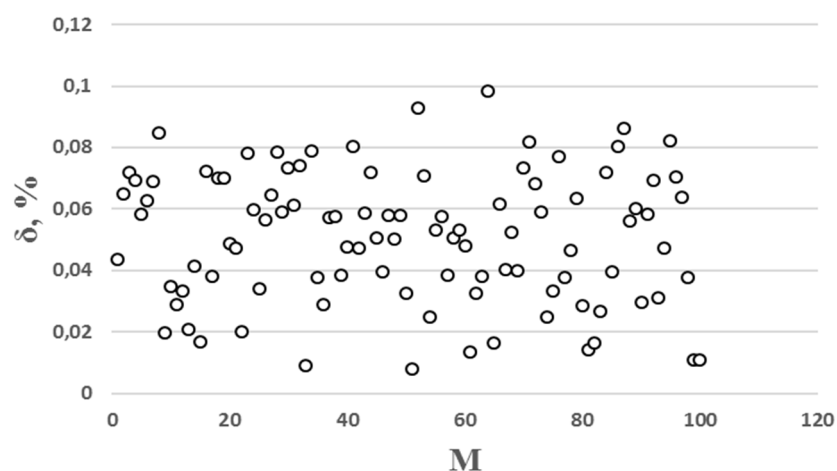


Рис. 9. Разброс приведенных погрешностей ($w=12$, $\delta_{\max} = 0,10\%$)

Fig. 9. Scatter plot of relative errors ($w = 12$, $\delta_{\max} = 0.10\%$)

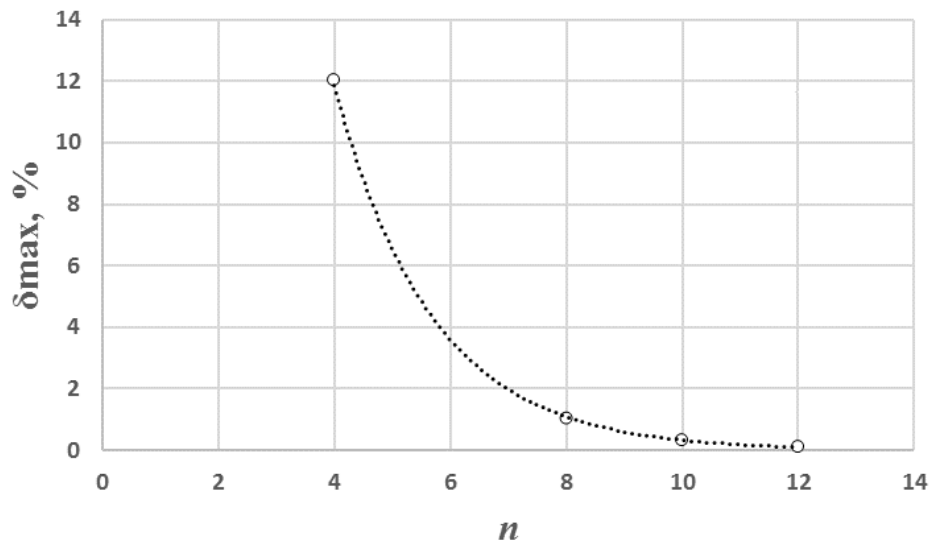


Рис. 10. Зависимости приведенной погрешности от разрядности исходных данных

Fig. 10. Dependence of relative error on input data bit-width

Проведено усреднение результатов многократных измерений при различных наборах входных данных и весов, что позволило повысить достоверность полученных зависимостей. Величина максимально приведённой погрешности уменьшается экспоненциально, что объясняется фундаментальными свойствами квантования данных и соответствует результатам, представленным в [1-4]. Объём используемых аппаратных средств (LUT и FF) растёт с увеличением разрядности, но скорость роста замедляется, что связано с более эффективной оптимизацией при высокой разрядности. Частота снижается с ростом разрядности, но затем снова возрастает, так как при высокой разрядности (12 бит) синтезатор эффективнее оптимизирует логику, что приводит к возобновлению роста частоты. При средней разрядности (10 бит) наблюдается максимальное снижение частоты из-за увеличения глубины комбинационных путей.

Для демонстрации влияния объема памяти (M) табличной реализации сигмоидальной функции на погрешность выходных данных (δ , %) представлены результаты экспериментальных исследований при фиксированной разрядности беззнакового целого равного 11 разрядам (табл. 2).

Таблица 2. Влияние объёма памяти на погрешность вычисления выходного значения

Table 2. Influence of memory size on output value computation error

Количество ячеек памяти (M) / Number of memory cells (M)	δ , %
16384	0,1
8192	0,12
4096	0,2
2048	0,34

График зависимости погрешности вычисления выходного значения нелинейного нейрона от количества ячеек памяти (M) при фиксированном значении разрядности исходных данных представ-

лен на рис. 11. При расчётном значении шага дискретизации $1/512$, что соответствует объёму таблицы 4096 значений, уменьшение шага в 4 раза приводит к уменьшению максимального значения погрешности вычислений лишь в 2 раза. Сокращение объёма таблицы сигмоидной функции активации достигается как за счёт её симметрии, так и за счёт выбора оптимального шага дискретизации. При этом восстановление значений функции при отрицательных значениях аргумента требует дополнительных операций в соответствии с выражением (3). Для этого необходим переход от беззнакового целого к целому со знаком, вычитание и коммутация на выход

значения функции соответствующего знаку аргумента. Помимо этого, в зависимости от знака аргумента, следует с помощью коммутатора выбрать одно из двух значений. Ускорение и сокращение оборудования при выполнении этих операций достигается за счёт того, что значение функции активации при отрицательном значении аргумента может быть получено поразрядной инверсией табличного значения

$$Y(-x) = \sim Y(|x|),$$

что реализуется с помощью логических элементов сложения по модулю 2, на первые входы которых подаются разряды табличного значения, а на объединённые вторые входы знак аргумента.

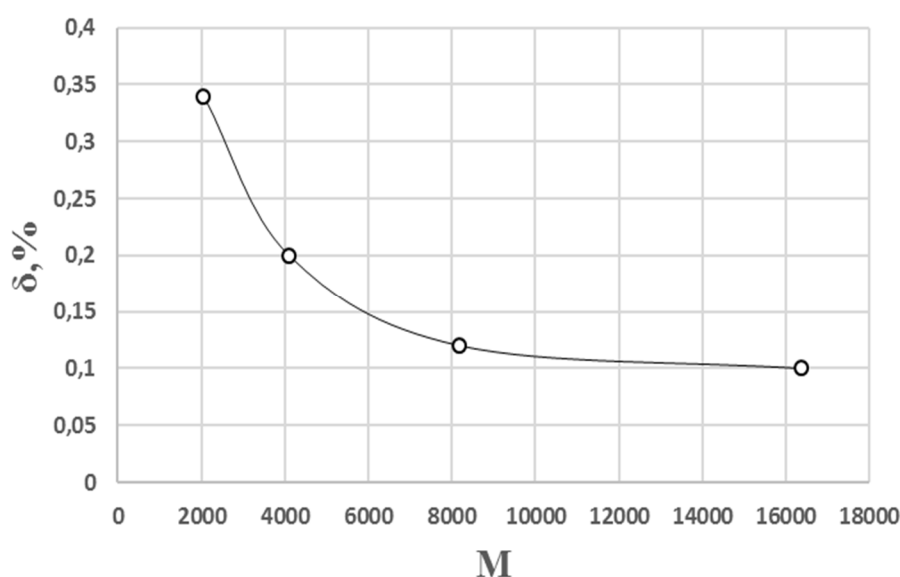


Рис. 11. Зависимость погрешности вычисления выходного значения от количества ячеек памяти (M)

Fig. 11. Dependence of output value computation error on the number of memory cells (M)

При погрешности исходных данных, соответствующей 11-битному разрешению, оптимальным является использование 8192 ячеек памяти, позволяющее достигнуть компромисс между

точностью вычислений и затрачиваемыми аппаратными ресурсами.

Анализ существующих исследований в области квантования нейронных сетей для аппаратной реализации на ПЛИС показывает, что основное вни-

мание уделяется оценке влияния пониженной точности представления данных (весов, активаций) на общую точность работы сетей в целом. Многие работы, такие как [5, 10, 21] и исследования, посвященные бинарным/низкобитным сетям [10, 22] демонстрируют, что переход от 32-битной арифметики с плавающей точкой к 8-, 4-, 2- или даже 1-битной целочисленной арифметике позволяет значительно сократить использование аппаратных ресурсов и энергопотребление с минимальной потерей точности на прикладных задачах, таких как классификация изображений или обработка сигналов. Например, работы по бинаризации [10,13] показывают, что сети могут сохранять высокую эффективность (например, точность классификации >90% на MNIST) при использовании всего 1-2 бит для представления весов и активаций. Методы, такие как FINN – для синтеза с низкобитным квантованием, или Aster – неравномерного квантования, фокусируются на автоматизации процесса квантования для сетей, обеспечивая либо высокую скорость вывода, либо гарантии точности в пределах допустимой погрешности для конкретной задачи. Однако эти исследования, в основном, оценивают точность и эффективность на уровне всей сети или слоев, применяя квантование как часть оптимизации модели или архитектуры сети для конкретных приложений.

В настоящей работе акцент сделан на оптимизацию квантования на уровне

отдельного нейрона как базового вычислительного элемента нейронной сети, приводятся теоретические обоснования и результаты экспериментальных исследований влияния квантования на вычислительную точность VHDL-модели нейрона. Подход, предложенный в статье [23], где исследуются различные модели нейронов на основе аналоговых решений с пакетной нормализацией, косвенно подчеркивает значимость точности самого вычислительного блока. Аналогично, работа [14] показывает, что разрядность данных (включая весовые коэффициенты и функцию активации, которые обрабатываются внутри нейронов) напрямую влияет на ресурсы ПЛИС и производительность системы (например, снижение разрядности весов с 8 до 4 бит уменьшило использование LUT более чем на 40% с минимальной потерей чувствительности).

Строгое квантование с гарантиями ошибки, как в Aster [15], также подразумевает анализ ошибок на уровне элементарных операций, происходящих в нейроне (Aster оптимизирует разрядность до 4-16 бит, гарантируя общую ошибку меньше заданного порога).

Таким образом, оптимизация самого нейрона, как элементарной ячейки вычислений, представляется важным и логически обоснованным шагом. Повышение точности вычислений на этом уровне может кумулятивно улучшить точность всей сети, особенно в глубоких архитектурах, где ошибки могут накапливаться. Фокусировка на оди-

ночном нейроне позволяет детально исследовать и минимизировать вносимую ошибку, что может привести к более предсказуемому и надежному поведению сетей, реализованных на ресурсно-ограниченных устройствах.

Выводы

В отличие от большинства работ, в которых оптимизация проводится либо по точности, либо по ресурсам, в данной работе предложен интегрированный подход, позволяющий учитывать оба параметра одновременно. Это даёт возможность находить оптимальное значение разрядности, при котором погрешность вычислений остаётся в допустимых пределах, а аппаратные затраты минимальны.

В работе получена экспоненциальная регрессионная модель, позволяющая прогнозировать уровень погрешности вычисления выходного значения устройства цифровой обработки в зависимости от используемой разрядности. Это делает возможным автоматизированный выбор параметров вычислителя на этапе проектирования. Погрешность вычислений одиночного нейрона для 12-разрядных исходных данных находится на уровне 0,1%.

Все исследования проводились с использованием реального синтеза на ПЛИС Xilinx Spartan 3E XC3S500E, что обеспечивает высокую достоверность результатов и возможность их прямого применения в практике проектирования.

В ходе исследования был разработан и применён метод оценки влияния разрядности представления входных

данных и весовых коэффициентов на точность вычислений и объём занимаемых аппаратных ресурсов в цифровом устройстве обработки, реализованном на ПЛИС, применяемом при реализации искусственного нейрона. На основе VHDL-описания нейрона была создана параметризуемая модель, позволяющая изменять разрядность входных сигналов и весовых коэффициентов в требуемом диапазоне. Экспериментально подтверждена предложенная авторами аналитическая зависимость, позволяющая определить оптимальный объём памяти (разрядность адреса) для табличной реализации сигмоидальной функции с учетом требуемой погрешности вычислений и разрядности входных данных. Оптимальным является использование 8192 ячеек памяти, позволяющее достигнуть компромисс между точностью вычислений ($\delta_{\max}=0,12\%$) и затрачиваемыми аппаратными ресурсами.

В результате исследований получена базовая модель для дальнейшей автоматизации и оптимизации нелинейного цифрового устройства на ПЛИС, идентичная одиночному нейрону, особенно в условиях ограниченных ресурсов и необходимости минимизации энергопотребления и площади кристалла.

Предложенная реализация, основанная на последовательной обработке данных и использовании знаковых чисел, ориентирована на минимизацию ресурсов, что делает её особенно актуальной для бюджетных ПЛИС, где параллелизм и конвейеризация недоступны,

модель также может быть использована в системах, при реализации спецвычислителей с фиксированной точкой, где критична экономия ресурсов и энергии.

В отличие от подавляющего большинства работ, где автоматизация реализована на уровне системного проек-

тирования, предложенная модель позволяет автоматизировать выбор разрядности на уровне отдельного нейрона, что упрощает масштабирование и интеграцию в более сложные системы и может быть использована во встраиваемых устройствах.

Список литературы

1. Accelerating FPGA Implementation of Neural Network Controllers via 32-bit Fixed-Point Design for Real-Time Control / C. Hingu, X. Fu, R. Chaloo, J. Lu, X. Yang, L. Qingge // 2023 IEEE 14th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON). 2023; 952-959. <https://doi.org/10.1109/UEMCON59035.2023.10316098>
2. Neural Network on the Edge: Efficient and Low Cost FPGA Implementation of Digital Predistortion in MIMO Systems / Y. Jiang, A. Vaicaitis, M. Leeser, J. Dooley // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). Antwerp, Belgium, 2023. P. 1–2. <https://doi.org/10.23919/DATE56975.2023.10137251>
3. Antunes P., Podobas A. FPGA-Based Neural Network Accelerators for Space Applications: A Survey. arXiv 2025, arXiv:2504.16173v2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.16173>
4. Prashanth B.U.V., Ahmed M.R. Design and Implementation of Reconfigurable Neuro-Inspired Computing Model on a FPGA // Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. 2020. Vol. 5 (5). P. 331–338. <https://doi.org/10.25046/aj050541>
5. CBin-NN: An Inference Engine for Binarized Neural Networks / F. Sakr, R. Berta, J. Doyle, A. Capello, A. Dabbous, L. Lazzaroni, Bellotti F. // Electronics. 2024. 13. P. 1624. <https://doi.org/10.3390/electronics13091624>
6. Kumari B.A.S., Kulkarni S.P., Sinchana C.G. FPGA Implementation of Neural Nets // Int. J. Electron. Telecommun. 2023. Vol. 69(3). P. 599–604. <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.146513>
7. Лебедев М.С., Белецкий П.Н. Реализация искусственных нейронных сетей на ПЛИС с помощью открытых инструментов // Труды ИСП РАН. 2021. 33 (6). С. 175–192. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33\(6\)-12](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33(6)-12)
8. Acharya R.Y., Le Jeune L., Mentens N., Ganji F., Forte D. Quantization-aware Neural Architectural Search for Intrusion Detection. arXiv 2024. arXiv:2311.04194v2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.04194>
9. Efficient Neural Networks on the Edge with FPGAs by Optimizing an Adaptive Activation Function / Y. Jiang, A. Vaicaitis, J. Dooley, M. Leeser // Sensors. 2024. 24(6). P.1829. <https://doi.org/10.3390/s24061829>

10. FPGA-QNN: Quantized Neural Network Hardware Acceleration on FPGAs / M. Tasci, A. Istanbulu, V. Tumen, S. Kosunalp // *Appl. Sci.* 2025. 15. P. 688. <https://doi.org/10.3390/app15020688>
11. Solovyev R., Kustov A., Telpukhov D., Rukhlov V., Kalinin A. Fixed-Point Convolutional Neural Network for Real-Time Video Processing in FPGA. *arXiv* 2018, *arXiv:1808.09945v2*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.09945>
12. Wu H., Zheng L., Zhao G., Xu G., Xu M., Liu X., Lin D. Integer Quantization for Deep Learning Inference: Principles and Empirical Evaluation. *arXiv* 2020, *arXiv:2004.09602v3*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.09602>
13. Compressing deep neural networks on FPGAs to binary and ternary precision with hls4ml / Ngadiuba J., Loncar V., Pierini M., Summers S., Di Guglielmo G., Duarte J., Harris P., Rankin D., Jindariani S., Liu M., Pedro K., Tran N., Kreinar E., Sagar S., Wu Z., Hoang D. // *Mach. Learn.: Sci. Technol.* 2021. 2. 015001. <https://doi.org/10.1088/2632-2153/aba042>
14. Fixed-Point Analysis and FPGA Implementation of Deep Neural Network Based Equalizers for High-Speed PON / N. Kaneda, C.-Y. Chuang, Z. Zhu, A. Mahadevan, B. Farah, K. Bergman, D. Van Veen, V. J. Houtsma // *Lightwave Technol.* 2022. 40 (7). P. 1972–1980. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3133723>
15. Sound Mixed Fixed-Point Quantization of Neural Networks / D. Lohar, C. Jeangoudoux, A. Volkova, E. Darulova // *ACM Trans. Embedd. Comput. Syst.* 2023. 22 (5s), 136:1–136:26. <https://doi.org/10.1145/3609118>
16. Jia H., Chen X., Dong D. FPGA-Based Implementation and Quantization of Convolutional Neural Networks // *Proceedings of the 2025 3rd International Conference on Communication Networks and Machine Learning (CNML 2025)*. Nanjing, China, February 21–23, 2025. ACM, New York, NY, USA, 2025. 5 pages. <https://doi.org/10.1145/3728199.3728263>
17. Pipelined Architecture for a Semantic Segmentation Neural Network on FPGA / H. Le Blevec, M. Léonardon, H. Tessier, M. Arzel // *Proceedings of the 2023 30th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*. Istanbul, Turkey, 2023. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICECS58634.2023.10382715>
18. FPGA implementation of a complete digital spiking silicon neuron for circuit design and network approach / X. Miao, X. Ji, H. Chen, A.M. Mayet, G. Zhang, C. Wang, J. Sun // *Sci Rep.* 2025. 15. P. 8491. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92570-z>
19. Wang C.; Luo Z. A Review of the Optimal Design of Neural Networks Based on FPGA // *Appl. Sci.* 2022. 12. P. 10771. <https://doi.org/10.3390/app122110771>
20. Claudionor N. Coelho, Jr., Kuusela A., Li S. et al. Automatic heterogeneous quantization of deep neural networks for low-latency inference on the edge for particle detectors // *Nat Mach Intell.* 2021. 3. P. 675–686. <https://doi.org/10.1038/s42256-021-00356-5>

21. Gholami A., Kim S., Dong Z., Yao Z., Mahoney M.W., Keutzer K. A Survey of Quantization Methods for Efficient Neural Network Inference. CRC: Boca Raton, FL, USA, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.13630>
22. Courbariaux M., Hubara I., Soudry D., El-Yaniv R., Bengio Y. Binarized Neural Networks: Training Deep Neural Networks with Weights and Activations Constrained to +1 or −1. arXiv 2016, arXiv:1602.02830. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1602.02830>
23. Kavitha S., Kumar C., Alwabli A. A low-power, high accuracy digital design of batch normalized non-linear neuron models: Synthetic experiments and FPGA evaluation // Ain Shams Eng. J. 2025. 16 (8). P. 103469. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103469>

References

1. Hingu C., Fu X., Challoo R., Lu J., Yang X., Qingge L. Accelerating FPGA Implementation of Neural Network Controllers via 32-bit Fixed-Point Design for Real-Time Control. In: *2023 IEEE 14th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*. 2023. P. 952-959. <https://doi.org/10.1109/UEMCON59035.2023.10316098>
2. Jiang Y., Vaicaitis A., Leeser M., Dooley J. Neural Network on the Edge: Efficient and Low Cost FPGA Implementation of Digital Predistortion in MIMO Systems. In: *2023 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. Antwerp, Belgium; 2023. P. 1–2. <https://doi.org/10.23919/DATE56975.2023.10137251>
3. Antunes P., Podobas A. FPGA-Based Neural Network Accelerators for Space Applications: A Survey. arXiv 2025, arXiv:2504.16173v2 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.16173>
4. Prashanth B.U.V., Ahmed M.R. Design and Implementation of Reconfigurable Neuro-Inspired Computing Model on a FPGA. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.* 2020; 5 (5): 331–338. <https://doi.org/10.25046/aj050541>
5. Sakr F., Berta R., Doyle J., Capello A., Dabbous A., Lazzaroni L., Bellotti F. CBin-NN: An Inference Engine for Binarized Neural Networks. *Electronics*. 2024; 13: 1624. <https://doi.org/10.3390/electronics13091624>
6. Kumari B.A.S., Kulkarni S.P., Sinchana C.G. FPGA Implementation of Neural Nets. *Int. J. Electron. Telecommun.* 2023; 69(3): 599–604. <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.146513>
7. Lebedev M.S., Belecky P.N. Artificial Neural Network Inference on FPGAs Using Open-Source Tools. *Trudy ISP RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*. 2021;33(6):175-192. (In Russ.). [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33\(6\)-12](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33(6)-12)
8. Acharya R.Y., Le Jeune L., Mentens N., Ganji F., Forte D. Quantization-aware Neural Architectural Search for Intrusion Detection. arXiv 2024, arXiv:2311.04194v2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.04194>

9. Jiang Y., Vaicaitis A., Dooley J., Leeser M. Efficient Neural Networks on the Edge with FPGAs by Optimizing an Adaptive Activation Function. *Sensors*. 2024; 24(6):1829. <https://doi.org/10.3390/s24061829>
10. Tasci M., Istanbulu A., Tumen V., Kosunalp S. FPGA-QNN: Quantized Neural Network Hardware Acceleration on FPGAs. *Appl. Sci.* 2025; 15: 688. <https://doi.org/10.3390/app15020688>
11. Solovyev R., Kustov A., Telpukhov D., Rukhlov V., Kalinin A. Fixed-Point Convolutional Neural Network for Real-Time Video Processing in FPGA. arXiv 2018, arXiv:1808.09945v2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.09945>
12. Wu H., Zheng L., Zhao G., Xu G., Xu M., Liu X., Lin D. Integer Quantization for Deep Learning Inference: Principles and Empirical Evaluation. arXiv 2020, arXiv:2004.09602v3. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.09602>
13. Ngadiuba J., Loncar V., Pierini M., Summers S., Di Guglielmo G., Duarte J., Harris P., Rankin D., Jindariani S., Liu M., Pedro K., Tran N., Kreinar E., Sagear S., Wu Z., Hoang D. Compressing deep neural networks on FPGAs to binary and ternary precision with hls4ml. *Mach. Learn.: Sci. Technol.* 2021. 2: 015001. <https://doi.org/10.1088/2632-2153/aba042>
14. Kaneda N., Chuang C.-Y., Zhu Z., Mahadevan A., Farah B., Bergman K., Van Veen D., Houtsma V. Fixed-Point Analysis and FPGA Implementation of Deep Neural Network Based Equalizers for High-Speed PON. *J. Lightwave Technol.* 2022; 40 (7): 1972–1980. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3133723>
15. Lohar D., Jeangoudoux C., Volkova A., Darulova E. Sound Mixed Fixed-Point Quantization of Neural Networks. *ACM Trans. Embedd. Comput. Syst.* 2023; 22 (5s): 136:1–136:26. <https://doi.org/10.1145/3609118>
16. Jia H., Chen X., Dong D. FPGA-Based Implementation and Quantization of Convolutional Neural Networks. In: *Proceedings of the 2025 3rd International Conference on Communication Networks and Machine Learning (CNML 2025)*, Nanjing, China, February 21–23, 2025. ACM, New York, NY, USA; 2025. 5 pages. <https://doi.org/10.1145/3728199.3728263>
17. Le Blevet H., Léonardon M., Tessier H., Arzel M. Pipelined Architecture for a Semantic Segmentation Neural Network on FPGA. In: *Proceedings of the 2023 30th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, Istanbul, Turkey; 2023. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICECS58634.2023.10382715>
18. Miao X., Ji X., Chen H., Mayet A.M., Zhang G., Wang C., Sun J. FPGA implementation of a complete digital spiking silicon neuron for circuit design and network approach. *Sci Rep.* 2025; 15: 8491. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92570-z>
19. Wang C., Luo Z. A Review of the Optimal Design of Neural Networks Based on FPGA. *Appl. Sci.* 2022; 12: 10771. <https://doi.org/10.3390/app122110771>

20. Claudionor N. Coelho Jr., Kuusela A., Li S. *et al.* Automatic heterogeneous quantization of deep neural networks for low-latency inference on the edge for particle detectors. *Nat Mach Intell.* 2021; 3: 675–686. <https://doi.org/10.1038/s42256-021-00356-5>

21. Gholami A., Kim S., Dong Z., Yao Z., Mahoney M.W., Keutzer K. A Survey of Quantization Methods for Efficient Neural Network Inference; CRC: Boca Raton, FL, USA; 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.13630>

22. Courbariaux M., Hubara I., Soudry D., El-Yaniv R., Bengio Y. Binarized Neural Networks: Training Deep Neural Networks with Weights and Activations Constrained to +1 or –1. arXiv 2016, arXiv:1602.02830. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1602.02830>

23. Kavitha S., Kumar C., Alwabli A. A low-power, high accuracy digital design of batch normalized non-linear neuron models: Synthetic experiments and FPGA evaluation. *Ain Shams Eng. J.* 2025; 16 (8): 103469. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103469>

Информация об авторах / Information about the Authors

Бондарь Олег Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru

Oleg G. Bondar, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru

Брежнева Екатерина Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Ekaterina O. Brezhneva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Голубев Дмитрий Александрович, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: golubew.2019@mail.ru

Dmitry A. Golubev, Student of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: golubew.2019@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 681.527.83

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-93-110>

Моделирование управляемого движения сферического магнитоактивного объекта в эластичном канале

С.Ф. Яцун ¹, А.В. Мальчиков ¹ ✉, В. А. Караськов ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Математическое моделирование динамики управляемого движения сферического магнитоактивного объекта в криволинейном канале посредством внешнего магнитного поля, создаваемого подвижным постоянным магнитом.

Задачи. Разработка системы дифференциальных уравнений, описывающих управляемое движение магнитоактивного объекта в криволинейном эластичном канале. Разработка алгоритмов локализации магнитоактивного объекта внутри канала, расчета нормали и величины деформации при контактном взаимодействии. Постановка вычислительных экспериментов с целью определения характера движения магнитоактивного объекта в криволинейном канале и получения предельных значений параметров системы, обеспечивающих управляемость микроробота за счет перемещения постоянного магнита.

Методы. При моделировании движения магнитоактивного микроробота внутри биологически-инспирированного криволинейного канала используется система дифференциальных уравнений и уравнений для внешнего неоднородного магнитного поля. Модель учитывает силы магнитного воздействия, силы сопротивления среды, силы инерции и силу тяжести. Для решения уравнений динамики системы применяются методы численного интегрирования. В рамках данного исследования модель реализована с помощью программного пакета MATLAB.

Результаты. В работе представлена математическая модель движения управляемой магнитоактивного сферического объекта в криволинейном эластичном канале, имитирующем кровеносный сосуд. Разработанная модель учитывает гидродинамическое сопротивление, взаимодействие с деформируемыми стенками канала и внешнее магнитное воздействие. Проведенные численные эксперименты демонстрируют возможность предсказания траектории движения объекта и выявляют предельные значения параметров системы, при которых сохраняется управляемость магнитоактивным микророботом.

Заключение. Перемещение частицы по синусоидальному каналу эффективно обеспечивается воздействием постоянного магнита. Возникающая нормальная реакция стенки канала не превышает допустимых для сосудистых структур значений, составляя до 5 мН в пике и около 1 мН при длительном воздействии. Учёт ключевых физико-геометрических параметров, таких как форма канала, свойства магнитоактивного объекта, вязкость среды, силы трения и пондеромоторное воздействие, обеспечивает универсальность модели. Предложенная методология может быть использована для оптимизации алгоритмов магнитной навигации в задачах эндоваскулярной эмболизации, адресной доставки лекарственных средств и других перспективных медицинских методик.

Ключевые слова: магнитная навигация; эндоваскулярная эмболизация; магнитные микророботы; численное моделирование.

© Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Караськов В. А., 2025

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Госзадания Минобрнауки России по теме «Разработка методов синтеза адаптивных и интеллектуальных робототехнических устройств и комплексов в целях расширения функциональных технологических и производственных возможностей человека» (соглашение № 075-03-2025-526).

Для цитирования: Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Караськов В. А. Моделирование управляемого движения сферического магнитоактивного объекта в эластичном канале // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 93-110. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-93-110>.

Поступила в редакцию 26.08.2025

Подписана в печать 17.09.2025

Опубликована 22.12.2025

Simulation of controlled motion of a spherical magnetically active object in an elastic channel

Sergey F. Jatsun ¹, Andrey V. Malchikov ¹ ✉, Vsevolod A. Karaskov ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Abstract

Purpose of reseach. Mathematical modeling of the dynamics of controlled motion of a spherical magnetically active object in a curved channel by means of an external magnetic field created by a movable permanent magnet

Tasks. Development of a system of differential equations describing the controlled motion of a magnetically active object in a curved elastic channel. Development of algorithms for localization of a magnetically active object inside a channel, calculation of the normal and magnitude of deformation during contact interaction. Setting up computational experiments in order to determine the nature of the movement of a magnetically active object in a curved channel and obtain the maximum values of the system parameters that ensure the controllability of the microrobot due to the movement of a permanent magnet.

Methods. When modeling the motion of a magnetically active microrobot inside a biologically inspired curved channel, a system of differential equations and equations for an external inhomogeneous magnetic field is used. The model takes into account magnetic forces, environmental resistance forces, inertia forces, and gravity. Numerical integration methods are used to solve the equations of system dynamics. In the framework of this study, the model was implemented using the MATLAB.

Results. The paper presents a mathematical model of the motion of a controlled magnetically active spherical object in a curved elastic channel simulating a blood vessel. The developed model takes into account hydrodynamic resistance, interaction with deformable channel walls and external magnetic influence. The numerical experiments performed demonstrate the possibility of predicting the trajectory of an object and reveal the limiting values of the system parameters at which controllability by a magnetically active microrobot is maintained.

Conclusions. The movement of the particle along the sinusoidal channel is effectively ensured by the action of a permanent magnet. The resulting normal reaction of the canal wall does not exceed the values allowed for vascular structures, amounting to 5 mN at the peak and about 1 mN with prolonged exposure. Taking into account key physical and geometric parameters, such as the channel shape, magnetically active object properties, viscosity of the medium, friction forces and ponderomotor action, ensures the versatility of the model. The proposed methodology can be used to optimize magnetic navigation algorithms for endovascular embolization, targeted drug delivery, and other promising medical techniques.

Keywords: *magnetic navigation; endovascular embolization; magnetic microrobots; numerical modeling.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Financing: *The work was carried out with the support of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project № 075-03-2025-526 «Development of methods for synthesizing adaptive and intelligent robotic devices and complexes in order to expand the functional technological and production capabilities of humans»*

For citation: Jatsun S. F., Malchikov A. V., Karaskov V. A Simulation of controlled motion of a spherical magnetically active object in an elastic channel. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 93-110 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-93-110>.

Received 26.08.2025

Accepted 17.09.2025

Published 22.12.2025

Введение

Важным элементом современных минимально инвазивных медицинских технологий являются методы целевой доставки лекарственных средств и эмболизации сосудистых патологий, таких как артериовенозные мальформации (АВМ) и аневризмы. Перспективным направлением в данной области является использование управляемых магнитных микророботов и эмболизационных частиц, движение которых контролируется внешним магнитным полем [1-3]. Управление такими магнитоактивными объектами (МО) характеризуется необходимостью обеспечения их предсказуемой динамики и точного позиционирования в условиях сложной геометрии кровеносного русла [4-5]. Ключевой проблемой, ограничивающей широкое внедрение технологии, является сложность управления траекторией МО в криволинейных каналах, где на ее движение существенное влияние оказывают гидродинамические силы, силы маг-

нитного управления, и геометрия самого канала [4, 6].

Исследование динамики микроробота в жидкости возможно на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD) [7]. Однако для детального анализа его поведения в условиях криволинейного канала, имитирующего кровеносный сосуд, необходима консолидация данных о параметрах внешнего магнитного поля, характеристиках частицы, а также геометрии и физике канала. Большинство существующих научных работ посвящены моделированию движения в прямых каналах или анализу магнитных свойств самих частиц [8-9]. Разработка предсказательной модели, учитывающей кривизну траектории, проведение параметрических исследований позволит разрабатывать более эффективные алгоритмы управления [10], оптимизировать траектории движения и минимизировать время доставки.

Целью работы является разработка математической модели и постановка вычислительных экспериментов с це-

лью исследования динамики управляемого движения магнитоактивного сферического объекта в криволинейном канале, имитирующем кровеносный сосуд, а также анализа возможности применения микророботов, управляемых внешним магнитным полем для решения задач щадящей медицины.

Материалы и методы

В области моделирования магнитных микророботов в общем случае можно выделить три направления исследования: исследование магнитных свойств и конструкции самих микророботов; моделирование динамики их движения в различных средах и разработку, и исследование систем управления движением МО. Настоящее исследование фокусируется на третьем из приведенных направлений.

Для моделирования биологически-инспирированного криволинейного канала в рамках математической модели используется канал со стенкой задаваемой гармонической функцией. Матема-

тически такой канал описывается пространством между двумя синусоидами, определяемыми формулой

$$y_{\text{wall}} = A \sin(k\pi x) \pm B. \quad (1)$$

В качестве магнитоактивного объекта в работе рассматривается сферическое тело, обладающее парамагнетическими свойствами, при этом размер объекта значительно меньше просвета канала: ($r < B$), где r – радиус МО. МО имеет однородную внутреннюю структуру с точки зрения распределения магнитоактивного вещества и плотности. Данная модель МО подходит для описания сферического тела, выполненного из двухкомпонентного силиконового компаунда с примесью частиц карбонильного железа размером не более 100 мкм с итоговой концентрацией их в составе 40%.

Схематично система может быть представлена согласно рис. 1.

При этом расчётная схема взаимодействия МО со стенками канала может быть представлена схемами, показанными на рис. 2.

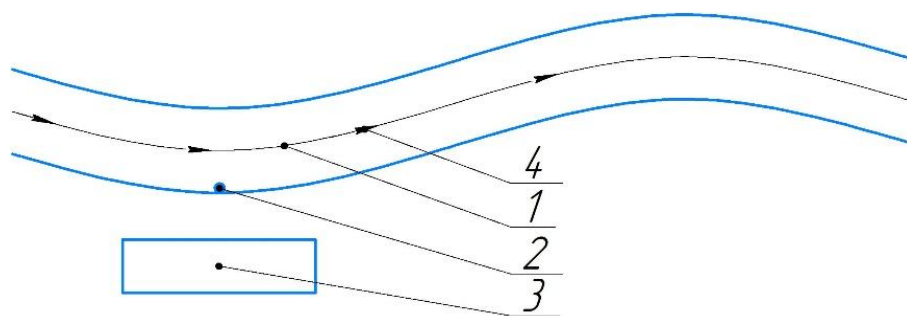


Рис. 1. Схема системы магнитоуправляемого движения: 1 – криволинейный канал; 2 – магнитоактивное тело; 3 – постоянный магнит; 4 – направление потока жидкости внутри канала

Fig. 1. Diagram of the magnetically controlled motion system: 1 – curved channel; 2 – magnetically active body; 3 – permanent magnet; 4 – direction of fluid flow inside the channel

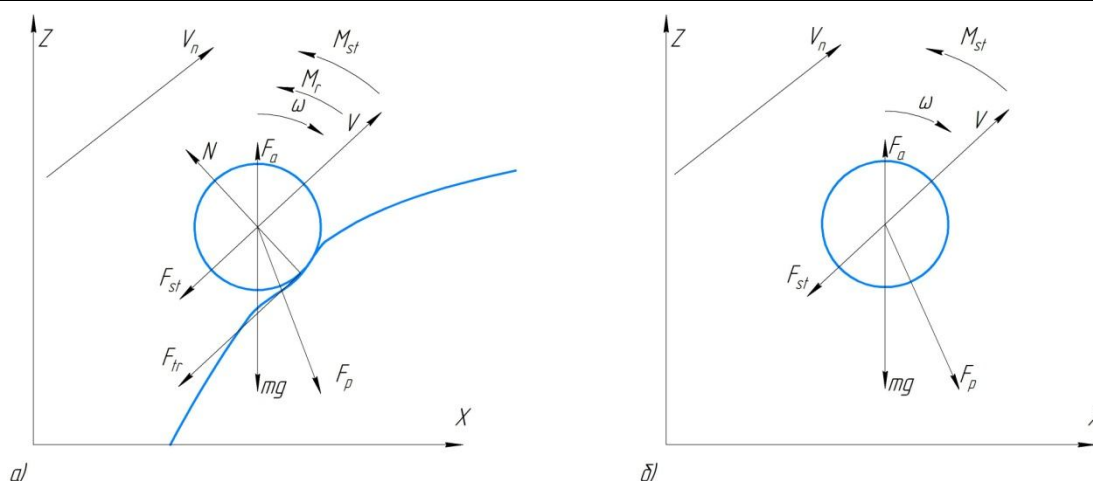


Рис. 2. Расчётная схема математической модели: **а** – при касании стенки; **б** – без касания стенок

Fig. 2. Calculation scheme of the mathematical model: **a** – when touching the wall; **b** – without touching the walls

На представленных схемах приняты следующие обозначения: V – скорость центра масс; V_n – скорость потока жидкости в канале; ω – угловая скорость МО; F_a – архимедова сила; mg – сила тяжести; F_p – пондеромоторная сила; F_{tr} – сила сухого трения; F_{st} – сила жидкого трения; M_r – момент трения качения; M_{st} – момент жидкого трения; N – нормальная реакция поверхности.

Для описания управляемого движения МО в канале с вязкой подвижной жидкостью описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg_x + F_{a_x} + F_{st_x} + F_{p_x} + N_x + F_{tr_x}; \\ m\ddot{z} = mg_z + F_{a_z} + F_{st_z} + F_{p_z} + N_z + F_{tr_z}; \\ I\ddot{\omega} = M_{st} + M_{tr} + M_r. \end{cases} \quad (1)$$

Для управления движением МО моделируется внешнее градиентное магнитное поле. Сила, действующая со стороны магнита на МО, описывается уравнением:

$$\vec{F}_p = \mu_0 |m_m| \nabla |H|, \quad (2)$$

где \vec{H} – это вектор напряженности магнитного поля; $|H|$ – его модуль; \vec{m}_m и

$|m_m|$ – вектор и модуль дипольного момента МО, определяемый как $\vec{m}_m = V\chi\vec{H}$, где χ – магнитная восприимчивость, а V – его объем.

В работе используется кубический неодимовый магнит, напряженность магнитного поля которого может быть вычислена по аналитическим формулам [11]:

$$\begin{aligned} H_x &= -\frac{M}{4\pi} \sum_{i,j,k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \ln \left[y_j + \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2} \right]; \\ H_y &= -\frac{M}{4\pi} \sum_{i,j,k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \ln \left[x_i + \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2} \right]; \\ H_z &= -\frac{M}{4\pi} \sum_{i,j,k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \arctg \left[\frac{x_i y_j}{z_k \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_i = x + (-1)^i a/2$, $y_j = y + (-1)^j b/2$, $z_k = z + (-1)^k c/2$; M – намагниченность магнита; x, y, z – смещение центра масс МО относительно центра постоянного магнита; a, b, c – размеры постоянного магнита.

Величина модуля напряженности определяется как векторная сумма составляющих как [11]:

$$|H| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}. \quad (4)$$

Представим выражения для сил сопротивления, действующие на МО внутри канала с подвижной вязкой жидкостью.

Сила и момент вязкого сопротивления движению в жидкости будем рассматривать как:

$$F_{st} = k_{st_sk} V_{rel}, \quad (5)$$

$$M_{st} = k_{st_r} \omega, \quad (6)$$

где V_{rel} – относительная скорость движения тела в потоке: $V_{rel} = V_n - V$.

Для момента трения качения и трения скольжения, в случае контакта с поверхностью канала справедливы выражения:

$$M_r = N \mu_r, \quad (7)$$

$$F_{fr} = N \mu, \quad (8)$$

где μ_r, μ – коэффициенты трения.

Важной частью работы является нелинейная модель сухого трения, позволяющая реализовывать различные режимы и описываемая системой уравнений:

$$\begin{cases} \mu_{act} = \mu_{sk}, & F_{dir} = -\frac{F_{ext}}{|F_{ext}|}, & \text{при } |V_{sk}| \approx 0; \\ \mu_{act} = \mu_{din}, & F_{dir} = -\frac{V_{sk}}{|V_{sk}|}, & \text{при } |V_{sk}| > 0. \end{cases}$$

Где сила трения описывается уравнением:

$$F_{tr} = \begin{cases} |F_{ext}| \cdot F_{dir}, & \text{при } |F_{ext}| \leq \mu_{act} |N|; \\ \mu_{act} |N| \cdot F_{dir} & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Аналогичным образом для момента трения качения:

$$\begin{cases} \mu_{r_act} = \mu_{r_st}, & M_{dir} = -\frac{M_{ext} + M_{tr}}{|M_{ext} + M_{tr}|}, & \text{при } |\omega| \approx 0; \\ \mu_{r_act} = \mu_{r_din}, & M_{dir} = -\frac{\omega}{\omega}, & \text{при } |\omega| > 0. \end{cases}$$

Расчёт момента трения:

$$M_r = \begin{cases} |M_{ext} + M_{tr}| \cdot M_{dir}, & |M_{ext} + M_{tr}| \leq \mu_{r_act} |N| \\ \mu_{r_act} \cdot |N| \cdot M_{dir} & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Данная форма расчёта позволяет рассчитывать все возможные режимы движения от скольжения без вращения до качения без проскальзывания.

Сила Архимеда, действующая на сферический МО определяется уравнением:

$$F_a = \rho g V, \quad (9)$$

где ρ – плотность МО.

Расчёт нормальной реакции между МО и стенкой канала определим согласно закону Кельвина-Фойгта:

$$N = k\varepsilon + c \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (10)$$

где k – коэффициент упругости; c – коэффициент демпфирования; ε – деформация.

Сложность численного расчета заключается в нелинейном характере системы уравнений, наличия условий взаимодействия различных сил, в том числе моделирование контактного взаимодействия МО с поверхностью канала. Для решения предлагаемой задачи используется следующий алгоритм расчёта динамической системы методом последовательного интегрирования. В случае решения прямой задачи динамики предполагается следующая последовательность операций: получение начальных условий; расчёт сил для текущего шага; интегрирование; сохранение данных. После чего осуществляется повтор первых трех пунктов до выхода за диапазон расчётного времени. Данный

алгоритм подходит для моделирования, когда рассматривается прямолинейное движение или движение по заданному закону [10]. Однако при движении в криволинейном деформируемом канале с подвижной вязкой средой существует несколько процессов, существенно усложняющих процесс вычисления. А именно: вычисление скорости потока среды в текущей точке и вычисление величины текущей деформации поверхности канала и расстояния до неё в процессе движения.

Рассмотрим более подробно предлагаемый оригинальный алгоритмы вычислений, позволяющих моделировать движение и контактное взаимодействие МО со стенкой канала.

Скорость потока среды в текущей точке вычисляется по следующему алгоритму. Исходными данными являются координаты точки, для которой вычисляется скорость потока (x_b , y_b), геометрические параметры, определяющие расположение стенок канала (A , k , B), объёмный расход среды Q (м³/с) и радиус МО r .

Процесс начинается с расчёта параметров текущего положения точки. Затем, по закону Пуазейля для канала круглого сечения, вычисляется максимальная скорость потока. После этого строится профиль скорости по параболическому закону. На заключительном этапе вычисляется вектор скорости V_n и его модуль $|V_n|$, что и является искомой скоростью потока V_a для данной точки.

Закон Пуазейля выглядит следующим образом:

$$V_{max} = \frac{2|Q|}{\pi R^2}. \quad (11)$$

Профиль скорости вычисляется по формуле

$$V_{max} = V_{max} \max \left(0.1 - \left(\frac{L}{R} \right)^2 \right), \quad (12)$$

где L – дистанция до точки от оси

Алгоритм расчёта параметров канала в точке, описывает подпроцесс определения расстояния до оси канала и его диаметра в перпендикулярном сечении. Первым шагом осуществляется поиск нормали к центральной оси канала в данной точке. Затем строится перпендикуляр к этой нормали, который представляет собой вектор направления потока. Полученный вектор нормализуется. Далее выполняется проверка условия $X < 0$. На основе этого определяется дистанция до стенок канала по направлению нормали. Если условие выполняется, строится обратный вектор потока. Завершающим этапом является вычисление диаметра канала в данном сечении.

В результате алгоритм возвращает три параметра: расстояние до стенки (d_{st}), диаметр канала (d) и нормализованный вектор направления потока ($flow_dir$).

Вторым механизмом, использованным в модели, является функция определения величины деформации стенки. Его алгоритм представлен на рис.3.

На схеме на рис. 3: Y_n -координата Y вектора нормали; Def – величина деформации стенки; $normal$ – вектор нормали.

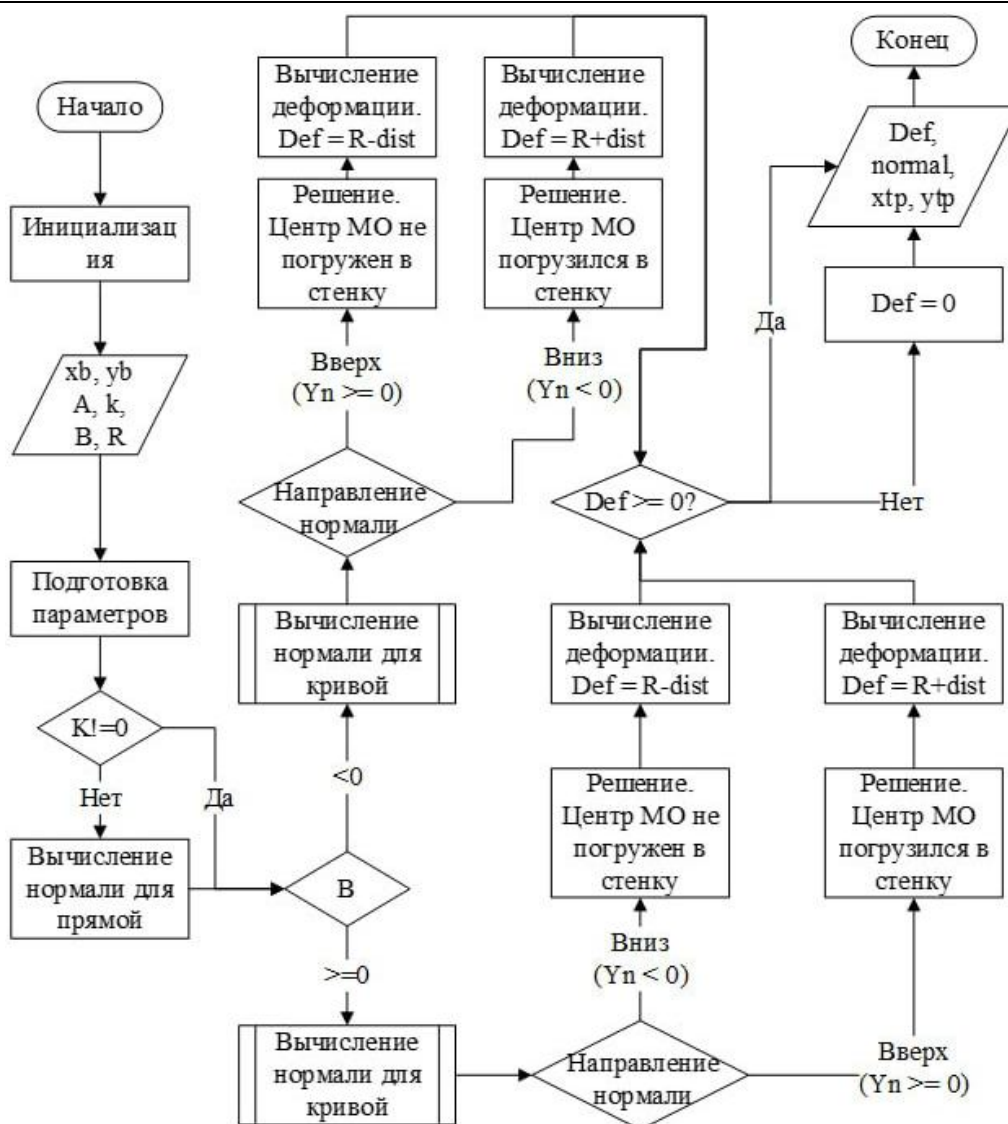


Рис. 3. Алгоритм расчёта величины деформации стенки

Fig. 3. The algorithm for calculating the amount of wall deformation

Как показано на рис. 3, алгоритм включает процедуру вычисления нормали к контуру из внешней точки, что представляет собой нетривиальную вычислительную задачу для криволинейных границ. Стандартная реализация данного метода в среде MATLAB, основанная на поиске касательного вектора к кривой, перпендикуляр которого проходит через заданную точку, демонстрирует недостаточную надежность. В частности, при моделировании объек-

тов в натуральную величину с диаметром канала менее 10 мм проявляются ограничения, связанные с точностью вычислений с плавающей точкой. В результате использование встроенной функции *fzero* для решения соответствующей системы уравнений зачастую приводит к некорректному определению корней или их отсутствию в окрестностях точек экстремума. В связи с указанными проблемами был предложен альтернативный алгоритм (рис. 4.).

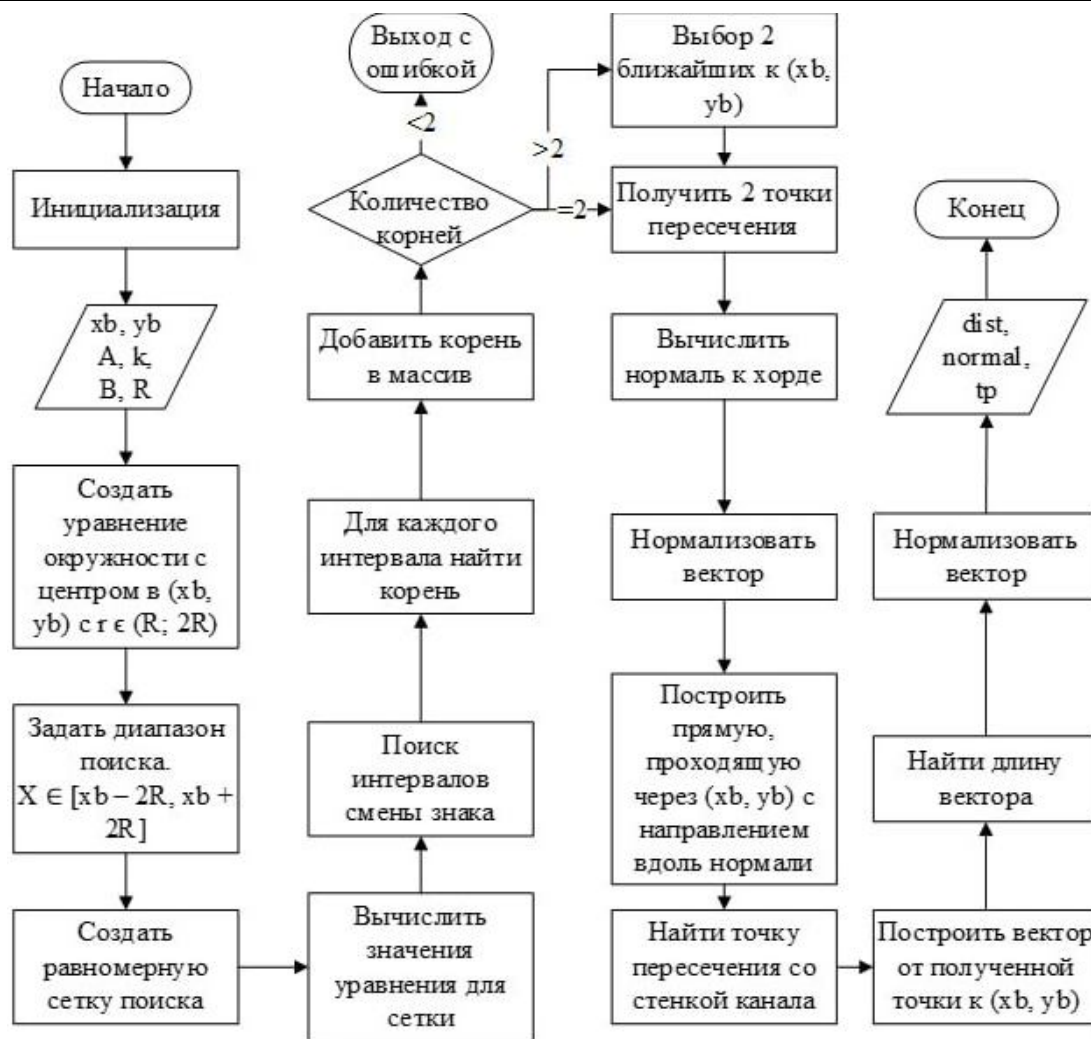


Рис. 4. Алгоритм нахождения нормали к кривой

Fig. 4. Algorithm for finding the normal to the curve

Данный алгоритм используется для определения расстояния до кривой или направления нормали к ней. Последовательное применение описанных алгоритмов в сочетании с фундаментальными физическими принципами позволяет рассчитать мгновенное ускорение тела, а путем последующего интегрирования – определить его положение на следующем временном шаге.

Результаты и их обсуждение

Проведем моделирование динамики магнитоактивного объекта радиусом

$r = 1$ мм, выполненного из магнито-полненного силиконового компаунда по каналу, стенки которого описываются гармонической функцией (1), при различных режимах движения постоянного магнита. В ходе моделирования использовался следующий закон, определяющий положение стенок канала в модели:

$$y_{\text{wall}} = 0.01 \sin(10\pi x) \pm 0.009. \quad (13)$$

Значения основных параметров, которые не изменялись в симуляциях, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры математической модели**Table 1.** Parameters of the mathematical model

Название параметра / Name of the parameter	Обозначение / Designation	Значение / Value
Максимальное время моделирования	t_{max}	10 с
Шаг интегрирования	dt	0.1 мс
Радиус МО	R	1 мм
Плотность МО	ρ_o	4500 кг/м ³
Коэффициент жесткости	k_{KF}	10
Коэффициент демпфирования	c	100
Амплитуда канала	A	0.01 м
Волновое число канала	k	10
Полувысота канала	$absB$	0.009 м
Коэффициент статического скольжения	k_{sl_st}	0.8
Коэффициент динамического скольжения	k_{sl_din}	0.85
Коэффициент статического качения	k_{roll_st}	2e-5
Коэффициент динамического качения	k_{roll_din}	1e-5
Ширина магнита	a	0.1 м
Длина магнита	b	0.1 м
Высота магнита	C	0.05 м
Угол наклона магнита	α	0°
Намагниченность магнита	M	1.325e7
Магнитная восприимчивость МО	χ_i	0.2
Динамическая вязкость	μ	4 мПа*с
Плотность среды	ρ_{sr}	1050 кг/м ³
Объемный поток	Q	1e-6 м ³ /с
Начальная координата x	x_0	-0.05 м
Начальная скорость по x	dx_0	0 м/с
Начальная координата z	z_0	-0.016 м
Начальная скорость по z	dz_0	0 м/с
Начальный угол поворота	φ_0	0 рад
Начальная угловая скорость	$d\varphi_0$	0 рад/с

В рамках численного эксперимента моделировалось движение магнита при следующих начальных условиях: началь-

ное положение составляло 0.15 м по оси X относительно магнитного объекта, траектория движения сохранялась па-

параллельной оси канала на расстоянии 0.195 м от нее. Скорость перемещения вдоль оси X составляла 0.18 м/с. Ре-

зультаты моделирования, представленные на рис. 5, демонстрируют полученные траектории движения.

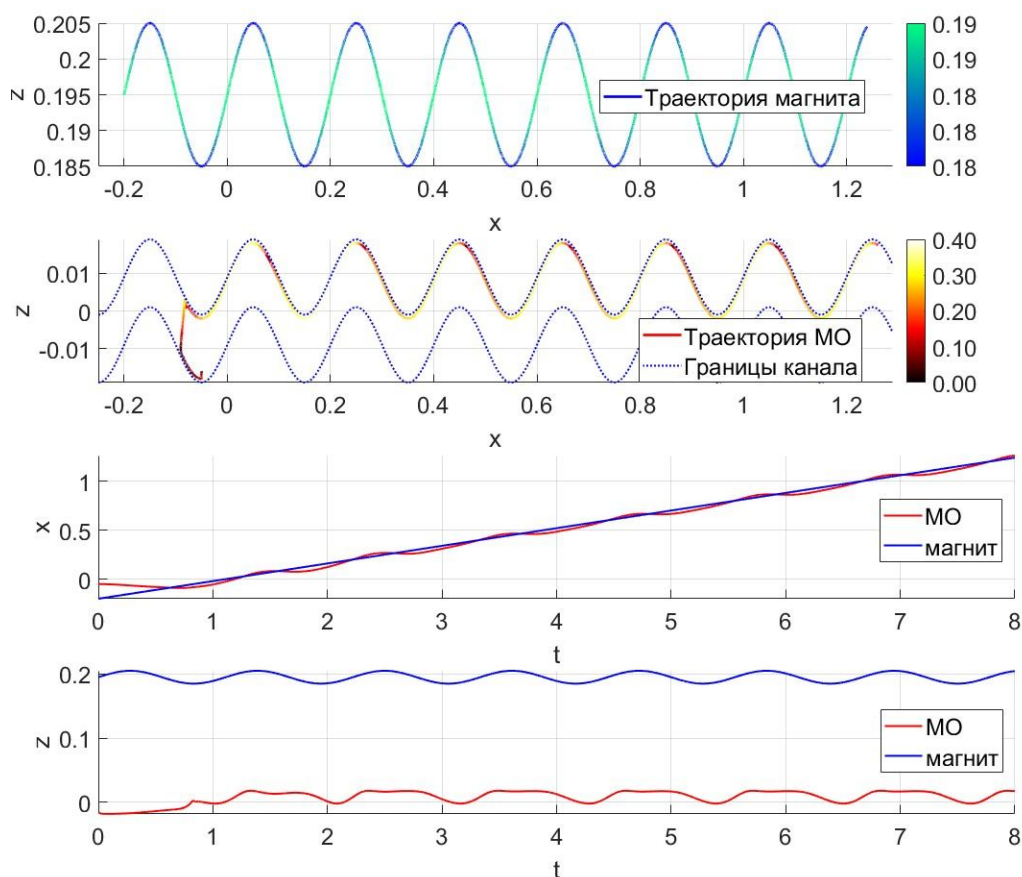


Рис. 5. Траектории МО и магнита

Fig. 5. Trajectories of MO and magnet

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что магнитный объект (МО) устойчиво следует за магнитом, с периодическим запаздыванием в области впадин. На начальном этапе МО движется вдоль нижней стенки канала, с последующим отрывом от опорной поверхности при перемещении вверх по её профилю. При сближении с магнитом на расстояние 150-170 мм наблюдается переход объекта к движению вдоль верхней границы канала.

Для исследования динамики системы в условиях изменяющихся скорост-

ных режимов была выполнена серия расчетов с последовательным увеличением скорости перемещения магнита.

Анализ графиков, представленных на рис. 5-6, позволяет установить зависимость движения объекта в канале от скорости перемещения магнитного поля. При относительно низких скоростях движения магнита наблюдается следование МО за источником поля. Начальная фаза движения характеризуется перемещением объекта вдоль нижней стенки с последующим кратковременным отрывом от опорной поверхности

на высоту, не превышающую 0,2 мм, при движении вверх по стенке канала. После сближения с магнитом на расстояние 0,15–0,2 мм МО совершает переход к верхней поверхности канала, что

свидетельствует о двухступенчатом механизме движения, определяемом совокупным действием силы магнитного притяжения и взаимодействия с границами криволинейного канала.

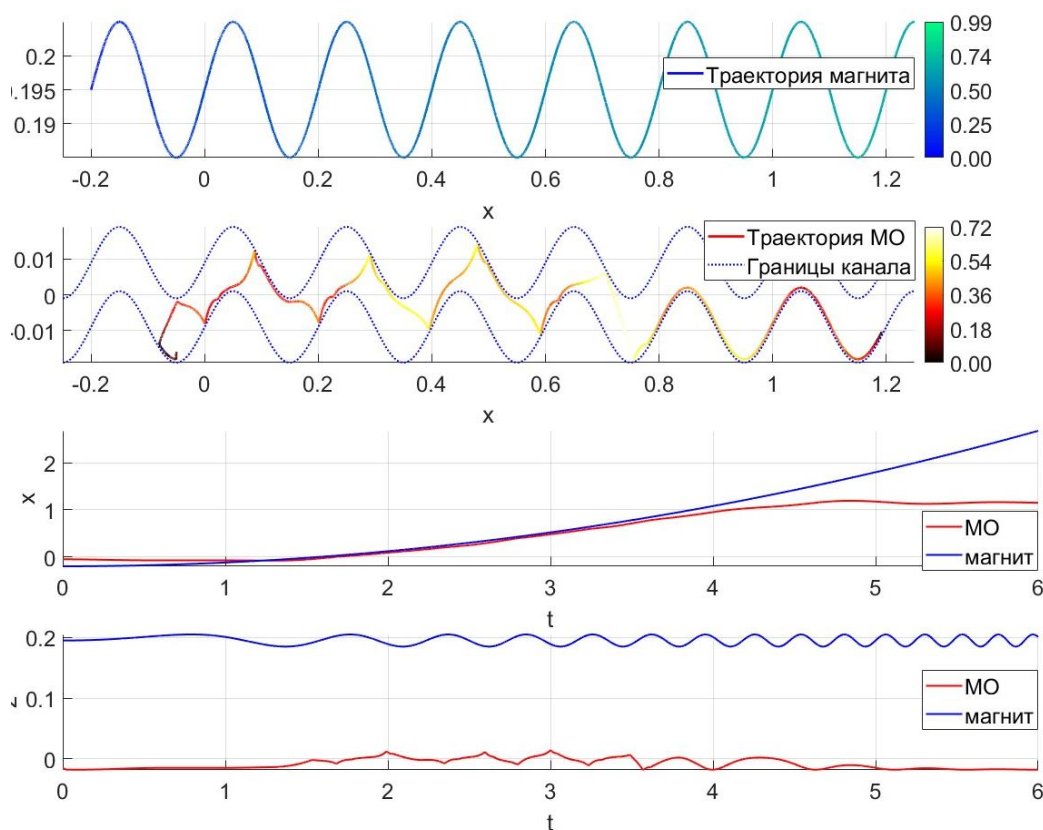


Рис. 6. Результат моделирования траектории движения МО и магнита при равноускоренном движении магнита

Fig. 6. The result of modeling the trajectory of the MO and the magnet at a fixed value of magnet acceleration

При превышении пороговой скорости магнита в 0,66 м/с происходит потеря синхронизации движения МО с магнитным полем. В данном режиме траектория движения объекта приобретает существенно нерегулярный характер, переставая повторять геометрию канала, и сопровождается множественными соударениями со стенками. Интенсивность ударных воздействий и амплитуда отклонений от осевой линии

канала прогрессивно нарастают с увеличением скорости.

Для дальнейшего исследования динамики системы моделировалось движение МО при перемещении магнита вдоль оси канала (рис. 7).

При перемещении магнита вдоль оси канала критическая скорость, соответствующая потере управления магнитным объектом (МО), увеличивается до приблизительно 0,7 м/с.

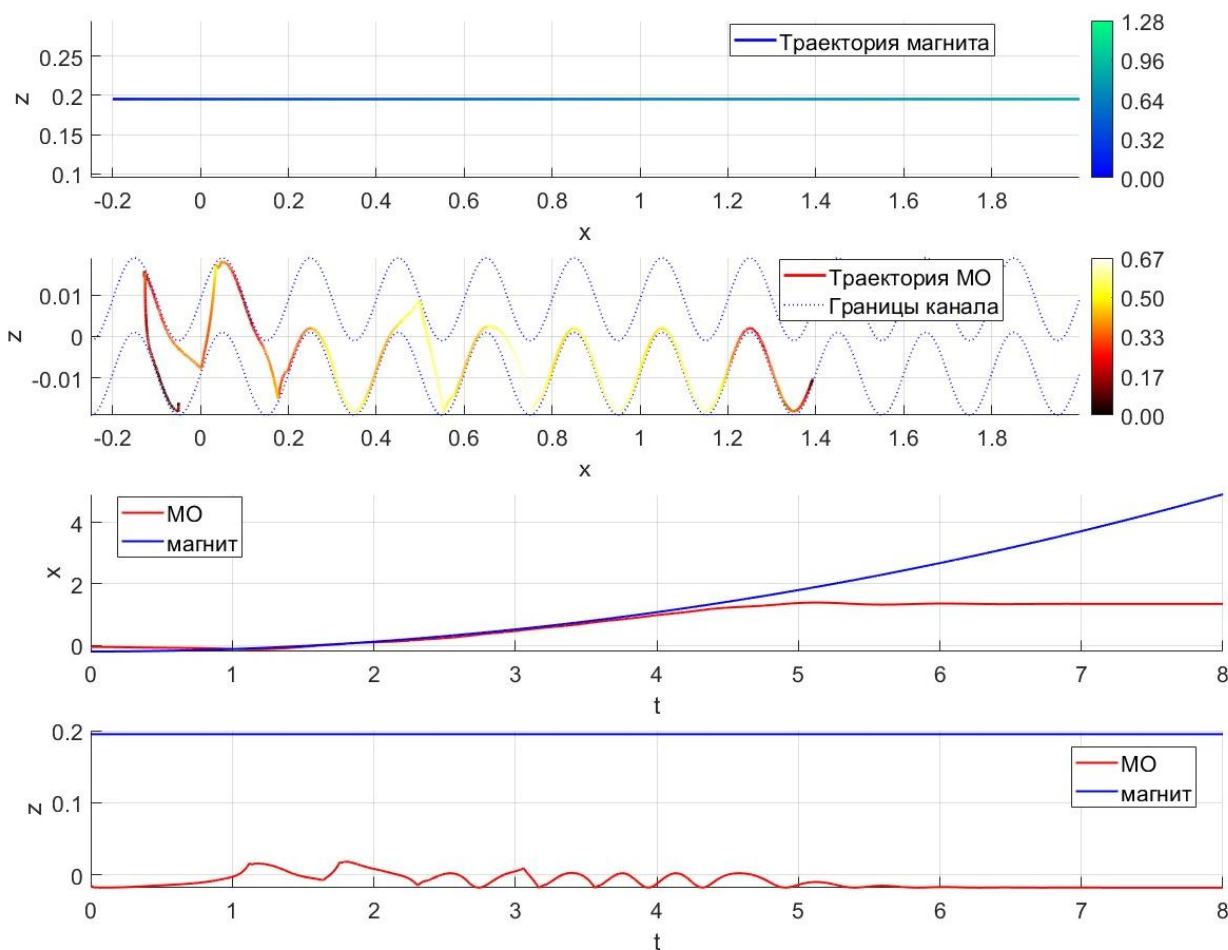


Рис. 7. Результат моделирования траектории движения МО при движении магнита вдоль оси канала

Fig. 7. The result of modeling the trajectory of the MO when the magnet moves along the axis of the channel

Данное явление объясняется более равномерным характером движения источника магнитного поля, что минимизирует локальные ускорения и резкие изменения его траектории. Это, в свою очередь, позволяет МО сохранять устойчивую связь с движущимся магнитным полем при более высоких скоростях.

Проведенный анализ позволяет заключить, что динамика МО в канале формируется под совместным влиянием трех ключевых факторов: силы магнитного притяжения, геометрии канала и кинематических характеристик движе-

ния магнита. Каждый из этих факторов вносит существенный вклад в устойчивость траектории и определяет вероятность соударений объекта с границами канала.

Для исследования поведения системы в экстремальном режиме был проведен расчетный эксперимент с начальной скоростью магнита, превышающей критическое значение.

В результате эксперимента, представленного на рис. 8, была установлена граничная скорость $V_x = 0,3$ м/с.

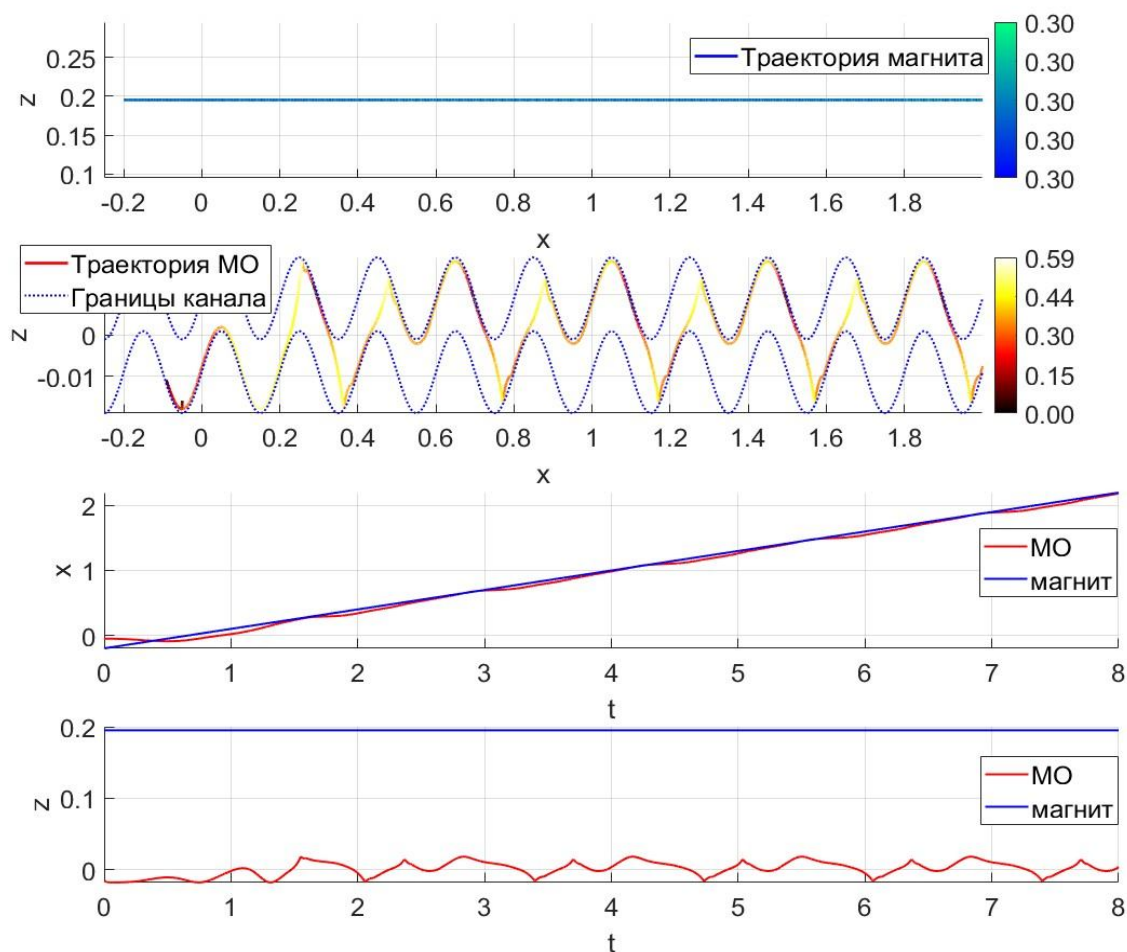


Рис. 8. Результат моделирования траектории движения МО при перемещении магнита вдоль оси канала со скоростью $V_x = 0.3$ м/с

Fig. 8. The result of modeling the trajectory of the MO when the magnet moves along the axis of the channel with a velocity $V_x = 0.3$ m/s

В данной точке магнитный объект (МО) сохраняет управляемость, однако его траектория перестает соответствовать синусоидальной. При превышении этого скоростного порога МО не захватывается магнитным полем и теряет управление. Напротив, при скоростях ниже критической наблюдается явление полного магнитного захвата: объект перемещается вдоль верхней стенки канала, сохраняя с ней непрерывный контакт без отрыва от поверхности.

Выводы

Разработанная математическая модель описывает динамику управляемого движения магнитоактивного объекта сферической формы в криволинейном эластичном канале, учитывая ключевые факторы воздействия: внешнее магнитное поле, гидродинамическое сопротивление, контактное взаимодействие со стенками и их деформацию. Численные эксперименты подтвердили адекватность модели и её применимость для анализа процессов, характерных для эндоваскулярной

эмболизации и других медицинских применений.

Полученные результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Перемещение частицы по синусоидальному каналу эффективно обеспечивается воздействием постоянного магнита.

2. Возникающая реакция стенки канала не превышает допустимых для сосудистых структур значений, составляя до 5 мН в пике и около 1 мН при длительном воздействии.

3. Учёт ключевых физико-геометрических параметров, таких как геометрия канала, свойства частицы, вязкость среды, силы трения и пондеромоторное воздействие, обеспечивает универсальность модели.

Экспериментально установлено, что в условиях тонкого канала эффективность управления магнитным объектом слабо зависит от формы траектории магнита, но критически определяется скоростью его перемещения.

Практическая значимость работы состоит в создании предсказательной модели, применимой для разработки алгоритмов магнитной навигации и оптимизации параметров адресной доставки лекарственных средств для прогрессивных медицинских методик. Полученные результаты формируют основу для дальнейших исследований, направленных на уточнение физических параметров системы, распространение модельных представлений на трёхмерные сосудистые сети и проведение экспериментальной валидации предложенного подхода.

Список литературы

1. Nguyen K.T., Go G., Jin Z., et al. A magnetically guided self-rolled microrobot for targeted drug delivery, real-time X-Ray imaging, and microrobot retrieval // *Advanced Healthcare Materials*. 2021. 10(6). P. 2001681. <https://doi.org/10.1002/adhm.202001681>
2. Ullrich F., Bergeles C., Pokki J., et al. Mobility experiments with microrobots for minimally invasive intraocular surgery // *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2013. 54(4). P. 2853–2863. <https://doi.org/10.1167/iov.12-11176>
3. Ergeneman O., Bergeles C., Kummer M.P., et al. Wireless intraocular microrobots: Opportunities and challenges // *Surgical Robotics: Systems Applications and Visions*. 2010. P. 271-311. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1126-1_13
4. Arcese L., Fruchard M., Ferreira A. Adaptive controller and observer for a magnetic microrobot // *IEEE Transactions on Robotics*. 2013. 29(4). P. 1060-1067. <https://doi.org/10.1109/TRO.2013.2257581>
5. Xie M., Zhang W., Fan C., et al. Bioinspired soft microrobots with precise magneto-collective control for microvascular thrombolysis // *Advanced Materials*. 2020. 32(26). P. 2000366. <https://doi.org/10.1002/adma.202000366>
6. Pries A.R., Secomb T.W., Gahtgens P. Biophysical aspects of blood flow in the microvasculature // *Cardiovascular Research*. 1996. 32(4). P. 654-667. [https://doi.org/10.1016/S0008-6363\(96\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6363(96)00065-X)

7. Lomax H., Pulliam T.H., Zingg D.W. Fundamentals of computational fluid dynamics // *Applied Mechanics Reviews*. 2002. 55(4). P. B61-B61. <https://doi.org/10.1115/1.1483340>
8. Yang Z., Zhang L. Magnetic actuation systems for miniature robots: A review // *Advanced Intelligent Systems*. 2020. 2(9). P. 2000082. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000082>
9. Malchikov A.V., Jatsun S.F., Ryapolov P.A., et al. An experimental stand for studying the motion of magnetically active objects under the influence of the magnetic field of a movable magnet // *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024. 12(4). P. 270-279. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.12401>
10. Malchikov A., Jatsun S., Ryapolov P. Contactless Motion Control System for Magnetoactive Micro-Objects // 2025 International Russian Automation Conference (RusAuto-Con). 2025. P. 631-636. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177342>
11. Malchikov A.V., Yatsun S.F., Ryapolov P.A., et al. Studying the controlled motion of a magnetically active object in a viscous medium // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2025. 89(7). P. 1111-1117. <https://doi.org/10.1134/S106287382571178X>
12. Kim Y., Zhao X. Magnetic soft materials and robots // *Chemical Reviews*. 2022. 122(5). P. 5317-5364. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00481>
13. Wu Z., Li L., Yang Y., et al. Medical micro/nanorobots in complex media // *Chemical Society Reviews*. 2020. 49(22). P. 8088-8112. <https://doi.org/10.1039/D0CS00309C>
14. Aziz A., Pena-Francesch A., Jung I., et al. Medical imaging of microrobots: Toward in vivo applications // *ACS Nano*. 2020. 14(9). P. 10865-10893. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c05530>
15. Hu C., Pané S., Nelson B.J. Soft micro-and nanorobotics // *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018. 1(1). P. 53-75. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-104947>
16. Dong X., Sitti M. Controlling two-dimensional collective formation and cooperative behavior of magnetic microrobot swarms // *The International Journal of Robotics Research*. 2020. 39(5). P. 617-638. <https://doi.org/10.1177/02783649209031>
17. Ebrahimi N., Bi C., Cappelleri D.J., et al. Magnetic actuation methods in bio/soft robotics // *Advanced Functional Materials*. 2021. 31(11). P. 2005137. <https://doi.org/10.1002/adfm.202005137>
18. Yang L., Jiang J., Gao X., et al. Autonomous environment-adaptive microrobot swarm navigation enabled by deep learning-based real-time distribution planning // *Nature Machine Intelligence*. 2022. 4(5). P. 480-493. <https://doi.org/10.1038/s42256-022-00482-8>
19. Behrens M.R., Ruder W.C. Smart magnetic microrobots learn to swim with deep reinforcement learning // *Advanced Intelligent Systems*. 2022. 4(10). P. 2200023. <https://doi.org/10.1002/aisy.202200023>
20. Xu J., Wu T., Zhang Y. Soft microrobots in microfluidic applications // *Biomedical Materials & Devices*. 2023. 1(2). P. 1028-1034. <https://doi.org/10.1007/s44174-023-00071-2>

References

1. Nguyen K.T., Go G., Jin Z., et al. A magnetically guided self-rolled microrobot for targeted drug delivery, real-time X-Ray imaging, and microrobot retrieval. *Advanced Healthcare Materials*. 2021; 10(6): 2001681. <https://doi.org/10.1002/adhm.202001681>
2. Ullrich F., Bergeles C., Pokki J., et al. Mobility experiments with microrobots for minimally invasive intraocular surgery. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2013; 54(4): 2853–2863. <https://doi.org/10.1167/iovs.12-11176>
3. Ergeneman O., Bergeles C., Kummer M.P., et al. Wireless intraocular microrobots: Opportunities and challenges. *Surgical Robotics: Systems Applications and Visions*. 2010; 271-311. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1126-1_13
4. Arcese L., Fruchard M., Ferreira A. Adaptive controller and observer for a magnetic microrobot. *IEEE Transactions on Robotics*. 2013; 29(4): 1060-1067. <https://doi.org/10.1109/TRO.2013.2257581>
5. Xie M., Zhang W., Fan C., et al. Bioinspired soft microrobots with precise magneto-collective control for microvascular thrombolysis. *Advanced Materials*. 2020; 32(26): 2000366. <https://doi.org/10.1002/adma.202000366>
6. Pries A.R., Secomb T.W., Gaetgens P. Biophysical aspects of blood flow in the microvasculature. *Cardiovascular Research*. 1996; 32(4): 654-667. [https://doi.org/10.1016/S0008-6363\(96\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6363(96)00065-X)
7. Lomax H., Pulliam T.H., Zingg D.W. Fundamentals of computational fluid dynamics. *Applied Mechanics Reviews*. 2002; 55(4): B61-B67. <https://doi.org/10.1115/1.1483340>
8. Yang Z., Zhang L. Magnetic actuation systems for miniature robots: A review. *Advanced Intelligent Systems*. 2020; 2(9): 2000082. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000082>
9. Malchikov A.V., Jatsun S.F., Ryapolov P.A., et al. An experimental stand for studying the motion of magnetically active objects under the influence of the magnetic field of a movable magnet. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024; 12(4): 270-279. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.12401>
10. Malchikov A., Jatsun S., Ryapolov P. Contactless Motion Control System for Magnetoactive Micro-Objects. *2025 International Russian Automation Conference (RusAuto-Con)*. 2025; 631-636. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177342>
11. Malchikov A.V., Yatsun S.F., Ryapolov P.A., et al. Studying the controlled motion of a magnetically active object in a viscous medium. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2025; 89(7): 1111-1117. <https://doi.org/10.1134/S106287382571178X>
12. Kim Y., Zhao X. Magnetic soft materials and robots. *Chemical Reviews*. 2022; 122(5): 5317-5364. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00481>
13. Wu Z., Li L., Yang Y., et al. Medical micro/nanorobots in complex media. *Chemical Society Reviews*. 2020; 49(22): 8088-8112. <https://doi.org/10.1039/D0CS00309C>

14. Aziz A., Pena-Francesch A., Jung I., et al. Medical imaging of microrobots: Toward in vivo applications. *ACS Nano*. 2020; 14(9): 10865-10893. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c05530>
15. Hu C., Pané S., Nelson B.J. Soft micro-and nanorobotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018; 1(1): 53-75. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-104947>
16. Dong X., Sitti M. Controlling two-dimensional collective formation and cooperative behavior of magnetic microrobot swarms. *The International Journal of Robotics Research*. 2020; 39(5): 617-638. <https://doi.org/10.1177/02783649209031>
17. Ebrahimi N., Bi C., Cappelleri D.J., et al. Magnetic actuation methods in bio/soft robotics. *Advanced Functional Materials*. 2021; 31(11): 2005137. <https://doi.org/10.1002/adfm.202005137>
18. Yang L., Jiang J., Gao X., et al. Autonomous environment-adaptive microrobot swarm navigation enabled by deep learning-based real-time distribution planning. *Nature Machine Intelligence*. 2022; 4(5): 480-493. <https://doi.org/10.1038/s42256-022-00482-8>
19. Behrens M.R., Ruder W.C. Smart magnetic microrobots learn to swim with deep reinforcement learning. *Advanced Intelligent Systems*. 2022; 4(10): 2200023. <https://doi.org/10.1002/aisy.202200023>
20. Xu J., Wu T., Zhang Y. Soft microrobots in microfluidic applications. *Biomedical Materials & Devices*. 2023; 1(2): 1028-1034. <https://doi.org/10.1007/s44174-023-00071-2>

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Караськов Всеволод Александрович, студент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Andrey V. Mal'chikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Vsevolod A. Karas'kov, Student of Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.383.3

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-111-124>

Уменьшение аппаратных затрат цифровой фильтрации в системе остаточных классов на основе усеченных блоков умножения с накоплением

П. А. Ляхов¹ ✉

¹ Северо-Кавказский федеральный университет
ул. Пушкина, д. 1, г. Ставрополь 355017, Российская Федерация

✉ e-mail: ljahov@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Параллельная обработка данных на основе системы остаточных классов позволяет уменьшить аппаратные затраты устройств цифровой фильтрации сигналов, что является одной из ключевых проблем цифровой обработки сигналов. Распараллеливание вычислений позволило разработать метод цифровой фильтрации сигналов на основе использования усеченных блоков умножения с накоплением в системе остаточных классов. В данной статье представлены преимущества применения разработанного подхода и его ограничения.

Методы. В исследовании применялись методы организации вычислений в системе остаточных классов с диапазонами в 32 и 48 бит и с использованием сбалансированных наборов модулей вида $\{2^n - 1, 2^n, 2^n + 1\}$, аналитической оценки сложности вычислительного устройства и аппаратное моделирование в среде Synopsys Design Compiler с использованием стандартной библиотеки.

Результаты. Снижение аппаратных затрат зафиксировано при использовании модулей специального вида $\{2^n - 1, 2^n, 2^n + 1\}$, позволяющих уменьшить их до 16 139,30 мкм² для фильтров 3-го порядка, 31 152,99 мкм² для фильтров 7-го порядка, 62 507,06 мкм² для фильтров 15-го порядка и 126 564,46 мкм² для фильтров 31-го порядка с организацией арифметической обработки 32-разрядных данных в системе остаточных классов. Таким образом, аппаратные затраты были снижены на 21,5%-23,0% относительно фильтров на основе параллельно-префиксных сумматоров по методу Когге-Стоуна и на 20,6%-22,2% на основе сумматоров параллельного переноса с распространением. Для 48-битных цифровых фильтров с арифметической обработкой данных в системе остаточных классов результаты моделирования показали уменьшение аппаратных затрат от 9,45% до 14%, в зависимости от их порядка.

Заключение. Проведение вычислений в системе остаточных классов позволяет улучшить эксплуатационные характеристики устройств цифровой обработки сигналов, для которых первостепенной задачей является минимизация аппаратных затрат.

Ключевые слова: система остаточных классов; цифровая обработка сигналов; цифровая фильтрация; площадь аппаратной реализации; блок умножения с накоплением.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Ляхов П. А. Уменьшение аппаратных затрат цифровой фильтрации в системе остаточных классов на основе усеченных блоков умножения с накоплением // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 111-124. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-111-124>.

Поступила в редакцию 03.07.2025

Подписана в печать 28.08.2025

Опубликована 22.12.2025

Reduction of digital filtering area in the residue number system based on truncated multiplication with accumulation blocks

Pavel A. Lyakhov ¹ ✉

¹ North-Caucasus Federal University
1, Pushkin str., Stavropol 355017, Russian Federation

✉ e-mail: ljahov@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Parallel data processing based on the residue number system allows to reduce the hardware costs of digital signal filtering devices, which is one of the key problems of digital signal processing. Parallelization of calculations allowed to develop a method of digital signal filtering based on the use of truncated blocks of multiplication with accumulation in the residue number system. This article presents the advantages of using the developed approach and its limitations.

Methods. The study used a method for organizing calculations in a system of residual classes with ranges of 32 and 48 bits and using balanced sets of modules of the form $\{2^n - 1, 2^n, 2^n + 1\}$, an analytical assessment of the complexity of the device calculation, and hardware modeling in the Synopsys Design Compiler environment using the standard library.

Results. The hardware cost reduction was recorded when using special modules $\{2^n - 1, 2^n, 2^n + 1\}$, which allowed them to be reduced to $16,139.30 \mu\text{m}^2$ for 3-rd order filters, $31,152.99 \mu\text{m}^2$ for 7-th order filters, $62,507.06 \mu\text{m}^2$ for 15-th order filters, and $126,564.46 \mu\text{m}^2$ for 31-st order filters with the organization of 32-bits arithmetic data processing in the residue number system. Thus, the hardware costs were reduced by 21.5%-23% relative to filters based on parallel-prefix adders using the Kogge-Stone method and by 20.6%-22.2% based on parallel carry adders with propagation. For 48-bit digital filters with arithmetic processing of data in the residue number system, the simulation results showed a reduction in hardware costs from 9.45% to 14% depending on their order.

Conclusion. Carrying out calculations in the system of residual classes allows improving the operational characteristics of digital signal processing devices, for which the primary task is to minimize hardware costs.

Keywords: residue number system; digital signal processing; digital filtering; hardware implementation area; multiply-accumulate block.

Conflict of interest. The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Lyakhov P. A. Reduction of digital filtering area in the residue number system based on truncated multiplication with accumulation blocks // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 111-124 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-111-124>.

Received 03.07.2025

Accepted 28.08.2025

Published 22.12.2025

Введение

Обработка цифровых сигналов лежит в основе многих отраслей современной промышленности [1]. Одним из методов их обработки на практике является

цифровая фильтрация (ЦФ) с конечной импульсной характеристикой, использование которой позволяет избежать ошибок в вычислениях за счет их устойчивости и отсутствия обратной связи [2]. Реа-

лизация ЦФ требует определенных, зачастую весьма существенных, аппаратных, временных и энергетических затрат [3].

Проблемой уменьшения потребления ресурсов устройствами ЦФ занимаются научные коллективы со всего мира. Так, исследователи из Японии для уменьшения аппаратных затрат устройства ЦФ используют конструкцию симметричной свертки, которая позволяет уменьшить число множителей, благодаря чему достигается желаемый результат [4].

Еще одним способом уменьшения ресурсных затрат является использование параллельной обработки данных, например, с использованием естественного арифметического параллелизма системы остаточных классов (СОК) [5]. Сложность использования СОК для ЦФ заключается в выборе эффективного набора модулей, учитывая существующее ограничение к ним, заключающееся в попарной взаимной простоте друг к другу. Подобрать такие модули пытались многие зарубежные исследователи. Например, Хиасат А. предложил метод определения знака числа в СОК на основе пяти модулей $\{2^{2n+1}, 2^n-1, 2^{n+1}, 2^n-2^{n+\frac{1}{2}}+1, 2^{n+2^{n+\frac{1}{2}}}+1\}$, где $n=2k+1$, $k>0$ и $p \in \mathbb{N}$, $p < n - \frac{5}{2}$ [6]. Тораби и Джаберикур предложили метод сравнения чисел в СОК на основе модулей $\{2^n-1, 2^n, 2^{n+1}\}$ [7]. Коллеги из Индии составили краткий обзор методов преобразований в СОК чисел с набором модулей $\{2^n-1, 2^n, 2^{n+1}\}$ [8].

Цель настоящего исследования заключается в снижении аппаратных за-

трат на проведение ЦФ сигналов в СОК. В работе представлен модифицированный метод ЦФ в СОК на основе усеченных блоков умножения с накоплением. Представлены преимущества применения разработанного подхода и его ограничения.

Оставшаяся часть статьи организована следующим образом. В разделе «Материалы и методы» излагается предложенный метод реализации усеченных блоков умножения с накоплением для модулей СОК специального вида. В разделе «Результаты и их обсуждение» представлены теоретическая оценка производительности разрабатываемых устройств и их аппаратное моделирование на современных специализированных вычислительных устройствах. В заключение подводятся итоги работы.

Материалы и методы

Методы реализации ЦФ на основе модулей СОК вида 2^n+1 имеют ряд недостатков, связанных с затратами на арифметические операции, например, для необходимого специализированного преобразования Diminished-one ($D-1$) [9]. Такое преобразование позволяет повысить эффективность вычислений по модулю 2^n+1 . Принцип преобразования $D-1$ заключается в следующем. Если остаток по модулю 2^n+1 отличен от 0, то из него вычитается единица. Если остаток по модулю 2^n+1 равен 0, то значение старшего значащего бита указанного остатка заменяется на 1. Сложение и умножение чисел по модулю

2^n+1 с использованием $D-1$ преобразования выполняются согласно выражениям:

$$x' + y' + \overline{C_{\text{вых}}} = s', \quad (1)$$

$$x'y' + x' + y' = p', \quad (2)$$

где x' и y' являются операндами, представленными в кодах $D-1$; s' и p' являются результатами сложения и умножения, соответственно, которые представлены в коде $D-1$, а $\overline{C_{\text{вых}}}$ представляет собой противоположный элемент старшего бита переноса [10]. Обратное преобразование из $D-1$ в традиционное представление по модулю 2^n+1 СОК происходит путем получения суммы младших бит значения x' до $n-1$ бита и инверсии $\overline{x'_n}$:

$$x_{n:0} = x'_{n-1:0} + \overline{x'_n}, \quad (3)$$

где $x_{n:0}$ представляет собой исходное значение остатка по модулю 2^n+1 . Для уменьшения площади цифровой фильтрации в СОК использована методика распараллеливания вычислений со сбалансированным набором модулей, описанная далее.

В этой работе для наборов модулей СОК специального вида 2^n-1 , 2^n предлагается использовать модифицированные усеченные блоки умножения с накоплением (УБУН) и усеченный блок умножения с циклическим переносом старшего бита (УБУН-ЦПСБ) [11, 12]. Модификация заключается в использовании сумматора с последовательным переносом (СПП), представленного на рис. 1, и СПП с циклическим переносом старшего бита (СПП-ЦПСБ), представленного на рис. 2 вместо параллельно-префиксного сумматора Когге-Стоуна (СКС). На рис. 1 и 2 A, B – слагаемые, S – бит суммы, блок ПС – блок полного сумматора, блок ПП – блок полусумматора.

Для модуля вида 2^n+1 применен модифицированный УБУН-ЦПСБ, основанный на наличии блоков перевода из СОК в $D-1$ и обратно (рис. 3 и 4), для которых предложены модифицированные сумматоры ПП и СПП.

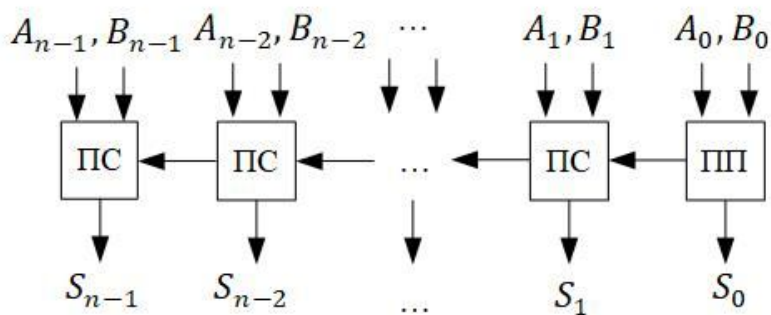


Рис. 1. Архитектура сумматора СПП по модулю 2^n

Fig. 1. Architecture of CPA modulo 2^n

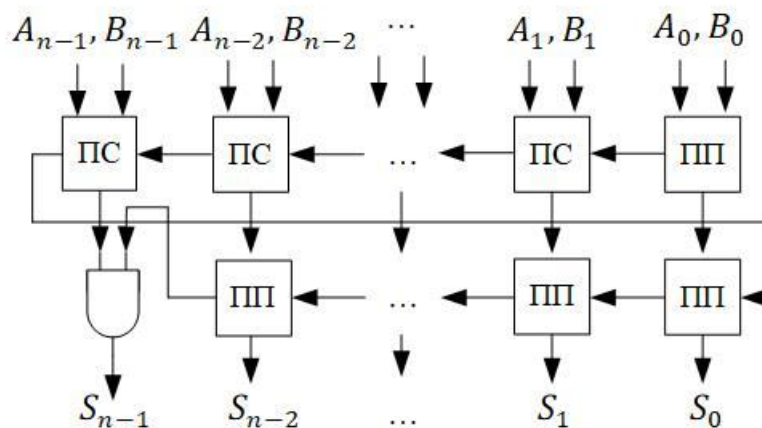


Рис. 2. Архитектура сумматора СПП-ЦПСБ по модулю $2^n - 1$

Fig. 2. Architecture of EAC-CPA modulo $2^n - 1$

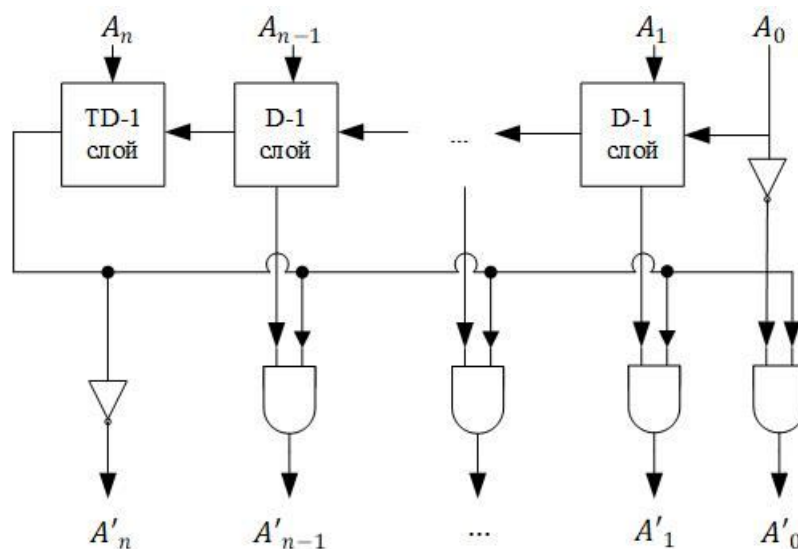


Рис. 3. Схема реализации метода преобразования числа по модулю $2^n + 1$ в $D - 1$, основанного на СПП

Fig. 3. Scheme of implementation of the method of converting a number by modulo $2^n + 1$ into $D - 1$ based on CPA

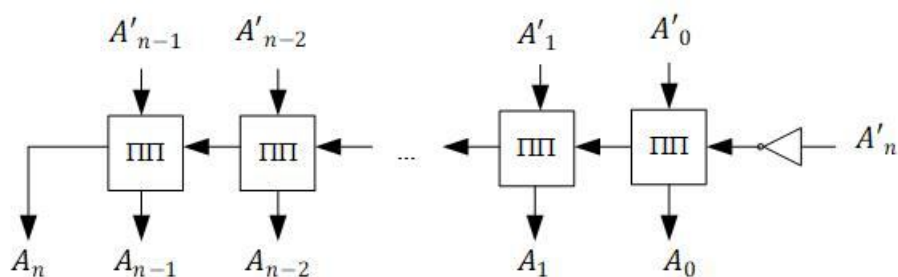


Рис. 4. Схема реализации метода преобразования числа по модулю $2^n + 1$ в $D - 1$, основанного на ПП

Fig. 4. Scheme of implementation of the method of converting a number by modulo $2^n + 1$ into $D - 1$ based on HA

Схема, представленная на рис. 3, использует сумматор СПП, упрощенный за счет следующих свойств логических выражений:

$$S = A \oplus 1 \oplus D = \bar{A} \oplus D = A \odot D, \quad (4)$$

$$C = ((A \oplus 1) \wedge D) \vee (A \wedge 1) = (\bar{A} \wedge D) \vee A = A \vee D, \quad (5)$$

C – бит переноса, $\oplus, \odot, \wedge, \vee$ и \bar{A} – логические элементы, обозначающие

“Исключающее ИЛИ”, “Исключающее НЕ-ИЛИ”, “И”, “ИЛИ”, “НЕ”, соответственно. Схемы блоков для преобразования чисел по модулю 2^n+1 в $D-1$, используемые в рис. 3, представлены на рис. 5. Для обратного перевода числа из $D-1$ достаточно сложить старший бит с его инверсией, что продемонстрировано на рис. 3.

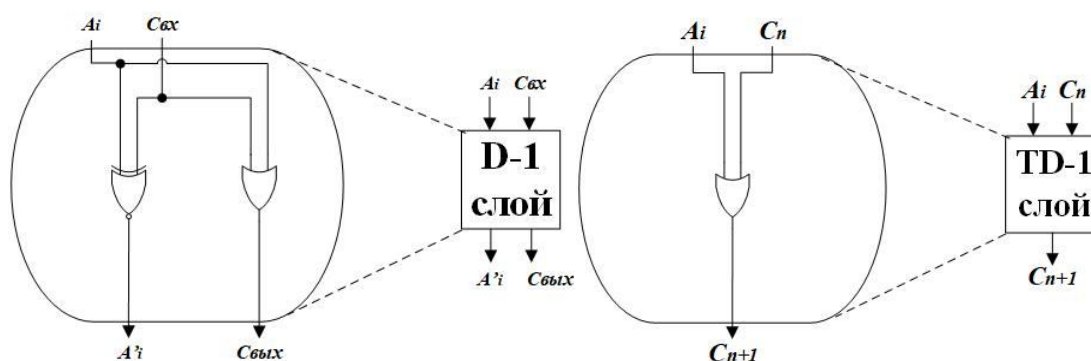


Рис. 5. Схемы метода вычисления для перевода числа в $D - 1$

Fig. 5. Schemes of the calculation method for converting a number to $D - 1$

Блоки УБУН, УБУН-ЦПСБ и модифицированный УБУН-ЦПСБ используют генератор частичных произведений (ГЧП) и дерево сумматоров с сохранением переноса, подробно описанных в [13]. Отличительной чертой модифицированный УБУН-ЦПСБ от двух остальных блоков является отличное от них число операций сложений, наличие мультиплексоров и определитель старшего бита множителей. Если старший бит одного из множителей равен «1» (обозначает значение «0» в кодах $D - 1$), то результатом вычисления будут два слагаемых с предыдущего модифицированного УБУН-ЦПСБ (рис. 6). Ес-

ли это первый блок УБУН, то результатом вычисления будут два слагаемых, сумма которых обращается в нуль. В промежуточных вычислениях старшие биты множителей не отслеживаются. Завершающее суммирование двух чисел выполняется на основе предложенного модифицированного сумматора СПП-ЦПСБ, представленного на рис. 7. В отличие от СКС, старший бит переноса (БС) инвертируется и подается на последовательно соединенные блоки ПП. В первом ПП и в каждом ПС необходимо отслеживать результат операции сложения по модулю 2 двух чисел $A \oplus B$.

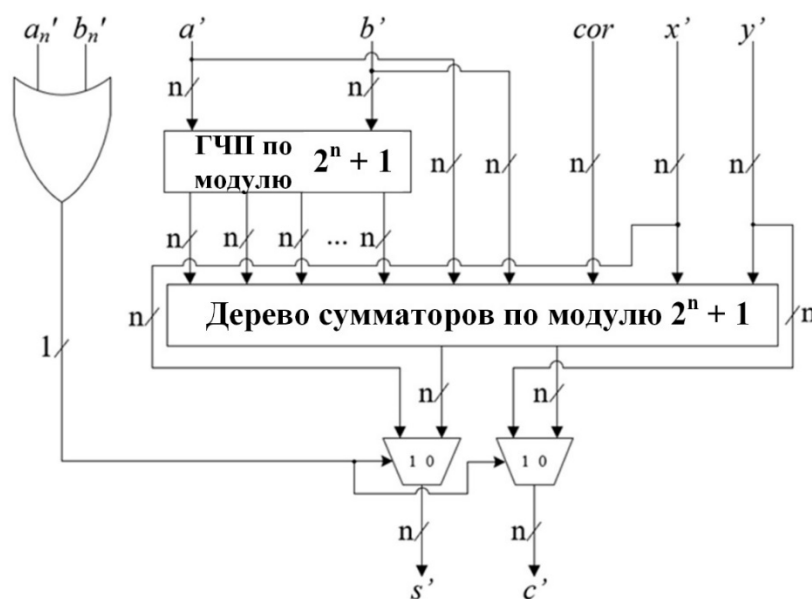


Рис. 6. Архитектура модифицированного УБУН-ЦПСБ

Fig. 6. Architecture of the modified IEAC-TMAC

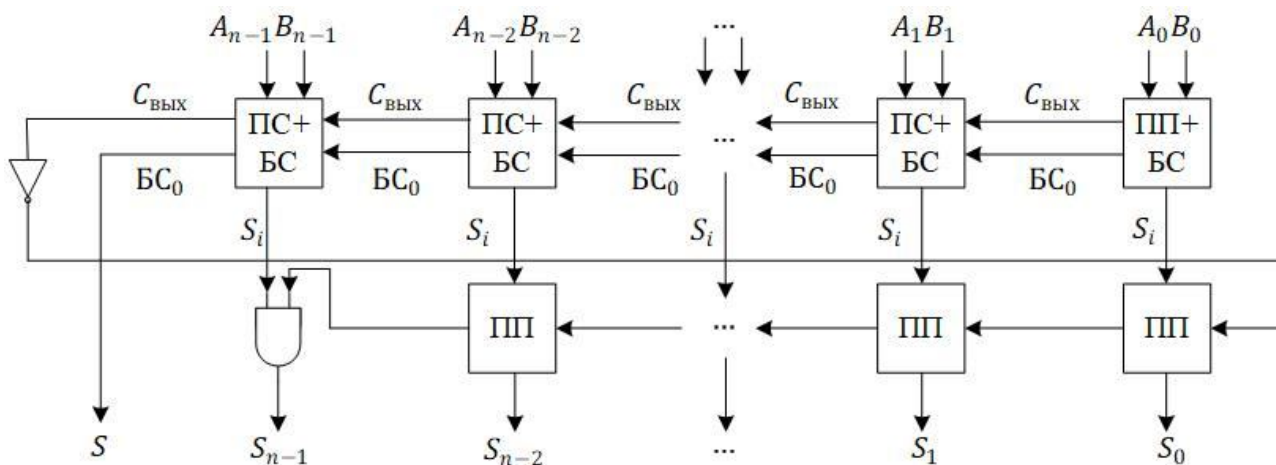


Рис. 7. Архитектура модифицированного сумматора СПП-ЦПСБ

Fig. 7. Architecture of the modified EAC-CPA adder

В следующем разделе автором представлены модель оценки сложности вычислительного устройства (МОСВУ), описанных в данном разделе и результаты аппаратной реализации предложенного метода.

Результаты и их обсуждение

Автором рассмотрены фильтры с организацией вычислений в СОК с диапа-

зонами в 32 и 48 бит и с использованием сбалансированных наборов модулей из [13]. Моделирование проведено для фильтров 3, 7, 15 и 31 порядка. Оценка предложенной архитектуры фильтра по аппаратным затратам произведена на основе МОВСУ [14]. В табл. 1 представлены результаты расчетов МОСВУ для каждого из блоков УБУН, УБУН - ЦПСБ и модифицированного УБУН -

ЦПСБ по различным модулям. По результатам в табл. можно заметить, что модифицированный УБУН - ЦПСБ за-

нимает больше аппаратных ресурсов по сравнению с УБАН и УБУН - ЦПСБ.

Таблица 1. Расчет МОСВУ площади устройства для различных блоков УБУН

Table 1. Calculation of the computational device complexity estimation model (CDCEM) area of the device for various TMAC units

	УБУН / UBUN	УБУН - ЦПСБ / UBUN - TSPSB	Модифицированный УБУН - ЦПСБ / Modi- fied UBUN - TSPSB
Суммирование и умножение за 1 этап	$8n^2$	$8n^2$	$n^2+27n+18n$
Суммирование последних чисел	$7n$	$10n-5$	$11n-6$
$D - 1$ преобразование	—	—	$7n-6$
Итого	$8kn^2+8n^2+7n$	$8kn^2+8n^2+10n-5$	$8kn^2+27kn+k+8n^2+45n-11$

Табл. 2 и 3 демонстрируют результаты оценки затрачиваемой площади устройства на основе МОСВУ для фильтров с 32- и 48-разрядными диапазонами СОК. Анализ полученных теоретических результатов показал, что предложенный фильтр имеет низкие аппаратные затраты по сравнению с известными кон-

струкциями: на основе сумматоров СКС от 9,7% до 10,3% и на основе сумматоров СПП от 8,4% до 9,5% для 32-разрядных диапазонов СОК и от 9,7% до 10,3% на основе сумматоров СКС и от 8,4% до 9,5% на основе СПП, в зависимости от порядка фильтра.

Таблица 2. Оценка МОСВУ для фильтров с 32-разрядным диапазоном СОК на основе сумматоров СПП и СКС

Table 2. CDCEM evaluation for filters with a 32-bit range of RNS based on CPA and KSA adders

Набор модулей / Set of modules	3-й порядок / 3rd order		7-й порядок / 7th order		15-й порядок / 15th order		31-й порядок / 31st order	
	СПП	СКС	СПП	СКС	СПП	СКС	СПП	СКС
2047, 2048, 4095	12649	12881,38	25001	25233,38	49705	49937,38	99113	99345,38
127, 255, 511, 512	9088	9274,13	17888	18074,13	35488	35674,13	70688	70874,13
31, 32, 127, 255, 511	8113	8284,20	15921	16092,20	31537	31708,20	62769	62940,20
7, 15, 16, 31, 127, 2047	7855	8015,21	15407	15567,21	30511	30671,21	60719	60879,21

Таблица 3. Оценка МОСВУ для фильтров с 48-разрядным диапазоном СОК на основе сумматоров СПП и СКС**Table 3.** CDCEM evaluation for filters with a 48-bit range of RNS based on CPA and KSA adders

Набор модулей / Set of modules	3-й порядок / 3rd order		7-й порядок / 7th order		15-й порядок / 15th order		31-й порядок / 31st order	
	СПП	СКС	СПП	СКС	СПП	СКС	СПП	СКС
127, 511, 1023, 2047, 4096	16274	16586,42	32114	32426,42	63794	64106,42	127154	127466,42
31, 127, 255, 511, 512, 2047	13910	14191,12	27382	27663,12	54326	54607,12	104876	105148,70

Моделирование разрабатываемых цифровых фильтров с вычислениями в СОК на аппаратном уровне проводилось в среде Synopsys Design Compiler с использованием стандартных параметров и библиотек. Вычисления проводились на рабочей станции с процессором Intel Core i5-12450H, с 16 ГБ оперативной памяти и 64-битной операционной системой Windows 10. Для сравнения выбирались сбалансированные наборы модулей СОК, продемонстрировавшие лучшие показатели по аппаратным затратам. Предложенный фильтр сравнивался с известными архитектурами с 32-бит-

ными и 48-битным диапазонами фильтра СОК [13, 15]. Результаты моделирования представлены в табл. 4 и 5.

Результаты аппаратного моделирования 32-разрядных фильтров в СОК продемонстрировали, что предложенный фильтр требует меньше аппаратных затрат, чем фильтры на основе СКС [13] на 21,5%-23% и 20,6%-22,2% на основе СПП [13], в зависимости от порядка фильтра. Для 48-разрядного фильтра СОК результаты моделирования показали уменьшение аппаратных затрат от 9,45% до 14% в зависимости от порядка фильтра [15-20].

Таблица 4. Результаты аппаратного моделирования 32-разрядных фильтров с вычислениями в СОК: площадь устройства, мкм²**Table 4.** Hardware modeling results for 32-bit filters with calculations in RNS: circuit area, μm^2

Набор модулей / Set of modules	3-й порядок / 3rd order	7-й порядок / 7th order	15-й порядок / 15th order	31-й порядок / 31st order
{7, 15, 16, 31, 127, 2047} на основе сумматоров СКС	20724,69	40456,07	79856,12	161175,75
{7, 15, 16, 31, 127, 2047} на основе сумматоров СПП	20346,38	40074,16	79465,79	160775,37
{7, 9, 17, 31, 32, 65, 127} (предложенный)	16139,30	31152,99	62507,06	126564,46

Таблица 5. Результаты аппаратного моделирования 48-разрядных фильтров с вычислениями в СОК: площадь устройства, мкм²**Table 5.** Hardware modeling results for 48-bit filters with calculations in RNS: circuit area, μm^2

Набор модулей / Set of modules	3-й порядок / 3rd order	7-й порядок / 7th order	15-й порядок / 15th order	31-й порядок / 31st order
{64, 59, 53, 47, 43, 41, 37, 35, 33}	36751,78	68714,95	135060,56	273103,34
{17, 31, 32, 33, 65, 127, 257, 511} (предложенный)	31490,98	61075,75	122237,34	247278,22

Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что использование реализации ЦФ, построенного на основе метода организации арифметической обработки со сбалансированной СОК вида $\{2^n-1, 2^n, 2^n+1\}$, уменьшает аппаратные расходы устройства. Полученный результат может быть использован для разработки перспективных систем и устройств цифровой обработки сигналов, изображений и видео.

Выводы

В данной работе предлагается метод реализации цифровой фильтрации сигналов в СОК с использованием сбалансированных наборов модулей, вклю-

чающих модули вида 2^n+1 . Результаты теоретического и практического моделирования показали уменьшение аппаратных затрат по сравнению с известными аналогами до 23%. Разработанные фильтры позволяют улучшить эксплуатационные характеристики устройств цифровой обработки сигналов, где первостепенной задачей является минимизация аппаратных затрат. Наиболее перспективными областями для практического внедрения разработанного подхода являются специализированные ускорители нейросетевых вычислений, медицинская визуализация и беспилотные транспортные системы.

Список литературы

1. Sundararajan D. Digital Signal Processing: An Introduction // *Springer Nature*. 2024. 483 с. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62368-5>.
2. Kaur R., Singh Patterh M., Dhillon J.S. A new greedy search method for the design of digital IIR filter // *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. 2015; №27(3): 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2014.03.021>.
3. Tomczak T. Fast Sign Detection for RNS $\{2^n-1, 2^n, 2^n+1\}$ // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2008. Vol. 55, № 6. P. 1502–1511. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2008.917994>.

4. Ye J., Yanagisawa M., Shi Y. Scalable hardware efficient architecture for parallel FIR filters with symmetric coefficients // *Electronics*. 2022. №11(20). P. 3272. <https://doi.org/10.3390/electronics11203272>.
5. Omondi A. R., Premkumar A. B. Residue number systems: theory and implementation // *World Scientific*. 2007. Vol. 2.
6. Cheon J. E., Kang M., Kim T., Jung J., Yeo Y. Batch Inference on Deep Convolutional Neural Networks With Fully Homomorphic Encryption Using Channel-By-Channel Convolutions // *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 2025. Vol. 22, no. 2. P. 1674-1685. <https://doi.org/10.1109/tdsc.2024.3448406>.
7. Mu L. Enhanced Redundant Residue Number System Codes for Reliable Diffusive Molecular Communication // *IEEE Transactions on Nanobioscience*. 2025. Vol. 24, no. 3. P. 366-373. <https://doi.org/10.1109/tnb.2025.3553183>.
8. Federated learning using a memristor compute-in-memory chip with in situ physical unclonable function and true random number generator / X. Li, B. Gao, Q. Qin, P. Yao, J. Li, H. Zhao, C. Liu, Q. Zhang, Z. Hao, Y. Li, D. Kong, J. Xu, J. Yang, J. Tang, Y. Niu, X. Yan, Q. He, H. Wu // *Nature Electronics*. 2025. Vol. 8, no. 6. P. 518-528. <https://doi.org/10.1038/s41928-025-01390-6>.
9. Isupov K. An overview of high-performance computing using the residue number system // *Program systems theory and applications*. 2021. Vol. 12, no. 2. P. 137-192. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2021-12-2-137-192>.
10. Selianinau M., Woźna-Szcześniak B. An Efficient Implementation of Montgomery Modular Multiplication Using a Minimally Redundant Residue Number System // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025. Vol. 15, no. 10. P. 5332. <https://doi.org/10.3390/app15105332>.
11. Hiasat A. A reverse converter and sign detectors for an extended RNS fivemoduli set // *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.* 2017. № 64 (1). P. 111–121. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2612723>.
12. Torabi Z., Jaberipur G. Low-Power/Cost RNS comparison via partitioning the dynamic range // *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.* 2016. № 24(5). P.1849–1857. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2015.2484618>.
13. Mohan P.A., Phalguna P.S. Evaluation of mixed-radix digit computation techniques for the three moduli RNS $\{2^n-1, 2^n, 2^n+1\}$ // *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs*. 2021. № 68(4). P.1418–1422. <https://doi.org/10.1109/>.
14. Bergerman M., Lyakhov P., Abdulsalyamova A. Modulo 2^k+1 Truncated Multiply-Accumulate Unit // *International Conference on Actual Problems of Applied Mathematics and Computer Science*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2022. P.343-352. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34127-4_33
15. Gupta T., Akhter S. Design and implementation of area-power efficient generic modular adder using flagged prefix addition approach // *2021 7th International Conference*

16. Efstathiou C., Vergos H.T., Nikolos D. Fast parallel-prefix modulo 2^n+1 adders // *IEEE Trans. Comput.* 2004. № 53(9). P. 1211–1216. <https://doi.org/10.1109/TC.2004.60>.

17. Бергерман М.В. Использование системы остаточных классов с модулями вида $\{2^n-1, 2^n, 2^n+1\}$ для снижения аппаратных затрат цифрового фильтра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. №1. С.32-43. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-1-3>

18. High-performance digital filtering on truncated multiply-accumulate units in the residue number system / P. Lyakhov, M. Valueva, G. Valuev, N. Nagornov // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 209181-209190. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038496>.

19. Rajanala A., Tyagi A. An area estimation technique for module generation // Proceedings., 1990 IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors, 1990. P. 459-462.

20. Belghadr A., Jaberipur G. Efficient variable-coefficient RNS-FIR filters with no restriction on the moduli set // *Signal, Image and Video Processing*. 2022. Vol. 16, № 6. P. 1443-1454. <https://doi.org/10.1007/s11760-021-02097-9>.

References

1. Sundararajan D. Digital Signal Processing: An Introduction. *Springer Nature*. 2024; 483 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62368-5>.

2. Kaur R., Singh Patterh M., Dhillon J.S. A new greedy search method for the design of digital IIR filter. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2015; (27): 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2014.03.021>.

3. Tomczak T. Fast Sign Detection for RNS $\{2^n-1, 2^n, 2^n+1\}$. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2008; 55 (6):1502–1511. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2008.917994>.

4. Ye J., Yanagisawa M., Shi Y. Scalable hardware efficient architecture for parallel FIR filters with symmetric coefficients. *Electronics*. 2022; (11): 3272. <https://doi.org/10.3390/electronics11203272>.

5. Omondi A. R., Premkumar A. B. Residue number systems: theory and implementation. *World Scientific*. 2007; 2.

6. Cheon J. E., Kang M., Kim T., Jung J., Yeo Y. Batch Inference on Deep Convolutional Neural Networks With Fully Homomorphic Encryption Using Channel-By-Channel Convolutions. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 2025, 22(2): 1674-1685. <https://doi.org/10.1109/tdsc.2024.3448406>.

7. Mu L. Enhanced Redundant Residue Number System Codes for Reliable Diffusive Molecular Communication. *IEEE Transactions on Nanobioscience*. 2025; 24(3): 366-373. <https://doi.org/10.1109/tnb.2025.3553183>.

8. Li X., Gao B., Qin Q., Yao P., Li J., Zhao H., Liu C., Zhang Q., Hao Z., Li Y., Kong D., Xu J., Yang J., Tang J., Niu Y., Yan X., He Q., Wu H. Federated learning using a memristor compute-in-memory chip with in situ physical unclonable function and true random number generator. *Nature Electronics*. 2025; 8(6): 518-528. <https://doi.org/10.1038/s41928-025-01390-6>.

9. Isupov K. An overview of high-performance computing using the residue number system. *Program systems theory and applications*. 2021; 12(2): 137-192. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2021-12-2-137-192>.

10. Selianinau M., Woźna-Szcześniak B. An Efficient Implementation of Montgomery Modular Multiplication Using a Minimally Redundant Residue Number System. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025; 15(10): 5332. <https://doi.org/10.3390/app15105332>.

11. Hiasat A. A reverse converter and sign detectors for an extended RNS fivemoduli set. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.* 2017; (64): 111–121. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2612723>.

12. Torabi Z., Jaberipur G. Low-Power/Cost RNS comparison via partitioning the dynamic range. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.* 2016; (24): 1849–1857. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2015.2484618>.

13. Mohan P.A., Phalguna P.S. Evaluation of mixed-radix digit computation techniques for the three moduli RNS $\{2^n-1, 2^n, 2^n+1\}$. *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs*. 2021; (68): 1418–1422. <https://doi.org/10.1109/>.

14. Bergerman M., Lyakhov P., Abdulsalyamova A. Modulo 2^k+1 Truncated Multiply-Accumulate Unit. In: *International Conference on Actual Problems of Applied Mathematics and Computer Science*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2022. P. 343-352. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34127-4_33

15. Gupta T., Akhter S. Design and implementation of area-power efficient generic modular adder using flagged prefix addition approach. In: *2021 7th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*. 2021. P. 302-307. <https://doi.org/10.1109/icsc53193.2021.9673363>.

16. Efstathiou C., Vergos H.T., Nikolos D. Fast parallel-prefix modulo $2n+1$ adders. *IEEE Trans. Comput.* 2004; (53): 1211–1216. <https://doi.org/10.1109/TC.2004.60>.

17. Bergerman M.V. Using a residual class system with modules of the form $\{2^n-1, 2^n, 2^n+1\}$ to reduce the hardware costs of a digital filter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2023; (1): 32-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-1-3>.

18. Lyakhov P., Valueva M., Valuev G., Nagornov N. High-performance digital filtering on truncated multiply-accumulate units in the residue number system. *IEEE Access*. 2020; 8: 209181-209190. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038496>.
19. Rajanala A., Tyagi A. An area estimation technique for module generation. *Proceedings., 1990 IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors*. 1990. P. 459-462.
20. Belghadr A., Jaberipur G. Efficient variable-coefficient RNS-FIR filters with no restriction on the moduli set. *Signal, Image and Video Processing*. 2022; 16(6): 1443-1454. <https://doi.org/10.1007/s11760-021-02097-9>.

Информация об авторе / Information about the Author

Ляхов Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой математического моделирования, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация, e-mail: ljahov@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0487-4779>

Pavel A. Lyakhov, Cand of Sci. (Physico-Mathematical), Head of the Mathematical Modeling Department, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation, e-mail: ljahov@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0487-4779>

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.93

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-125-139>

Применение искусственного интеллекта в задачах обнаружения деструктивных воздействий на информационные и технические системы

Д.Е. Селиверстов¹ ✉, К.Д. Русаков¹

¹ Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук
ул. Профсоюзная, д. 65, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: Seliverstov_dmitriy@rambler.ru

Резюме

Целью работы являлось обоснование эффективности применения и сравнение методов искусственного интеллекта (машинного обучения и глубокого обучения) для своевременного обнаружения деструктивных воздействий на информационные и технические системы.

Методы. Выполнен анализ современных научных источников, включая обзоры и стандарты по кибербезопасности, а также проведен эксперимент на открытом наборе данных сетевых атак (UNSW-NB15) с использованием алгоритмов машинного обучения (Random Forest) и глубокой нейронной сети. Оценка проводилась по метрикам точности, полноты обнаружения, F1 и др.

Результаты. Методы ML/DL демонстрируют существенно более высокую точность обнаружения воздействий по сравнению с традиционными сигнатурными средствами: на датасете UNSW-NB15 достигнута точность ~96% при использовании нейронной сети против ~70% у сигнатурного подхода. Показано, что глубокое обучение позволяет выявлять ранее неизвестные атаки (в т.ч. сложные многовекторные) за счет распознавания скрытых аномалий, а ансамблевые и федеративные подходы повышают надежность и скорость обнаружения.

Заключение. Интеграция методов ИИ в системы мониторинга безопасности значительно повышает эффективность защиты информационных и технических систем за счет проактивного выявления кибератак с минимальными ложными срабатываниями. Экспериментальные результаты подтверждают практическую применимость выбранных методов для защиты сетевой инфраструктуры (энергетика, связь, промышленный IoT), однако требуют дальнейшего развития в части обеспечения устойчивости к воздействиям и соблюдения принципов надежности ИИ.

Ключевые слова: искусственный интеллект; машинное обучение; глубокое обучение; цифровой двойник; федеративное обучение; обнаружение атак; выявление аномалий; ситуационная осведомленность; автоматическое реагирование; кибербезопасность; эргатические системы; киберустойчивость.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Селиверстов Д.Е., Русаков К.Д. Применение искусственного интеллекта в задачах обнаружения деструктивных воздействий на информационные и технические системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 125-139. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-125-139>.

Поступила в редакцию 03.09.2025

Подписана в печать 14.10.2025

Опубликована 22.12.2025

© Селиверстов Д.Е., Русаков К.Д., 2025

Application of artificial intelligence for detecting information-technical impacts

Dmitry E. Seliverstov ¹ ✉, Konstantin D. Rusakov ¹

¹ V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences
65 Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: Seliverstov_dmitriyy@rambler.ru

Abstract

Purpose of the work was to substantiate the effectiveness of applying artificial intelligence techniques (machine learning and deep learning) for the timely detection of destructive information-technical impacts on critical infrastructure objects.

Methods. An analysis of scientific sources has been conducted scientific sources, including cybersecurity surveys and standards, and conducted an experiment on a public network attack dataset (UNSW-NB15) using machine learning (Random Forest) and a deep neural network. Evaluation was based on metrics such as accuracy, detection recall, F1-score, etc.

Results. ML/DL methods show significantly higher attack detection accuracy compared to traditional signature-based tools: ~96% accuracy was achieved on the UNSW-NB15 dataset using a neural network, versus ~70% for the signature approach. We demonstrate that deep learning enables discovery of previously unknown attacks (including sophisticated multi-vector APTs) by recognizing hidden anomalies, and that ensemble and federated approaches improve detection reliability and speed. **Conclusion.** Integrating AI techniques into security monitoring systems considerably increases the protection efficiency of critical systems by proactively identifying cyberattacks with minimal false alarms. The experimental results confirm the practical applicability of the chosen methods for securing network infrastructure (energy, communications, industrial IoT). However, further work is needed to ensure robustness against adversarial attacks and to uphold AI reliability principles.

Keywords: artificial intelligence; machine learning; deep learning; attack detection; anomalies; critical infrastructure; cybersecurity.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Seliverstov D. E., Rusakov K. D. Application of Artificial Intelligence for Detecting Information-Technical Impacts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 125-139 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-125-139>.

Received 03.09.2025

Accepted 14.10.2025

Published 22.12.2025

Введение

Постоянный рост масштабов цифровизации и усложнение ИТ-инфраструктур приводит к появлению новых угроз информационной безопасности. Деструк-

тивное воздействие на информационные и технические системы понимается как воздействие на информационные ресурсы и технические системы, нарушающее их нормальное функционирование (включая кибератаки, технические сбои,

несанкционированный доступ) [1]. Современные коммуникационные технологии используются злоумышленниками в рамках гибридных атак, способных выводить из строя системы жизнеобеспечения, нарушать работу объектов информационной инфраструктуры и похищать конфиденциальные данные. При этом эргатические системы управления (человеко-машинные комплексы, управляющие процессами в промышленности, транспорте, обороне и др.) особенно уязвимы, поскольку сбой или атаки в таких системах могут иметь катастрофические последствия для государства и общества.

Традиционные средства защиты – от межсетевых экранов до систем обнаружения вторжений (IDS) на основе сигнатур – в последнее время не справляются с динамичным и сложным характером современных атак [2]. Классические IDS/IPS, как правило, централизованы и полагаются на заранее известные шаблоны атак, вследствие чего часто не способны выявлять новые виды атак (например, сложные APT-кампании, инсайдерские угрозы) и генерируют множество ложных срабатываний. Более того, централизованные архитектуры имеют единую точку отказа: компрометация или отказ центрального узла мониторинга выводит из строя всю систему защиты. Это неприемлемо для высоконагруженных систем, где требуется непрерывный мониторинг и реагирование даже в условиях частичных отказов инфраструктуры.

В этой ситуации все большее внимание уделяется использованию методов искусственного интеллекта для усиления средств киберзащиты. Алгоритмы машинного обучения (ML) и глубокого обучения (DL) способны анализировать большие объемы данных о событиях безопасности в режиме реального времени и выявлять скрытые шаблоны, ускользающие от традиционных правил [2]. В отличие от сигнатурных методов, которые опираются на ручное задание признаков угроз, современные методы ML и DL автоматически обучаются на данных и обнаруживают ранее неизвестные атаки по неявным корреляциям признаков. Например, DL-модели способны выявлять сложные многоходовые атаки за счет распознавания малозаметных аномальных характеристик в поведении объектов, чего невозможно добиться ручной экспертизой. Благодаря этому интеграция ИИ позволяет снизить количество ложных тревог и повышает быстродействие обнаружения инцидентов, что особенно важно для ситуационной осведомленности в киберпространстве.

Актуальность исследования. Учитывая рост сложности киберугроз и недостаточность традиционных средств защиты, актуальным является всестороннее изучение и внедрение технологий ИИ для автоматизированного обнаружения деструктивных воздействий на информационные и технические системы. Опыт применения данной технологии свидетельствует о том, что ИИ ста-

новится ключевым элементом современной киберзащиты, позволяя обрабатывать большие данные угроз и реагировать проактивно [3]. В нормативных правовых актах подчеркивается необходимость развития систем противодействия деструктивным воздействиям на информационные и технические системы, включая кибератаки на сложную техническую инфраструктуру¹. Таким образом, обоснование эффективности применения методов искусственного интеллекта (машинного обучения и глубокого обучения) для своевременного обнаружения таких воздействий и их сравнение имеют важное научное и практическое значение для укрепления национальной и информационной безопасности.

Материалы и методы

Исследование базируется на методах системного анализа и экспериментальной проверки. Выполнен обзор современных публикаций по применению ИИ в кибербезопасности. В том числе рассмотрены обобщающие работы по AI-детекции атак, исследования по аномальному обнаружению и анализ стандартов. Учитывались руководящие документы по безопасности промышленных систем и международные стратегии в области ИИ. Это позволило выработать требования к методам обнаруже-

ния атак в сложной технической инфраструктуре (точность, надежность, интерпретируемость результатов, соответствие принципам доверенного ИИ и др.). Кроме того, проведен собственный эксперимент по обнаружению сетевых атак с помощью ML/DL. В качестве данных выбран общедоступный набор UNSW-NB15, имитирующий сетевой трафик с нормальной активностью и несколькими типами атак. Данный датасет содержит около 2,5 млн. сетевых сессий с размеченными атаками 9 различных категорий (DoS, сканирование, эксплойты, бэкдоры, и др.) и нормальный трафик. Для эксперимента использованы: классический алгоритм ML (Random Forest) и модель DL (полносвязная нейронная сеть). Модели обучены классифицировать сетевые сессии по классам (отсутствие либо один из типов атаки). Качество оценивалось на тестовой выборке с помощью метрик точности (accuracy), полноты обнаружения (recall), точности прогноза (precision) и F1-меры. Также рассчитывались показатели для каждого класса атак (категории угроз) и строилась матрица ошибок классификации.

Результаты и их обсуждение

Исторически системы обнаружения вторжений опирались на сигнатурный анализ, при котором известные шаблоны атак сопоставляются с поступающими событиями. Такая схема до сих пор широко распространена в коммерческих IDS/IPS за счет простоты реализации и понятности результатов [4].

¹ Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». Официальное опубликование: Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107030001>.

Однако главный недостаток сигнатурного метода – неспособность выявлять новые, ранее не встречавшиеся виды атак. Злоумышленники скрывают вредоносную функциональность и создают эксплойты на незафиксированные уязвимости, сигнатуры на которые отсутствуют, поэтому сигнатурные IDS пропускают такие атаки. Кроме того, рост количества сигнатур ведет к увеличению числа ложных срабатываний и перегружает аналитиков безопасности.

Для преодоления ограничений сигнатурных IDS был развит подход анализа аномалий, при котором модель нормального поведения системы строится на основе статистики, а отклонения от нормы рассматриваются как потенциальные инциденты. Ранние методы аномального обнаружения использовали статистические модели и пороги, но они не учитывали сложных взаимосвязей признаков и часто страдали от высокого числа ложных тревог. Тем не менее, сам переход от поиска известных шаблонов к поиску любых отклонений заложил основу для применения машинного обучения в обнаружении атак [5].

Применение машинного обучения (ML). С середины 2000-х годов в системах обнаружения вторжений начали использовать методы машинного обучения. Классические алгоритмы ML – такие как Decision Tree (деревья решений), Random Forest, SVM (опорные векторы), Naïve Bayes, k-NN и др. – обучаются классифицировать сетевые сессии или события на основе множе-

ства признаков (особенностей трафика, системных вызовов и пр.). Исследования показывают, что ML-алгоритмы способны достичь высокой точности (>90%) на известных датасетах (например, NSL-KDD) при детектировании известных типов атак. Так, в работе Sowmya & Anita (2023) проведен обзор ряда исследований и сделан вывод, что использование ML повышает точность обнаружения по сравнению с сигнатурным анализом [6, 7]. Однако ML-методы первого поколения имели ограничение: они требовали тщательного ручного конструирования признаков для обучения. Эффективность классификации сильно зависела от качества и полноты выбранных признаков, что затрудняло обнаружение новых атак, не отраженных в признаковых шаблонах. Кроме того, многие ML-модели обучены на несбалансированных данных, вследствие чего им трудно обнаруживать редкие атаки.

Глубокое обучение (DL). Появление глубоких нейронных сетей дало новый импульс развитию IDS. DL-модели (глубокие нейронные сети, рекуррентные сети, автоэнкодеры и др.) автоматически извлекают существенные признаки из сырых данных, устраняя необходимость ручного создания признаков [8]. В кибербезопасности DL находит применение в различных задачах: от обнаружения сетевых атак с помощью рекуррентных нейронных сетей (учитывающих временную динамику трафика) до классификации вредоносных файлов на основе сверточных нейросетей (рас-

познающих паттерны в последовательности байтов). DL продемонстрировал способность выявлять сложные нелинейные зависимости, что особенно эффективно для обнаружения продвинутой угрозы. Например, отмечается успех применения DL для противодействия скрытым АРТ-атакам – нейросети могут распознавать едва заметные последовательности действий атакующего на разных этапах кибер-цепочки [9]. Кроме того, автоэнкодеры применяются для выявления аномалий без меток путем обучения на нормальном поведении: сеть учится восстанавливать «нормальные» данные, и большие ошибки восстановления сигнализируют о нетипичных, возможно, вредоносных образцах. Исследования показывают, что автоэнкодеры успешно обнаруживают атаки на промышленных протоколах, достигая >90% F1-меры в тестовых сценариях [10]. В целом, DL-методы в настоящее время считаются наиболее перспективными для выявления ранее неизвестных атак благодаря их способности обобщать скрытые закономерности. Однако у них есть свои недостатки, например, потребность в больших вычислительных ресурсах и данных для обучения, а также уязвимость к adversarialным атакам (когда злоумышленник целенаправленно искажает входные данные, чтобы обмануть модель). В сложных технических системах системах эти факторы ограничивают внедрение DL: требуется тщательно тестировать модели на устойчивость и интерпретируемость результатов.

Ансамблевые и гибридные методы.

Для повышения надежности часто используют ансамбли алгоритмов и гибридные системы. Ансамблевые классификаторы (например, стекинг или бустинг над разными ML-моделями) позволяют комбинировать сильные стороны отдельных методов и сглаживать их недостатки. Гибридные IDS сочетают в себе одновременно сигнатурные модули для известных атак и аномалические модули на базе ML/DL – тем самым обеспечивая многоуровневую фильтрацию угроз. Например, система сначала отфильтровывает известные атаки сигнатурно, а затем неизвестные отклонения обрабатывает автоэнкодер или кластеризация. Такой подход снижает нагрузку на ML-модель и облегчает интерпретацию. За последние годы отмечается тренд на интеграцию разнородных технологий и переход к многоступенчатым схемам обнаружения [11]. Это особенно актуально в масштабных инфраструктурах, где один подход не обеспечивает полной защиты. Отдельно следует отметить, что повышение надежности интеллектуальных модулей гибридных IDS возможно за счет корректного выбора операций нечеткого вывода и «мягких» арифметических операций, что снижает вычислительные ошибки и стабилизирует принятие решений [12].

Применение ИИ для ситуационной осведомленности. Помимо выявления конкретных атак, ИИ все шире применяется для киберситуационной осведомленности, то есть для формирования це-

лостной картины состояния киберпространства организации в реальном времени. Инструменты на базе ИИ способны агрегировать и анализировать разнородные источники данных: сетевые логи, телеметрию систем, уязвимости, разведданные об угрозах и предоставлять операторам обобщенное представление о текущих инцидентах и рисках. Например, алгоритмы обработки естественного языка (NLP) используются для автоматического анализа текстовых отчетов и новостей о киберугрозах, чтобы выделять релевантную информацию [13]. В итоге, ИИ-инструменты существенно расширяют возможности аналитиков центров мониторинга безопасности: рутинные задачи (поиск индикаторов компрометации, первичная классификация инцидентов) автоматизируются, а персонал может сосредоточиться на принятии решений.

Отечественные разработки. В России активно ведутся исследования по применению ИИ в кибербезопасности. Так, работы под руководством И.В. Котенко посвящены использованию методов ML/DL для защиты IoT и киберфизических систем [14]. В частности, предложены решения по раннему обнаружению кибератак с помощью интеграции статистических методов и фрактального анализа трафика, а также распределенные системы обнаружения атак в промышленном интернете вещей, использующие параллельную обработку данных и обученные модели ML. Разрабатываются многоагентные подходы, где

интеллектуальные агенты на базе методов глубокого обучения обмениваются между собой знаниями об атаках без разглашения исходных данных (федеративный принцип). В работах Тушкановой и авторов исследованы подходы обнаружения кибератак и аномалий в киберфизических системах с различными источниками данных, приведена сравнительная оценка методов и показано, что сочетание символьных и нейросетевых методов улучшает выявление инцидентов на промышленных установках [15].

В особое направление следует выделить применение федеративного обучения для задач безопасности. Федеративное обучение позволяет нескольким организациям или узлам обучать общую модель обнаружения атак, не передавая друг другу сырые данные (важно для сохранения конфиденциальности). В работах авторов предложена архитектура системы обнаружения вторжений на основе федеративного ML и проведены эксперименты, подтвердившие эффективность такого подхода [16]. Архитектура включает специальные компоненты для выборки локальных данных, обучения локальных моделей, оценивания рисков утечки информации и выявления атак на сам процесс федеративного обучения. Результаты показывают, что модели IDS, обученные федеративно на распределенных данных разных организаций, обнаруживают атаки с точностью порядка 90–92%, что срав-

нимо с централизованным обучением, при существенном сокращении объема передаваемой информации. Однако в таком подходе присутствует ряд недостатков, таких как: отсутствуют единые методические рекомендации по построению и оценке таких систем; требуются механизмы противодействия возможным атакам на сами федеративные схемы (например, отравление данных участниками). Тем не менее, федеративный подход рассматривается как перспективный для сложных технических систем, где обмен сырыми данными между сегментами нежелателен, а совместная защита необходима.

Экспериментальное сравнение методов. Для сравнения рассмотренных методов проведен эксперимент с применением ML/DL к сетевому датасету UNSW-NB15. Выбранный набор данных содержит сбалансированную выборку нормального трафика и различных атак, что позволяет оценить эффективность алгоритмов на многоклассовой задаче. Обучение моделей Random Forest (RF) и глубокой нейронной сети проводилось на тренировочной выборке; затем производилась классификация тестовых данных. В качестве базовой линии для сравнения условно рассматривался сигнатурный метод, способный обнаруживать только атаки известного типа. На рис. 1 приведено сравнение интегральной точности обнаружения для традиционного сигнатурного подхода, алгоритма ML (Random Forest), модели DL (ней-

росеть) и их гибридного сочетания. Очевидно, что ML и DL существенно превосходят сигнатурную систему по точности (более 90% против ~70%). Модель глубокого обучения достигает около 96% точности, а гибридная многоуровневая система (комбинирующая сигнатурный и ML-анализ) – до ~98%, показывая, что сочетание разных методов позволяет повысить качество обнаружения.

Для глубокого нейросетевого классификатора рассчитаны показатели обнаружения по каждому классу атак. Рис. 2 иллюстрирует полноту обнаружения (recall) для 10 категорий трафика UNSW-NB15. Чаще встречающиеся типы атак, такие как Generic (массовые сетевые атаки), DoS и Reconnaissance (разведка) распознаются моделью практически полностью (recall ~95–99%). Для редких классов (Shellcode, Worms), на которые приходится мало обучающих примеров, полнота ниже (70–75%). Такие результаты отражают проблему несбалансированных данных: модель хуже выявляет малочисленные атаки [17]. В практических системах этот эффект смягчается методами балансировки, что частично учтено при тренировке нейросети. Тем не менее, даже редкие атаки («shellcode», «черви») обнаруживаются с приемлемым качеством (~70% обнаружения), тогда как без использования DL они зачастую остаются незамеченными.

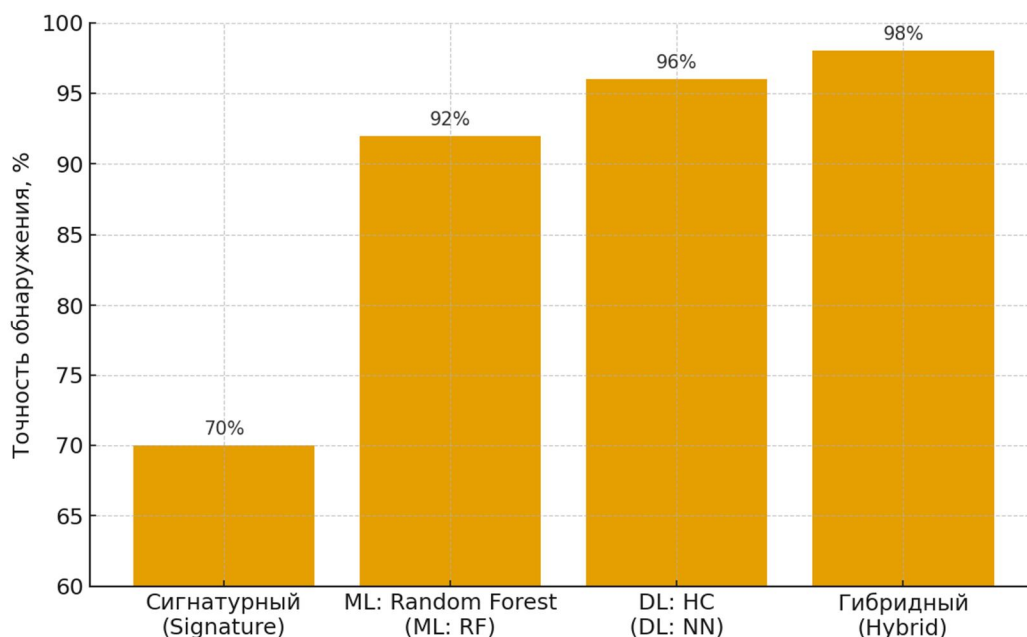


Рис. 1. Сравнение точности обнаружения атак различными подходами (сигнатурный метод, алгоритм ML, модель DL и гибридный ансамбль)

Fig. 1. Comparison of attack detection accuracy by different approaches (signature-based method, ML algorithm, DL model, and hybrid ensemble)

Кроме того, проанализирована производительность централизованного и федеративного подходов к обнаружению атак [18, 19]. В централизованной IDS все данные собираются и обраба-

тываются в одном узле (например, в дата-центре), тогда как при федеративном обучении модели обновляются на местах и обмениваются только обобщёнными параметрами.

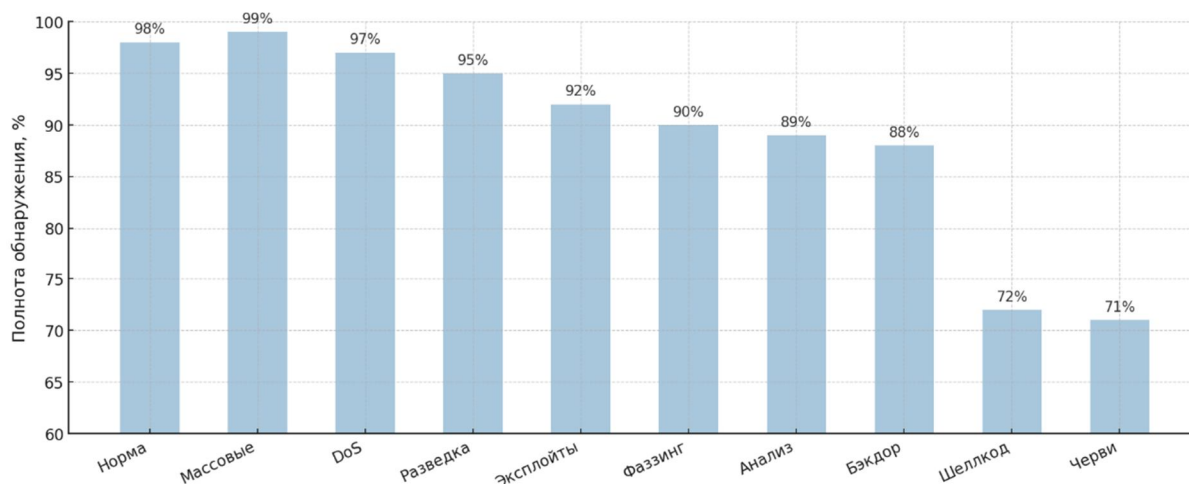


Рис. 2. Полнота обнаружения (Recall) по классам атак для модели глубокого обучения на датасете UNSW-NB15

Fig. 2. Per-class detection recall for the deep learning model on the UNSW-NB15 dataset

На рис. 3 приведено сравнительное диаграммное отображение точности обнаружения и средней задержки обработки событий для централизованной и федеративной IDS (по данным экспериментов из работы).

Из рис. 3 видно, что федеративная модель обеспечивает практически ту же точность обнаружения (~92%) что и централизованная (~95%), при этом средняя задержка обработки инцидентов сокра-

щается примерно на 70% за счёт локальной обработки данных. Такой подход повышает оперативность реагирования и снимает нагрузку с центрального узла. Он особенно актуален для распределенных объектов (энергосети, сети связи, промышленные предприятия с филиалами), где объединение данных затруднено или нежелательно из-за требований безопасности.

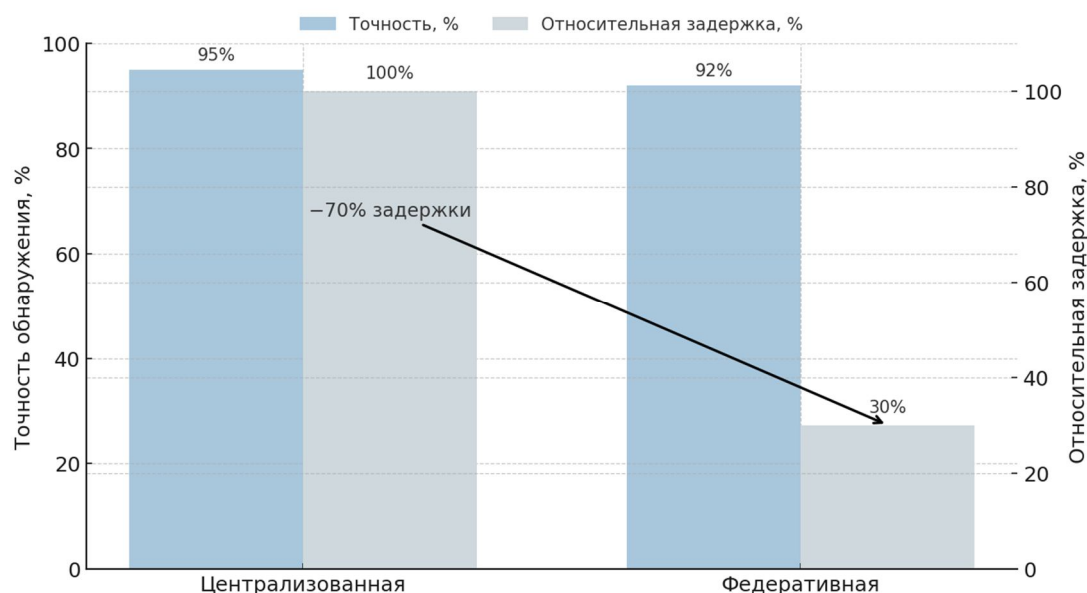


Рис. 3. Сравнение централизованной и федеративной модели IDS: точность обнаружения атак и относительная задержка обработки событий

Fig. 3. Comparison of centralized vs. federated IDS models: attack detection accuracy and relative event processing delay

Выводы

Искусственный интеллект является одним из наиболее перспективных направлений развития средств обнаружения и предотвращения деструктивных воздействий на информационные и технические системы. Проведенный анализ и эксперимент подтверждают, что интегра-

ция алгоритмов ML/DL в системы кибербезопасности позволяет выявлять атаки с большей точностью и на более ранних этапах, чем традиционные сигнатурные методы. Особенно важно, что ИИ-средства способны распознавать новые и сложные угрозы, ранее ускользавшие от контроля, тем самым повышая ситуаци-

онную осведомленность операторов и сокращая «слепые зоны» в защите.

Полученные результаты подтверждают, что применение методов ИИ существенно повышает эффективность обнаружения атак по сравнению с традиционными средствами. Алгоритмы ML и DL способны обнаруживать известные и новые атаки с высокой точностью, сокращая долю пропущенных инцидентов. Глубокое обучение особенно эффективно для сложных сценариев атак за счет автоматического выявления скрытых аномалий. Однако без специальных мер DL-модели могут хуже детектировать редкие виды атак. Данная проблема требует внимания при развертывании систем (например, использование методов балансировки данных, генерации синтетических примеров атак и т.п.). Кроме того, следует учитывать вычислительные затраты: нейросетевые модели требуют более мощного аппаратного обеспечения и оптимизации, особенно для работы в реальном времени. В проведенном эксперименте подтвердилась перспектива применения ансамблей и гибридных систем: сочетание правил и обучаемых моделей дает более высокие показатели, объединяя достоинства детерминированных и вероятностных подходов.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что разработанные подходы и рекомендации могут быть применены при создании новых и модернизации существующих систем ки-

бербезопасности на сложных технических объектах различной инфраструктуры (энергетика, телекоммуникации, промышленный IoT и др.). Внедрение интеллектуальных агентов обнаружения на разных уровнях управления повысит способность инфраструктуры противостоять современным атакам. Важно отметить, что дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение устойчивости ИИ-моделей. Требуется проведение более широких испытаний методов ML/DL в натурных условиях (на полигонах с имитацией работы реальной инфраструктуры) для оценки масштабируемости и надежности решений. Кроме того, необходимо развивать стандартизацию применения ИИ в кибербезопасности: отраслевые руководства и стандарты (в перспективе – ГОСТ) по использованию ML/DL для обнаружения атак существенно облегчат практическое внедрение. Перспективным направлением является внедрение концепции цифрового двойника безопасности, то есть создание модели защищаемой системы, на которой можно прорабатывать сценарии атак и упреждающе настраивать механизмы защиты. Решение обозначенных задач будет способствовать созданию проактивных, адаптивных и живучих киберсистем, способных противостоять самым современным и сложным атакам. Это является залогом безопасности как отдельных организаций, так и государства в целом в условиях цифровой эпохи.

Список литературы

1. Подсистема предупреждения компьютерных атак на объекты критической информационной инфраструктуры Российской Федерации / И.В. Котенко, А.И. Колесников, И.Б. Саенко, Р.И. Захарченко, Д.В. Величко // Вопросы кибербезопасности. 2023. № 1(53). С. 13–27. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2023-1-13-27>.
2. Advancing cybersecurity: a comprehensive review of AI-driven detection techniques / A.H. Salem, S.M. Azzam, O.E. Emam, A.A. Abohany // Journal of Big Data. 2024. Vol. 11, no. 1. P. 1–38. <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00957-y>.
3. Jensen B., Atalan Y., Macias J.M. Algorithmic Stability: How AI Could Shape the Future of Deterrence // Center for Strategic and International Studies (CSIS). 2024. URL: <https://www.csis.org/analysis/algorithmic-stability-how-ai-could-shape-future-deterrence>.
4. Deep learning for intrusion detection in emerging technologies: a comprehensive survey and new perspectives / E.C. Pinto Neto, S. Iqbal, S. Buffett, M. Sultana, A. Taylor // Artificial Intelligence Review. 2025. Vol. 58. Art. 340. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11346-z>.
5. Pang G., Shen C., Cao L., van den Hengel A. Deep learning for anomaly detection: challenges, methods and opportunities. Preprint: arXiv:2007.02500, 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2007.02500>.
6. Sowmya T., Mary Anita E.A. A comprehensive review of AI-based intrusion detection system // Measurement: Sensors. 2023. Vol. 28. Article 100827. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100827>.
7. Issa M.M., Aljanabi M., Muhialdeen H.M. Systematic literature review on intrusion detection systems: research trends and future directions (2018–2023) // Journal of Intelligent Systems. 2024. (Early access). <https://doi.org/10.1515/jisys-2023-0248>.
8. Zhang Y., Muniyandi R.C., Qamar F. A Review of Deep Learning Applications in Intrusion Detection Systems: Overcoming Challenges in Spatiotemporal Feature Extraction and Data Imbalance // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, no. 3. Art. 1552. <https://doi.org/10.3390/app15031552>.
9. APT Attack Detection Based on Graph Convolutional Neural Networks / W. Ren, X. Song, Y. Hong, Y. Lei, J. Yao, Y. Du, W. Li // International Journal of Computational Intelligence Systems. 2023. Vol. 16. Art. 184. <https://doi.org/10.1007/s44196-023-00369-5>.
10. Костогрызов А.И. Прогнозирование рисков по данным мониторинга для систем искусственного интеллекта // БИТ. Сборник трудов Десятой международной научно-технической конференции. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. С. 220 – 229.
11. Kumar G., Thakur K., Ayyagari M.R. MLEsIDSs: machine learning-based ensembles for intrusion detection systems – a review // Journal of Supercomputing. 2020. Vol. 76, no. 12. P. 8938–8971. <https://doi.org/10.1007/s11227-020-03196-z>.

12. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Bulatnikov V.A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // *Applied Soft Computing*. 2022. Vol. 117. Art. 108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>.
13. The Current Research Status of AI-Based Network Security Situational Awareness / M. Wang, G. Song, Y. Yu, B. Zhang // *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 10. Art. 2309. <https://doi.org/10.3390/electronics12102309>.
14. Котенко И.В., Израилов К.Е., Буйневич М.В. Метод обнаружения атак различного генеза на сложные объекты на основе информации состояния. Ч. 1 // *Вопросы кибербезопасности*. 2023. № 3(55). С. 90–100. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2023-3-90-100>.
15. Detection of Cyberattacks and Anomalies in Cyber-Physical Systems: Approaches, Data Sources, Evaluation / O. Tushkanova, D. Levshun, A. Branitskiy, E. Fedorchenko, E. Novikova, I. Kotenko // *Algorithms*. 2023. 16(2). P. 85. <https://doi.org/10.3390/a16020085>.
16. Обнаружение вторжений на основе федеративного обучения: архитектура системы и эксперименты / Е.С. Новикова, И.В. Котенко, А.В. Мелешко, К.Е. Израилов // *Вопросы кибербезопасности*. 2023. № 6(58). С. 50–66. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2023-6-50-66>.
17. Shanmugam V., Razavi-Far R., Hallaji E. Addressing Class Imbalance in Intrusion Detection: A Comprehensive Evaluation of Machine Learning Approaches // *Electronics*. 2025. 14(1): 69. <https://doi.org/10.3390/electronics14010069>.
18. Survey of federated learning in intrusion detection / H. Zhang, J. Ye, W. Huang, X. Liu, J. Gu // *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2024. Vol. 195: 104976. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104976>.
19. Израилов К.Е., Буйневич М.В. Метод обнаружения атак различного генеза на сложные объекты на основе информации состояния. Ч. 2. Алгоритм, модель и эксперимент // *Вопросы кибербезопасности*. 2023. № 4(56). С. 80–93. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2023-4-80-93>.

References

1. Kotenko I.V., Kolesnikov A.I., Saenko I.B., Zakharchenko R.I., Velichko D.V. Subsystem of prevention of computer attacks on objects of critical information infrastructure of the Russian Federation. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues*. 2023;(1):13–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2023-1-13-27>
2. Salem A.H., Azzam S.M., Emam O.E., Abohany A.A. Advancing cybersecurity: a comprehensive review of AI-driven detection techniques. *Journal of Big Data*. 2024;11(1):1–38. <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00957-y>
3. Jensen B., Atalan Y., Macias J.M. Algorithmic Stability: How AI Could Shape the Future of Deterrence. *Center for Strategic and International Studies (CSIS)*. 2024 Jun 10.

Available from: <https://www.csis.org/analysis/algorithmic-stability-how-ai-could-shape-future-deterrence>

4. Pinto Neto E.C., Iqbal S., Buffett S., Sultana M., Taylor A. Deep learning for intrusion detection in emerging technologies: a comprehensive survey and new perspectives. *Artificial Intelligence Review*. 2025;58:340. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11346-z>
5. Pang G., Shen C., Cao L., van den Hengel A. Deep learning for anomaly detection: challenges, methods and opportunities. Preprint: arXiv:2007.02500; 2020. Available from: <https://arxiv.org/abs/2007.02500>
6. Sowmya T., Mary Anita E.A. A comprehensive review of AI-based intrusion detection system. *Measurement: Sensors*. 2023;28:100827. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100827>
7. Issa M.M., Aljanabi M., Muhialdeen H.M. Systematic literature review on intrusion detection systems: research trends and future directions (2018–2023). *Journal of Intelligent Systems*. 2024;(early access). <https://doi.org/10.1515/jisys-2023-0248>
8. Zhang Y., Muniyandi R.C., Qamar F. A review of deep learning applications in intrusion detection systems: overcoming challenges in spatiotemporal feature extraction and data imbalance. *Applied Sciences*. 2025;15(3):1552. <https://doi.org/10.3390/app15031552>
9. Ren W., Song X., Hong Y., Lei Y., Yao J., Du Y., Li W. APT attack detection based on graph convolutional neural networks. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2023;16:184. <https://doi.org/10.1007/s44196-023-00369-5>
10. Kostogryzov A.I. Forecasting risks based on monitoring data for artificial intelligence systems. In: *BIT. Sbornik trudov Desyatoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = BIT. Proceedings of the Tenth International Scientific and Technical Conference*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2019. P. 220–229. (In Russ.)
11. Kumar G., Thakur K., Ayyagari M.R. MLEsIDSs: machine learning-based ensembles for intrusion detection systems – a review. *The Journal of Supercomputing*. 2020;76(12):8938–8971. <https://doi.org/10.1007/s11227-020-03196-z>
12. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Bulatnikov V.A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio. *Applied Soft Computing*. 2022;117:108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>
13. Wang M., Song G., Yu Y., Zhang B. The current research status of AI-based network security situational awareness. *Electronics*. 2023;12(10):2309. <https://doi.org/10.3390/electronics12102309>
14. Kotenko I.V., Izrailov K.E., Buinevich M.V. A method for detecting attacks of various origins on complex objects based on state information. Part 1. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues*. 2023;3(55):90–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2023-3-90-100>
15. Tushkanova O., Levshun D., Branitskiy A., Fedorchenko E., Novikova E., Kotenko I. Detection of cyberattacks and anomalies in cyber-physical systems: approaches, data sources, evaluation. *Algorithms*. 2023;16(2):85. <https://doi.org/10.3390/a16020085>

16. Novikova E.S., Kotenko I.V., Meleshko A.V., Izrailov K.E. Intrusion detection based on federated learning: system architecture and experiments. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues*. 2023;(6):50–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2023-6-50-66>
17. Shanmugam V., Razavi-Far R., Hallaji E. Addressing class imbalance in intrusion detection: a comprehensive evaluation of machine learning approaches. *Electronics*. 2025;14(1):69. <https://doi.org/10.3390/electronics14010069>
18. Zhang H., Ye J., Huang W., Liu X., Gu J. Survey of federated learning in intrusion detection. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2024;195:104976. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104976>
19. Izrailov K.E., Buinevich M.V. A method for detecting attacks of various origins on complex objects based on state information. Part 2. Algorithm, model and experiment. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues*. 2023;(4):80–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2023-4-80-93>

Информация об авторах / Information about the Authors

Селиверстов Дмитрий Евгеньевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: Seliverstov_dmitriyy@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8412-7873>

Dmitry E. Seliverstov, Cand. of Sci. (Engineering), Junior Researcher, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: Seliverstov_dmitriyy@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8412-7873>

Русаков Константин Дмитриевич, научный сотрудник, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: rusakov@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8412-7873>

Konstantin D. Rusakov, Researcher, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: rusakov@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8412-7873>

УДК 617.57

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-140-156>

Моделирование движения запястья при скандинавской ходьбе

С.Ф. Яцун¹ ✉, В.А. Поляков¹, Я.А. Гридасов¹, И.В. Жабин¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Целью исследования является разработка метода получения обобщенной траектории движения запястья при скандинавской ходьбе для интеграции в систему автоматического управления реабилитационного стенда верхних конечностей.

Методы. В статье рассматривается и детально анализируется метод получения, последующей обработки и математического моделирования обобщенной траектории движения запястья во время цикла шага при скандинавской ходьбе. Для этого, исходя из экспериментальных данных, полученных от испытуемых с различными антропометрическими данными на основе полуавтоматического видеоанализа и последующей аппроксимации полученных траекторий, для последующей интеграции в систему автоматического управления реабилитационного стенда верхних конечностей, основанного на принципе непрерывного пассивного движения (НПД) с целью мобилизации суставов по траекториям естественного движения. Для оцифровки законов движения аналитического описания обобщенной траектории движения запястья была применена аппроксимация полиномами 5-го порядка.

Результаты. В работе были получены и визуализированы индивидуальные траектории движения запястья групп испытуемых с различными антропометрическими параметрами. На их основе была построена обобщенная траектория движения запястья в процессе скандинавской ходьбы, что стало возможным благодаря использованию методики полуавтоматического видеоанализа. Путем проведения тщательного статистического анализа собранных данных были выявлены и количественно оценены существенные биомеханические отклонения, возникающие при неправильном и нерациональном подборе длины палок для скандинавской ходьбы. В ходе процесса математического моделирования были рассчитаны и получены конкретные числовые коэффициенты для полиномов пятого порядка, которые были использованы при аппроксимации для описания обобщенной траектории движения.

Заключение. Полученные результаты подтверждают эффективность метода полуавтоматического видеоанализа для моделирования траектории движения запястья и позволяют оптимизировать параметры реабилитационных стендов, обеспечивая естественную биомеханику движений. Подтверждается важность корректного подбора длины палок для скандинавской ходьбы.

Ключевые слова: моделирование; траектория запястья; скандинавская ходьба; реабилитационный стенд.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Госзадания Минобрнауки России по теме «Разработка методов синтеза адаптивных и интеллектуальных робототехнических устройств и комплексов в целях расширения функциональных технологических и производственных возможностей человека» (соглашение № 075-03-2025-526).

Для цитирования: Моделирование движения запястья при скандинавской ходьбе / С.Ф. Яцун, В.А. Поляков, Я.А. Гридасов, И.В. Жабин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 140-156. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-140-156>.

Поступила в редакцию 04.08.2025

Подписана в печать 15.09.2025

Опубликована 22.12.2025

Simulation of wrist movement during Nordic walking

Sergey F. Jatsun ¹ ✉, Vladislav A. Polyakov ¹, Yakov A. Gridasov ¹, Ivan V. Zhabin ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a method for obtaining a generalized wrist movement trajectory in Nordic walking for integration into the automatic control system of the upper limb rehabilitation stand.

Methods. The article discusses and analyzes in detail the method of obtaining, subsequent processing and mathematical modeling of the generalized trajectory of wrist movement during the step cycle in Nordic walking. To do this, based on experimental data obtained from subjects with various anthropometric data based on semi-automatic video analysis and subsequent approximation of the obtained trajectories, for subsequent integration into the automatic control system of the upper limb rehabilitation stand based on the principle of continuous passive movement (CPM) in order to mobilize joints along the trajectories of natural movement. To digitize the laws of motion of the analytical description of the generalized trajectory of wrist movement, approximation by polynomials of the 5th order was applied.

Results. In the article, individual wrist movement trajectories of groups of subjects with different anthropometric parameters were obtained and visualized. Based on them, a generalized trajectory of wrist movement in the process of Nordic walking was constructed, which became possible thanks to the use of semi-automatic video analysis techniques. By conducting a thorough statistical analysis of the collected data, significant biomechanical deviations that occur with incorrect and irrational stick length selection for Nordic walking were identified and quantified. During the mathematical modeling process, specific numerical coefficients for fifth-order polynomials were calculated and obtained, which were used in the approximation to describe the generalized trajectory of motion.

Conclusion. The results obtained confirm the effectiveness of the semi-automatic video analysis method for modeling the trajectory of wrist movement and allow optimizing the parameters of rehabilitation stands, providing natural biomechanics of movements. The importance of correct stick length selection for Nordic walking is confirmed.

Keywords: modeling; wrist trajectory; Nordic walking; rehabilitation stand.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was supported by the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the topic "Development of methods for the synthesis of adaptive and intelligent robotic devices and complexes in order to expand the functional technological and production capabilities of humans" (agreement No. 075-03-2025-526).

For citation: Jatsun S. F., Polyakov V. A., Gridasov Y. A., Zhabin I. V. Simulation of wrist movement during Nordic walking. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 140-156 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-140-156>.

Received 04.08.2025

Accepted 15.09.2025

Published 22.12.2025

Введение

В современной медицине и инженерии реабилитации активно исследуются методы и технологии, способные эффективно помочь пациентам в восстановлении функций опорно-двигательного аппарата. Одним из перспективных направлений является внедрение реабилитационных стендов верхних конечностей, которые основаны на принципах НПД. Такие стенды представляют собой инновационные устройства, способные эффективно воздействовать на мышечную и суставную активность, что способствует улучшению моторных навыков и функциональной мобильности пациентов.

Эксплуатация реабилитационных стендов способствует предотвращению осложнений, связанных с длительной иммобилизацией пациента, таких как снижение плотности костей, развитие суставной контрактуры и др. Помимо этого, благодаря индивидуальной настройке параметров движения, стенды позволяют адаптировать реабилитационную программу под особенности строения и потребности каждого пациента, что делает процесс восстановления более персонализированным и эффективным. Таким образом, интеграция реабилитационных стендов для верхних конечностей в практику медицинской реабилитации может значительно улучшить ре-

зультаты лечения и качество жизни пациентов после травм и операций [1-4].

Одним из упражнений для глубокого восстановления пациента с нарушением опорно-двигательного аппарата является скандинавская ходьба, которая способствует восстановлению равновесия и координации движений, а также задействует до 90% мышц человека. По различным оценкам специалистов, скандинавская ходьба приводит к увеличению потребления энергии на 46% и улучшает сердечно-сосудистую систему, что важно для общего здоровья пациента. Безусловно одним из наиболее сложных аспектов описания движений верхних конечностей во время скандинавской ходьбы – это движение запястья [5-8].

Целью данной работы является разработка метода получения обобщенной траектории движения запястья при скандинавской ходьбе и моделирование движения для дальнейшей интеграции в систему автоматического управления реабилитационного стенда верхних конечностей для повышения эффективности реабилитации.

Материалы и методы

Для получения траекторий движения объекта существуют различные методы, такие как:

1. Инерциальный метод.

Данный метод основан на использовании IMU сенсоров, таких как акселерометр и гироскоп для точного трекинга в реальном времени. Плюсами данного метода являются высокая точность и возможность записи длительных сеансов. Минусом является наличие дрейфа сенсоров [9].

2. Метод оптического трекинга.

Данный метод основан на отслеживании положения и ориентации объекта в реальном пространстве при помощи оптических датчиков. Метод также отличается высокой точностью, но для его реализации необходимо наличие дорогостоящего оборудования [10].

3. Метод видеоанализа при помощи компьютерного зрения.

Данный метод основан на обработке видеозаписи при помощи современных алгоритмов компьютерного зрения и глубокого обучения, которые автоматически выделяют и отслеживают ключевые точки тела человека. Метод не требует датчиков, точность зависит от ракурса, освещения, качества видео и количества кадров. Также необходимы большие вычислительные мощности для получения данных и навыки программирования [11].

4. Метод ручного/полуавтоматического видеоанализа.

Данный метод основан на ручном или полуавтоматическом трекинге на основе видеозаписи при помощи программного обеспечения Tracker, которое предназначено для анализа видеоизображений путем отслеживания объ-

ектов на видео. Метод отличается высокой точностью благодаря ручной корректировке, нет необходимости в использовании сенсоров и дорогостоящего оборудования, а также высокого качества изображения [12].

Исходя из плюсов и минусов различных методов получения траектории движения, в данной статье используется метод ручного/полуавтоматического видеоанализа.

Результаты и их обсуждение

Получение экспериментальных данных

Во время исследования законов изменения координат запястья для получения траектории движения, которая в последующем будет формировать задающее воздействие системы автоматического управления реабилитационного стенда верхних конечностей, был проведен ряд экспериментов с видеофиксацией, в ходе которых были зафиксированы положения запястья, после чего производилась обработка полученных данных для уменьшения погрешностей, связанных с оборудованием и методом их получения.

Для увеличения точности полученных данных, на запястье каждого испытуемого был установлен маркер (рис.1).

Экспериментальная часть исследования была организована следующим образом: участники были распределены на четыре группы в соответствии с их антропометрическими характеристиками, где ключевым критерием классификации выступал показатель роста (табл. 1).



Рис. 1. Расположение маркера

Fig. 1. Marker location

Испытуемые выполняли тестовое задание, которое заключалось в передвижении вдоль размеченной на горизонтальной поверхности линии длиной 5 метров с использованием палок для скандинавской ходьбы. Для минимизации влияния внешних факторов на двигательную активность и исключение искусственности условий, были соблюдены следующие условия: длина шага для каждой группы испытуемых и скорость передвижения были не фиксированы, а произвольны для каждого испытуемого. Перед началом видеофиксации эксперимента, каждый испытуемый выполнил тестовое задание от 5 до 7 раз (рис. 2) [13].

Все участники эксперимента использовали идентичные палки для скандинавской ходьбы, длина которых составляла 1.2 метра, что исключило влияние вариативности снаряжения на двигательные паттерны. Такой подход позволил исследовать естественные адаптивные стратегии ходьбы в зависимости от антропометрических особенностей испытуемых.

Для идентификации каждой группы, был введен коэффициент k , который показывает отношение длины палок для скандинавской ходьбы к среднему росту испытуемых каждой группы. Антропометрические параметры представлены в табл. 1.



Рис. 2. Проведение эксперимента

Fig. 2. Conducting an experiment

Необходимо отметить, что по рекомендациям специалистов при выборе палок для скандинавской ходьбы коэффициент k должен быть приближенно равен ≈ 0.68 [14].

После завершения экспериментальной части с видеофиксацией, полученные видеофрагменты были обработаны с использованием специального программного обеспечения Tracker. Наличие контрастного маркера позволило провести полуавтоматический трекинг положения запястья.

Таблица 1. Антропометрические данные испытуемых

Table 1. Anthropometric data of the subjects

№	Рост, м/ Height, m	Длина шага, м / Step length, m	k
1	1.70	0.7	0.71
2	1.75	0.8	0.69
3	1.82	0.95	0.66
4	1.90	1.15	0.63

По результатам трекинга были получены исходные данные координат перемещения запястья в сагиттальной плоскости в течение одного полного цикла скандинавской ходьбы всех групп испы-

туемых. На рис. 3 представлен внешний вид интерфейса программы Tracker во время обработки видеотрекков, полученных в ходе поставленных экспериментов.

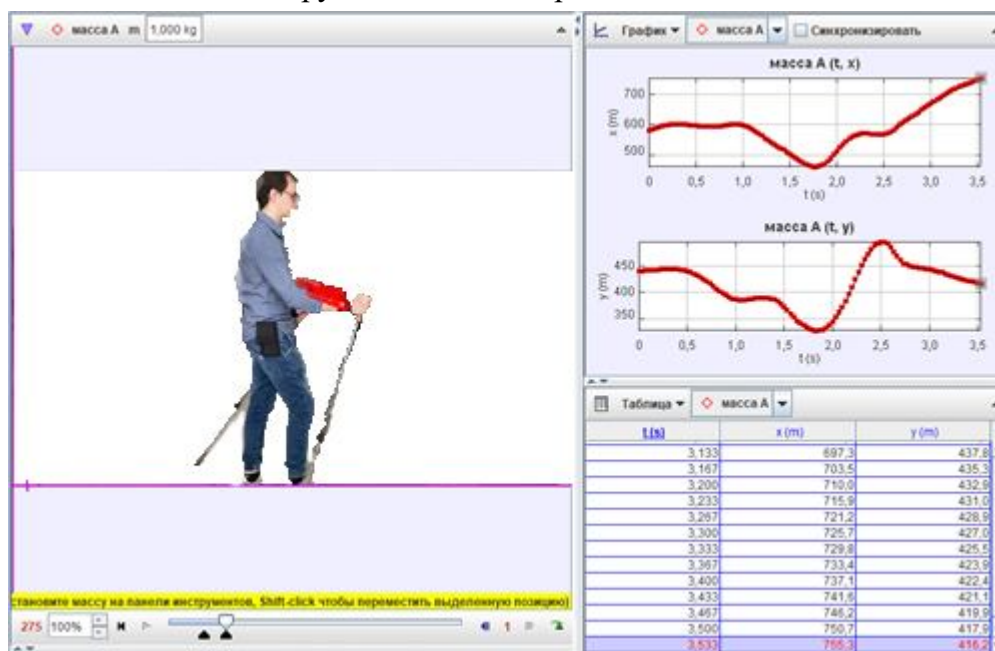

Рис. 3. Процесс получения траектории движения запястья

Fig. 3. The process of obtaining the trajectory of the wrist movement

Полученные в программе Tracker траектории движения маркера, закрепленного на запястье испытуемого, подверглись дополнительной обработке в среде математического моделирования MATLAB с целью устранения шумов, нормализации данных и подготовки к дальнейшему анализу. Алгоритм обра-

ботки каждой траектории выглядел следующим образом:

1. Формирование замкнутой траектории. Так как исходные данные представляли собой дискретные координаты маркера (x, y), записанные в течение одного полного цикла скандинавской ходьбы. Для обеспечения цикличности и уст-

ранения разрывов траектории начальная точка добавлялась в конец массива данных, формируя замкнутый контур.

2. Линейная интерполяция для увеличения разрешения траектории. С целью сглаживания и уменьшения влияния дискретности исходных данных применялась линейная интерполяция. Для двух известных точек (x_{i-1}, y_{i-1}) и (x_i, y_i) значение y в точке x (где $x_{i-1} \leq x \leq x_i$) вычисляется по формуле

$$\frac{y - y_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}.$$

Таким образом, временная шкала исходных данных ($t = 1:N$, где N – количество точек) преобразовывалась в новую равномерную сетку с увеличенным количеством узлов ($N = 1000$). Данная интерполяция была реализована через встроенную функцию `interp1()` в среде математического моделирования MATLAB с параметром 'linear' и использовалась для вычисления новых значений координат на равномерно распределенных временных метках [15].

3. Нормализация координат. Для устранения влияния абсолютных значений координат и приведения данных к единому масштабу выполнялось масштабирование с использованием функции `rescale()`. Исходные данные по осям X и Y преобразовывались в относительные значения.

Данный подход обеспечил независимость результатов от конкретного раз-

решения видео и положения маркера в кадре, что критично для сравнительного анализа между испытуемыми.

После обработки каждой траектории были получены среднеквадратичные значения координат траектории каждой группы испытуемых.

Итоговыми результатами обработки являются гладкие, нормализованные траектории движения запястья, пригодные для последующего анализа (рис. 4).

Также были получены зависимости траекторий по осям X и Y от времени (рис. 5).

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что у группы испытуемых с самым высоким ростом ($k = 0,63$), наблюдается уменьшение амплитуды движения рук из-за недостаточной длины палок испытуемые вынуждены сгибать руки в локтях слабее, что ограничивает естественную биомеханику ходьбы. Снижение эффективности отталкивания, так как короткие палки не позволяют полностью использовать силу инерции, что может уменьшать энергозатраты верхней части тела. В то же время в группе испытуемых с самым высоким коэффициентом ($k = 0.71$) наблюдается избыточная амплитуда движения рук. Из-за чрезмерной длины палок испытуемые вынуждены делать более широкие взмахи, что нарушает плавность ходьбы и увеличивает нагрузку на суставы, снижая контроль над движением.

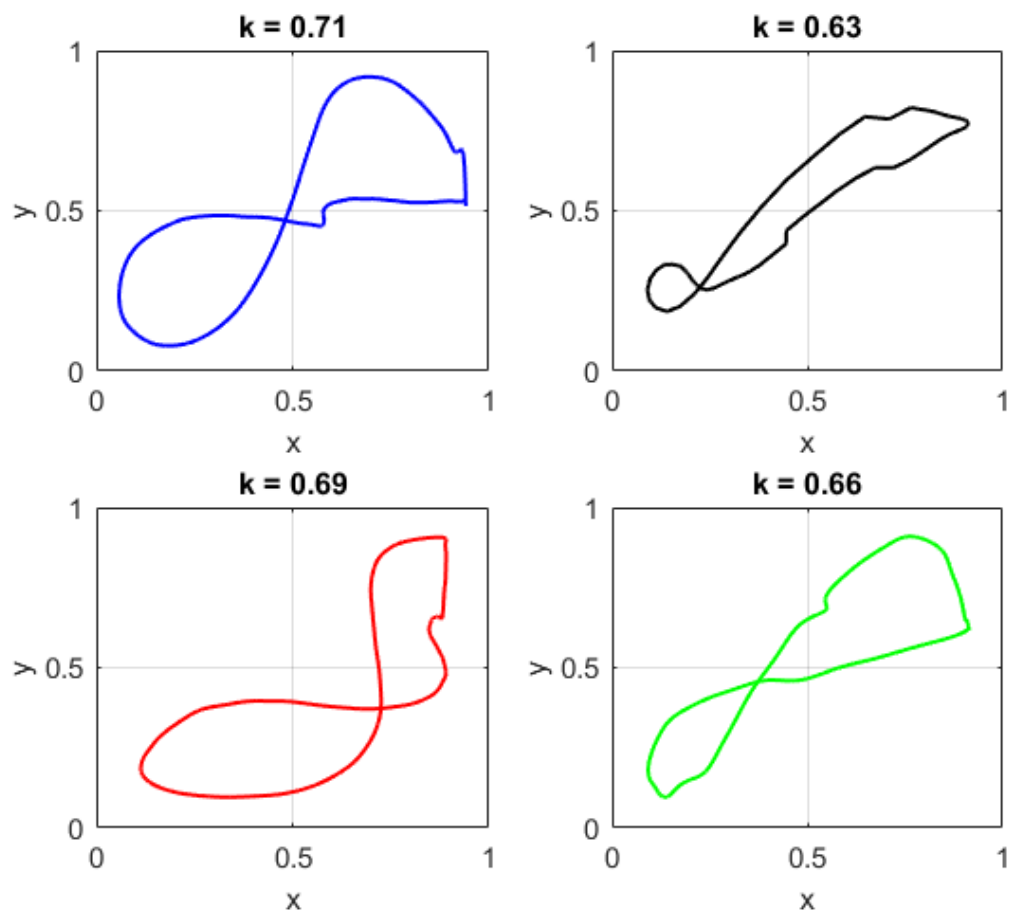


Рис. 4. Полученные траектории движения запястья

Fig. 4. Obtained wrist movement trajectories

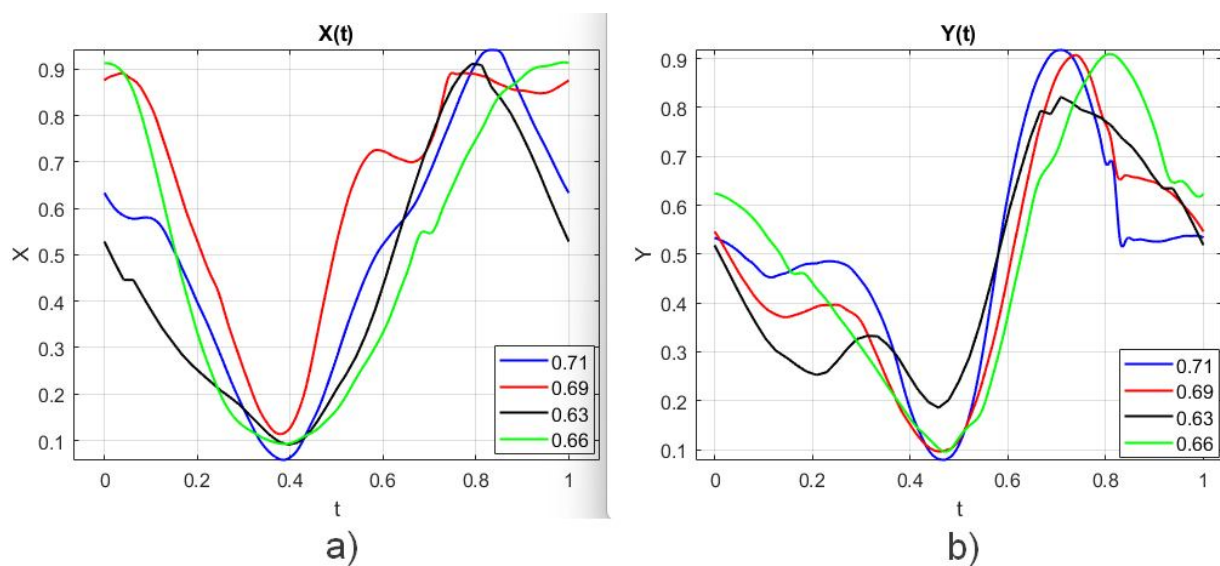


Рис. 5. График зависимости $X(t)$ (a) и $Y(t)$ (b)

Fig. 5. Graph of the dependence of $X(t)$ (a) and $Y(t)$ (b)

Проанализировав полученные результаты групп, у которых коэффициент k приближен к значению 0.68, можно сделать вывод, что траектории схожи между собой, в то время как другие траектории выделяются. Полученные результаты показывают, что при неправильном подборе длины палок для скандинавской ходьбы, у человека появляются отклонения в биомеханике скандинавской ходьбы, которые связаны с неудобством при эксплуатации [16].

Помимо экспериментальных данных, таким же методом полуавтоматического

видеоанализа была получена траектория движения запястья при скандинавской ходьбе из анимации, созданной для научной статьи [17], в которой изучалась кинематика движения человека во время скандинавской ходьбы. В результате исследований техник скандинавской ходьбы была продемонстрирована анимация эталонной походки, которая задействует большее количество групп мышц. Коэффициент k был равен 0.68.

Полученные результаты представлены на рис. 6.

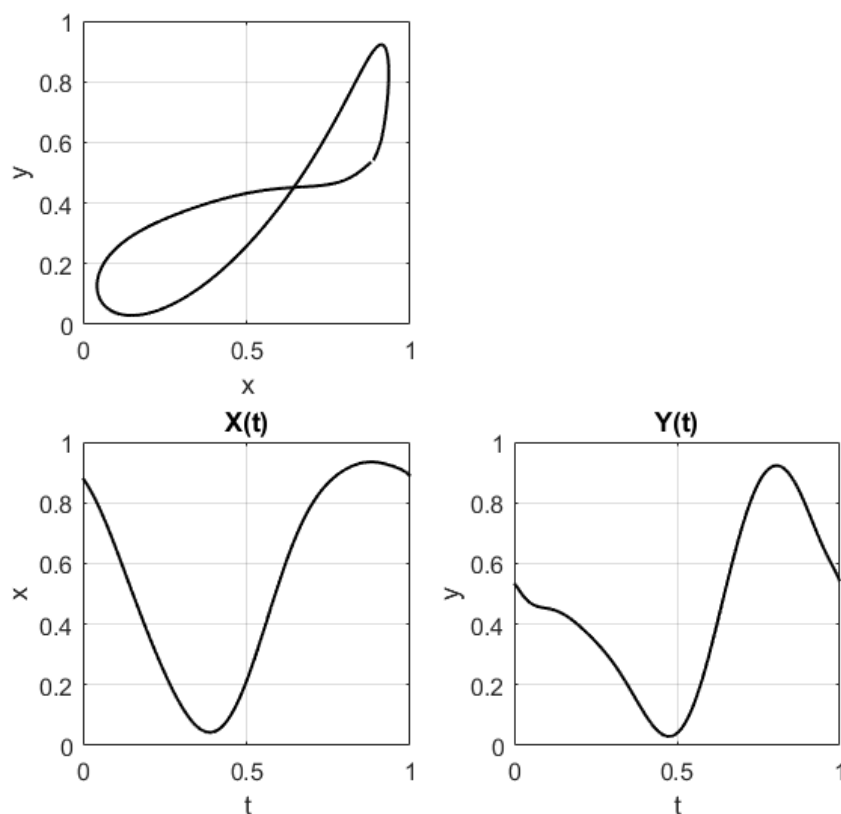


Рис. 6. Траектория движения запястья, полученная из анимации

Fig. 6. The trajectory of the wrist movement, obtained from animation

Следует отметить, что полученная траектория схожа с траекториями, полученными в результате проведенного

эксперимента. Как и траектории, полученные экспериментально, траектория представляет из себя замкнутую, перио-

дическую, подобно восьмерке сложную траекторию как с выпуклыми участками, так и с вогнутыми. Также она обладает точкой бифуркации.

Обобщенная траектория движения запястья при скандинавской ходьбе и анализ полученных результатов

В результате серии экспериментов по изучению биомеханики скандинавской ходьбы была получена обобщенная траектория движения запястья, отражающая усредненную кинематику верхних конечностей. Полученные результаты представлены на рис. 7.

Для оцифровки законов движения аналитического описания обобщенной траектории движения запястья была применена аппроксимация полиномами 5-го порядка по осям X и Y, которые имеют следующий обобщенный вид:

$$P(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0.$$

Выбор обусловлен достаточной гибкостью полинома для описания сложной траектории движения (включая точку бифуркации и фазы замаха/отталкивания). Полученные коэффициенты представлены в табл. 2.

Обобщенная траектория движения запястья

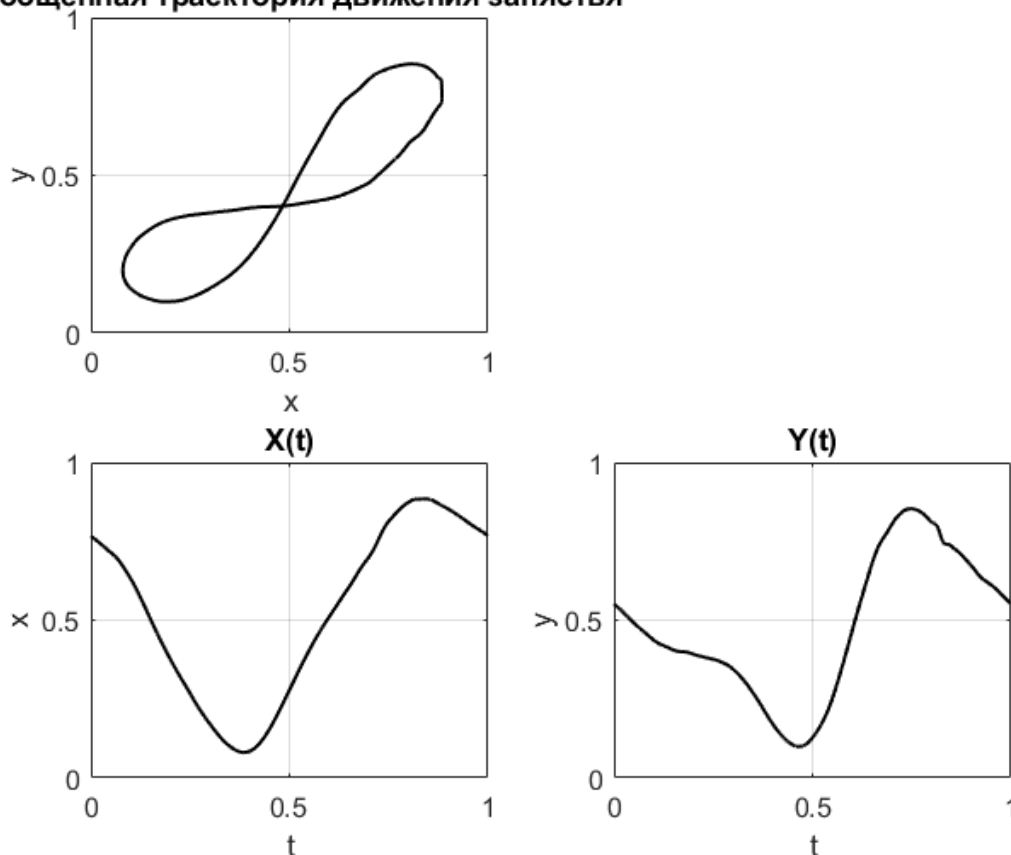


Рис. 7. Обобщенная траектория движения запястья при скандинавской ходьбе

Fig. 7. Generalized wrist movement trajectory during Nordic walking

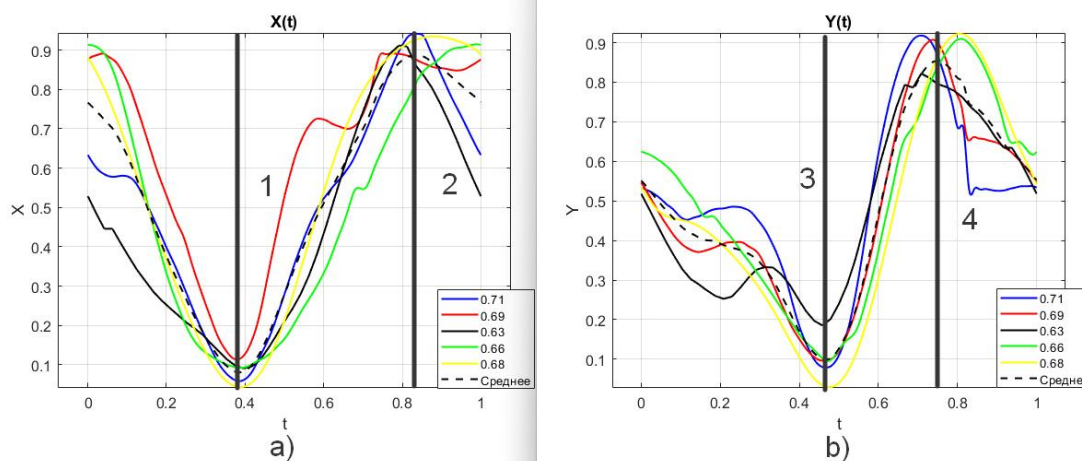
Таблица 2. Коэффициенты функции управляющего воздействия**Table 2.** Coefficients of the control action function

Коэффициенты по оси X / X-axis coefficients					
a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
33.88	-97.22	93.3	-31.41	1.49	0.72
Коэффициенты по оси Y / Y-axis coefficients					
a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
21.32	-73.04	81.23	-33.48	3.99	0.38

Также для углубленного понимания биомеханики движения запястья при скандинавской ходьбе был проведен анализ распределения полученных данных в ключевых точках обобщенной траектории, которые соответствуют экстремум движения (минимумам и максимумам по осям X и Y), отражая критические фазы цикла ходьбы: 1 – крайнее заднее положение при отталкивании; 2 – крайнее пе-

реднее положение при замахе; 3 – нижняя точка опускания руки; 4 – высшая точка подъема руки (рис. 8).

Исследование распределений в данных точках позволит оценить вариативность техники среди испытуемых, выявить аномалии, связанные с неправильным подбором длины палок и сравнить экспериментальные данные с эталонной, которая была получена из анимации.

**Рис. 8.** Выбор ключевых точек для анализа по оси X (a) и Y (b)**Fig. 8.** Selection of key points for analysis along the X (a) and Y (b) axes

Для каждой точки были построены гистограммы распределения значений координат для пяти траекторий и отмечено значение усредненной траектории.

Так как выборка состоит из малого количества данных ($n = 5$) помимо гистограммы распределения была проведена ядерная оценка плотности или Kernel

Density Estimation (KDE), которая работает с любой выборкой ($n \geq 2$). KDE – это непараметрический метод оценки плотности распределения случайной величины по конечной выборке данных [18]. В отличие от гистограмм, KDE позволяет получить гладкую и непрерывную оценку плотности. Оценка плотности $\hat{f}(x)$ в точке x вычисляется по формуле

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right),$$

где n – кол-во точек данных; h – ширина полосы (параметр сглаживания);

$K(u)$ – ядро сглаживания, симметричная функция, которая удовлетворяет условию $\int_{-\infty}^{\infty} K(u)du = 1$.

Наиболее распространенными ядрами являются гауссово, прямоугольное, треугольное и Епанечникова. В данной работе используется гауссово ядро, которое работает при любом количестве данных и вычисляется по формуле [19-20]

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}.$$

Результаты гистограмм распределения и ядерные оценки плотности в ключевых точках траектории движения запястья при скандинавской ходьбе представлены на рис. 9-10.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что при ядерной оценке плотности (KDE) по оси Y наблюдается бимодальное распределение, которое связано с биомеханикой ходьбы вследствие неподходящего подбора палок для скандинавской ходьбы.

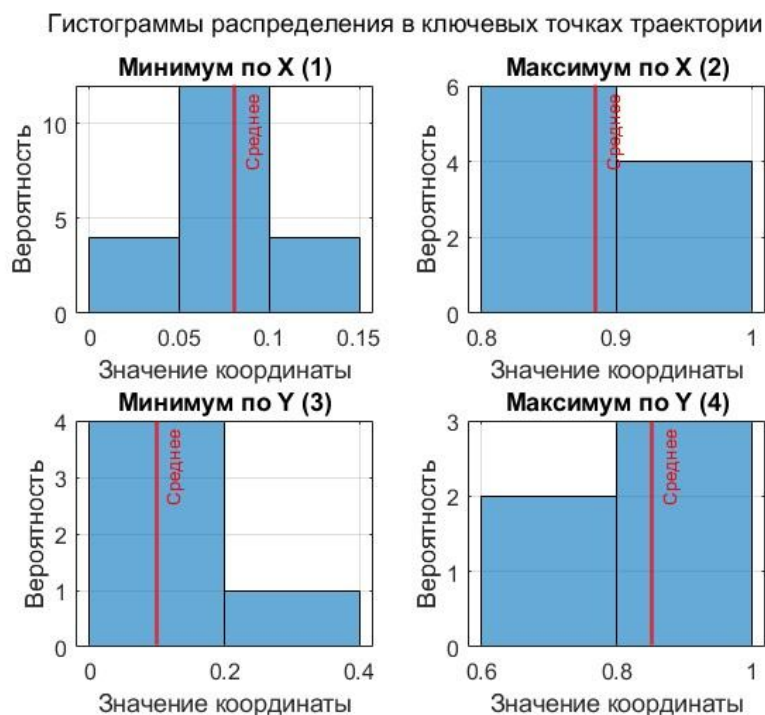


Рис. 9. Гистограммы распределения в ключевых точках траектории

Fig. 9. Histograms of the distribution at key points of the trajectory

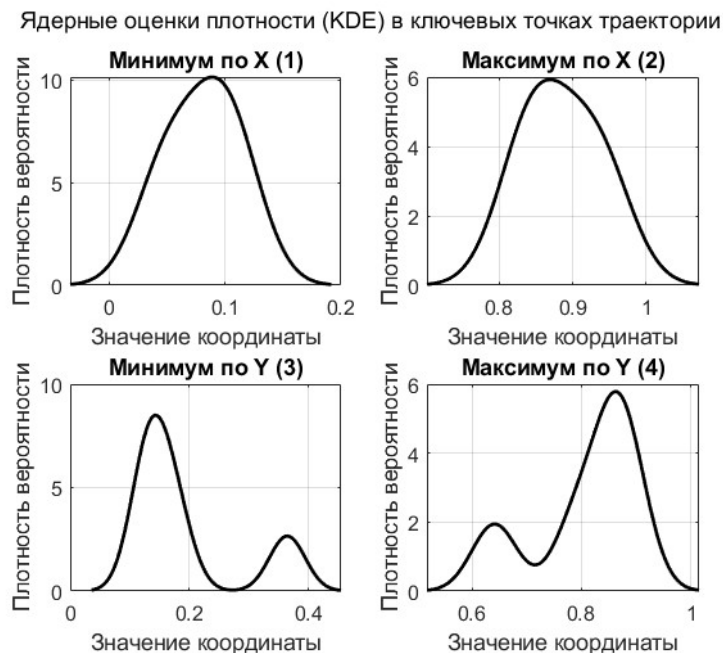


Рис. 10. Ядерные оценки плотности (KDE) в ключевых точках траектории

Fig. 10. Nuclear density estimates (KDE) at key points of the trajectory

Наибольшая вариативность наблюдается в точках максимума, что также связано с неправильным выбором длины палок для скандинавской ходьбы и индивидуальными различиями в технике ходьбы испытуемых. В то же время точки минимума демонстрируют высокую стабильность, связанную с фазой, которая ограничена биомеханикой человека.

Выводы

В данной статье был представлен и реализован метод получения обобщенной траектории движения запястья при скандинавской ходьбе с использованием полуавтоматического видеоанализа. На основе экспериментальных данных от испытуемых с различными антропометрическими параметрами, была получена усредненная траектория, которая отражает естественную биомеханику

движения верхних конечностей. Для математического описания траектории применена аппроксимация полиномами 5-го порядка, что позволило учесть сложную форму движения. Средний разброс данных по осям X и Y составил 10% и 8% соответственно, что подтверждает высокую точность метода. Сравнение экспериментальных данных с эталонной траекторией, полученной из анимации, подтвердило корректность предложенного метода. Полученные результаты имеют практическую значимость для оптимизации параметров реабилитационных стендов верхних конечностей, обеспечивающих естественное движение суставов. Перспективой дальнейших исследований является интеграция полученных данных в алгоритмы адаптивного управления роботизированными стендами для повышения эффективности реабилитации, что

позволит персонализировать процесс восстановления и улучшить качество жизни

пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата.

Список литературы

1. Екушева Е. В., Дамулин И. В. Реабилитация после инсульта: значение процессов нейропластичности и сенсомоторной интеграции // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2013. Т. 113, № 12-2. С. 35-41. EDN RTELWB.

2. Перспективы экзоскелетного ортезирования верхних конечностей у пациентов старшей возрастной группы / А.А. Воробьев, Ф.А. Андриющенко, А.С. Мазунов, Е.Е. Писарева, Е.В. Венскель, О.Д. Чулков, В.О. Чернов // Волгоградский научно-медицинский журнал. 2025. Т. 22. №2. С. 78-85. <https://doi.org/10.19163/2658-4514-2025-22-2-78-85>

3. Даминов В. Д. Роботизированная механотерапия в нейрореабилитации // Вестник Алматинского государственного института усовершенствования врачей. 2013. № S3. С. 83-88. EDN WWBMGL.

4. Varlamova L. P., Farukh N. Xo'jaqulov. Simulation of a two-link manipulator // Scientific Progress. 2022. N 3. P. 1107-1111.

5. Кибардин Г.М. Скандинавская ходьба лечит. М.: Эксмо, 2016. 88 с.

6. Станский Н. Т., Алексеенко А. А. Исследование эффективности занятий скандинавской ходьбой // Вестник Полоцкого университета. 2015. № 1. С. 8-11.

7. Jatsun S., Saveleva E., Al Manji K. H. M. Research Into Impact of Attachment System of Exoskeleton Link to Human Body on Efficiency of its Application // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE, 2019. P. 1-5.

8. Analysis of the effect of the exoskeleton geometrical dimensions on the nature of a linear compensator operation / S. F. Jatsun, V. E. Pavlovsky, A. E. Karlov, Al Maji Kh Kh M., A. S. Yatsun, E. V. Saveleva // 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). Kazan: IEEE, 2019. P. 466-471.

9. Беркаев А. Р., Ненашев А. А., Ключиков А. В. Разработка системы локализации и позиционирования мобильного робота // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. Т. 12-3. С. 152-157. EDN QDGESL.

10. Скворцов Д. В. Методика исследования кинематики движений и современные стандарты. Видеоанализ // Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2012. № 12(108). С. 4-10. EDN PIJHKF.

11. Михайлюк М. В., Хураськин И. А. Оптический трекинг для систем виртуальной реальности // Программные продукты и системы. 2006. № 3. С. 4. EDN IYDAAT.

12. What is Tracker // Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education. URL: <https://opensourcephysics.github.io/tracker-website/> (дата обращения: 02.05.2025).

13. Мальчиков А. В., Кисляк Л. Б., Сергеев В. В. Получение законов изменения задающих воздействий для системы управления двухзвенной стопы экзоскелета //

Наука молодых - будущее России : сборник научных статей 6-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 09–10 декабря 2021 г. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. Т. 5. С. 106-110. EDN QRENEK.

14. Как выбрать палки для скандинавской ходьбы по росту. URL: <https://nordicpro.ru/vse-o-palkah-i-hodbe/kak-vybrat-palki-dlya-skandinavskoy-hodby-po-rosty> (дата обращения: 12.05.2025).

15. Половко А. М., Бутусов А. М. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 314 с.

16. Доронина Н. П., Абдуллова Н. В., Алдарова С. А. Техника и правила скандинавской ходьбы. Цели скандинавской ходьбы // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 3-2(66). С. 246-248. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-3-2-246-248>. EDN SDRZIM.

17. Barbara Pellegrini, Gennaro Boccia, Chiara Zoppirolli Muscular and metabolic responses to different Nordic walking techniques, when style matters // Plos one. 2018. Vol. 1, №. 1.

18. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ методов оптимизации непараметрической оценки плотности вероятности по коэффициенту размытости ядерных функций // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 3-8. EDN YZJOON.

19. Lapko A. V., Lapko V. A. Fast algorithm bandwidth selection for multivariate kernel density estimation Fast algorithm bandwidth selection for multivariate kernel density estimation // Izmeritel'naya Tekhnika. 2018. No. 10. P. 19-23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-10-19-23>. EDN LPBUGX.

20. Zaichenko K. V., Gurevich B. S. Spectral processing of bioelectric signals // Medical equipment. 2021. N 1(325). P. 12-14.

References

1. Yekusheva E. V., Damulin I. V. Rehabilitation after stroke: the significance of neuroplasticity and sensorimotor integration processes. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. C.C. Korsakova* = *Journal of Neurology and Psychiatry named after C.C. Korsakov*. 2013; 113(12-2): 35-41. (In Russ.). EDN RTELWB.

2. Vorobiev A.A., Andryushchenko F.A., Mazunov A.S., Pisareva E.E., Venskel E.V., Chulkov O.D., Chernov V.O. Prospects of exoskeletal orthosis of the upper extremities in patients of the older age group. *Volgogradskii nauchno-meditsinskii zhurnal* = *Volgograd Journal of Medical Research*. 2025; 22(2): 78-85. (In Russ.). <https://doi.org/10.19163/2658-4514-2025-22-2-78-85>

3. Daminov V. D. Robotic mechanotherapy in neurorehabilitation. *Vestnik Almatinskogo gosudarstvennogo instituta usovershenstvovaniya vrachei* = *Bulletin of the Almaty State Institute of Advanced Medical Training*. 2013; (S3): 83-88. (In Russ.). EDN WWBMGL.

4. Varlamova L. P., Farukh N. Xo'jaqulov. Simulation of a two-link manipulator. *Scientific Progress*. 2022; (3):1107-1111.
5. Kibardin G.M. Scandinavian walking heals. Moscow: Eksmo; 2016. 88 p. (In Russ.).
6. Stansky N. T., Alekseenko A. A. A study of the effectiveness of Nordic walking. *Vestnik Polotskogo universiteta = Proceedings Polotsk University*. 2015; (1): 8-11. (In Russ.).
7. Jatsun S., Saveleva E., Al Manji K. H. M. Research Into Impact of Attachment System of Exoskeleton Link to Human Body on Efficiency of its Applicationb. In: *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi: IEEE; 2019. P. 1-5.
8. Jatsun S. F., Pavlovsky V. E., Karlov A. E., Al Maji Kh Kh M., Yatsun A. S., Saveleva E. V. Analysis of the effect of the exoskeleton geometrical dimensions on the nature of a linear compensator operation. In: *12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. Kazan: IEEE; 2019. P. 466-471.
9. Berkaev A. R., Nenashev A. A., Klyuchikov A.V. Development of a localization and positioning system for a mobile robot. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh - MMTT = Mathematical methods in engineering and technology - MMTT*. 2020; (12-3): 152-157. (In Russ.). EDN QDGESL.
10. Skvortsov D. V. Methods of motion kinematics research and modern standards. Video analysis. *Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina = Physical therapy and sports medicine*. 2012; (12): 4-10. (In Russ.). EDN PIJHKF.
11. Mikhailyuk M. V., Khuraskin I. A. Optical tracking for virtual reality systems. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2006; (3): 4. (In Russ.). EDN IYDAAT.
12. hat is Tracker. *Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education*. Available at: <https://opensourcephysics.github.io/tracker-website/> (accessed: 02.05.2025).
13. Malchikov A.V., Kislyak L. B., Sergeev V. V. Obtaining laws of change of setting influences for the control system of the two-link foot of the exoskeleton. In: *Nauka molodykh - budushchee Rossii : sbornik nauchnykh statei 6-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh = Science of the young - the future of Russia : collection of scientific articles of the 6th International Scientific Conference of promising developments of young scientists*. Kursk: SWSU; 2021. Vol. 5. P. 106-110. (In Russ.). EDN QRENEK.
14. How to choose sticks for Scandinavian walking on growth. (In Russ.). Available at: <https://nordicpro.ru/vse-o-palkah-i-hodbe/kak-vybrat-palki-dlya-skandinavskoy-hodby-porosty> (accessed: 12.05.2025).
15. Polovko A.M., Butusov A.M. Interpolation. Methods and computer technologies of their implementation. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2011. 314 p. (In Russ.).
16. Doronina N. P., Abdullova N. V., Aldarova S. A. Technique and rules of Scandinavian walking. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = The goals of*

Scandinavian walking. International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2022; (3-2): 246-248. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-3-2-246-248>. EDN SDRZIM.

17. Barbara Pellegrini, Gennaro Boccia, Chiara Zoppirolli Muscular and metabolic responses to different Nordic walking techniques, when style matters. *Plos one.* 2018; 1(1).

18. Lapko A.V., Lapko V. A. Analysis of optimization methods for nonparametric estimation of probability density by the blurriness coefficient of nuclear functions. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment.* 2017; (6): 3-8. (In Russ.). EDN YZJOON.

19. Lapko A. V., Lapko V. A. Fast algorithm bandwidth selection for multivariate kernel density estimation Fast algorithm bandwidth selection for multivariate kernel density estimation. *Izmeritel'naya Tekhnika.* 2018; (10): 19-23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-10-19-23>. EDN LPBUGX.

20. Zaichenko K. V., Gurevich B. S. Spectral processing of bioelectric signals. *Medical equipment.* 2021; (1): 12-14.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Поляков Владислав Андреевич, магистрант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vpolyakov2000@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8427-8200>

Vladislav A. Polyakov, Master Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vpolyakov2000@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8427-8200>

Гридасов Яков Александрович, магистрант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yasha.grid@yandex.ru

Yakov A. Gridasov, Master Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yasha.grid@yandex.ru

Жабин Иван Васильевич, студент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: diogenno@gmail.com

Ivan V. Zhabin, Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: diogenno@gmail.c

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.4

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-157-172>

Разработка единой информационной системы для всего контура управления цепочками поставок ретейл компании

В. А. Емельянов ¹, С. Г. Черный ²✉, Н. Ю. Емельянова ¹

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Ленинградский пр., д. 49, г. Москва 125167, Российская Федерация

² Херсонский технический университет, ул. Центральная, д. 196, г. Геничеськ 275500, Российская Федерация

✉ e-mail: sergiiblack@gmail.com

Резюме

Цель исследования. В работе решается актуальная прикладная задача разработки единой информационной системы управления цепочками поставок ретейл компании. Актуальность работы обусловлена необходимостью упростить передачу информации между отделами ретейл-компании и повысить уровень взаимодействия между подразделениями в процессе управления цепочками поставок. Анализ рынка показал, что необходимость замещения иностранного программного обеспечения остается ключевым вопросом в Российской Федерации. Замещение и адаптация компонентов программных модулей и настроек, поддержка пользователей и администраторов ресурса, а так же информационная безопасность и целостность данных – компоненты единой надежной системы современного предприятия для стабильной работы в мире трансформационных процессов. Разработка единой информационной системы для повышения уровня взаимодействия между отделами ретейл компании в процессе управления цепочками поставок.

Методы исследования. В работе применен язык моделирования архитектуры ArchiMate для проектирования функциональной архитектуры единой информационной системы управления цепочками поставок. Для моделирования функциональности проектируемых модулей информационной системы применен унифицированный язык моделирования UML. Для разработки программного обеспечения информационной системы управления цепочками поставок применен объектно-ориентированный подход.

Результаты. В ходе работы построена модель функциональной архитектуры единой информационной системы управления цепочками поставок. Выполнен анализ функциональных возможностей проектируемой системы и проведено объектно-ориентированное проектирование статической структуры информационной системы управления цепочками поставок. Разработано программное приложение единой информационной системы, позволяющее повысить уровень взаимодействия между подразделениями в процессе управления цепочками поставок, а также упростить передачу информации между отделами ретейл компании.

Заключение. Разработанная система за счет автоматизации всего контура управления цепочками поставок позволяет упростить передачу информации между отделами ретейл компании, что позволяет снизить вероятность ошибок при взаимодействии между подразделениями.

Ключевые слова: информационная система; архитектура; программное обеспечение; цепочки поставок; ретейл компания.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Емельянов В. А., Черный С. Г., Емельянова Н. Ю. Разработка единой информационной системы для всего контура управления цепочками поставок ретейл компании // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025. Т. 29, №4. С. 157-172. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-157-172>.

Поступила в редакцию 12.09.2025

Подписана в печать 08.10.2025

Опубликована 22.12.2025

Development of a unified information system for the entire supply chain management circuit of a retail company

Vitaly A. Yemelyanov ¹, Sergei G. Chernyi ² ✉, Natalia Y. Yemelyanova ¹

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation
49, Leningradsky ave., Moscow 125167, Russian Federation

² Kherson Technical University
196, Centralnaya str., Genichesk 275500, Russian Federation

✉ e-mail: sergiiblack@gmail.com

Abstract

Purpose of research solves the current applied problem of developing a unified information system for managing supply chains of a retail company. The relevance of the study is due to the need to simplify the transfer of information between departments of a retail company and increase the interaction between departments in the managing supply chains.

Market analysis has shown that the need to replace foreign software remains a key issue in the Russian Federation. Replacement and adaptation of software modules and settings, user and administrator support, as well as information security and data integrity are all components of a unified, reliable system for a modern enterprise to operate smoothly in a world of transformational processes. Development of a unified information system to improve the interaction between departments of a retail company in the supply chain management

Methods. The study uses the ArchiMate architecture modeling language to design the functional architecture of a unified supply chain management information system. The unified modeling language UML is used to model the functionality of the designed modules of the unified information system. An object-oriented approach is used to develop software for the supply chain management information system.

Results. In the course of the study, a model of the functional architecture of the information system for monitoring prices of trading enterprises was built. An analysis of the functional capabilities of the designed system was performed and an object-oriented design of the static structure of the information system for monitoring prices of trading enterprises was carried out. A web application for the information system for monitoring prices of trading enterprises was developed, allowing the collection of information on prices of goods of trading enterprises through online resources and through retail outlets.

In the course of the study, a model of the functional architecture of a unified information system for supply chain management was built. An analysis of the functional capabilities of the designed system was performed and an object-oriented design of the information system static structure for supply chain management was carried out. A software for a unified information system was developed, which allows for an increase the interaction between departments in the supply chain management, as well as simplification of the information transfer between departments of a retail company.

Conclusion. The developed system, by automating the entire supply chain management circuit, makes it easier to transfer information between the departments of a retail company, which reduces the likelihood of errors when interacting between departments.

Keywords: information system; architecture; software; supply chain; retail company.

Conflict of interest. *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Yemelyanov V. A., Chernyi S. G., Yemelyanova N. Y. Development of a unified information system for the entire supply chain management circuit of a retail company. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 157-172 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-157-172>.

Received 12.09.2025

Accepted 08.10.2025

Published 22.12.2025

Введение

Ретейл компании, продающие потребителю товары и услуги для личного и домашнего пользования, играют большую роль в повседневной жизни населения. Чтобы ретейл-компания смогла продать товар и получить прибыль, а люди могли приобрести все необходимое, в ретейл компаниях должны действовать все бизнес-процессы, связанные с продажей товаров и услуг конечному потребителю. Одним из основополагающих процессов в данной сфере является доставка товаров до конечного потребителя при максимальной скорости и минимальных издержках, или, другими словами, построение оптимальных цепочек поставок.

Одной из важнейшей составляющей эффективного управления цепочками поставок является получение и обработка актуальной информации. Управление цепочками поставок охватывает весь цикл, начиная с поставок сырья (или производства сырья) и заканчивая реализацией товаров потребителям [1]. На всех этапах работы цепочек поставок создается и используется большое количество информации. Например, требуется обработка данных о магазинах и складах компании, о поставщиках,

о способах и путях доставки и т.п., что помогает компании построить оптимальные цепочки поставок. Чем меньше информации доступно для анализа, тем больше погрешностей и ошибок в планировании и построении цепочек поставок. Такого рода погрешности могут привести к финансовым и репутационным потерям компании.

Анализ источников и постановка задачи

Анализ источников [2, 3, 4] говорит о том, что для повышения эффективности процесса управления цепочками поставок компаниям необходимо внедрять информационные системы класса SCM (Supply Chain Management), которые автоматизируют как обработку информации по процессу управления цепочками поставок, так и управление этапами снабжения предприятия и контроля всего товародвижения (закупка сырья и материалов, производство, распространение продукции), что позволяет значительно лучше удовлетворить спрос на продукции компании и значительно снизить затраты на логистику и закупки [5].

На рынке программных продуктов по управлению цепями поставок существует множество решений: 1C: WMS/TMS, SAP SCM EWM, Oracle «Управление логистикой», JDA Supply Chain Planner,

Manhattan Associates: Extended Enterprise Management, Infor SCM и др. Однако анализ функциональных возможностей перечисленных систем показывает, что в большинстве систем либо совсем не реализован расчет цены товаров с учетом логистических затрат и затрат на хранение, либо реализован не в полной мере (присутствуют только отдельные функции). В то время, как требование о расчете стоимости товаров является для торговых компаний целесообразным и необходимым [6-9], т.к. цена товаров должна рассчитываться с учетом их себестоимости, логистических затрат и затрат на хранение товаров.

Анализ опыта [7, 8, 9] использования информационных систем управления цепями поставок говорит о том, что практика применения информационных систем сводится к тому, что у компаний возникает множество информационных систем для разных отделов компании, решающих разные задачи в управлении цепями поставок. Например, в одной и той же компании для разных отделов могут использоваться следующие системы:

- «1C: ERP. Управление закупками» используется для планирования закупок и учета прогнозируемого уровня складских запасов, контроля исполнения договоров с поставщиками, оформления заказов поставщикам;

- «1C: TMS Логистика» используется для управления перевозками, управления ресурсами для обеспечения перевозок, контроль за выполнением перевозок;

- «1C: WMS Логистика» используется для управления складом, планирования, приемки и размещения товаров на складе, штрих-кодирования товаров, отгрузки товаров, инвентаризации.

Однако в таком случае у компании возникает ситуация наличия большого количества разного рода информационных систем для решения различных задач в управлении цепями поставок. И хорошо если все эти системы разработаны одной компанией, например, 1C, (в таком случае упрощаются вопросы интеграции между системами), а на практике во многих компаниях внедрены информационные системы от разных вендоров. Такая ситуация приводит к следующим проблемам [10-14]:

- несогласованность в обмене информацией между подразделениями компании;

- возникновение как дефицита, так и излишков запасов на складе или в магазине (из-за недостаточной или ошибочной/неактуальной информации о запасах);

- отсутствие аналитической информации по общим логистическим издержкам и, как следствие, невозможность управления ими;

- ошибки (связанные с передачей информации или с человеческим фактором) в документах и отчетах о работе подразделений;

- плохая координация деятельности подразделений и снижение общей эффективности деятельности предприятия.

Таким образом, актуальным является разработка единой информацион-

ной системы для управления цепями поставок, которая позволит упростить передачу информации между отделами компании и переведет взаимодействие между подразделениями на качественно новый уровень.

Результаты и их обсуждение

Разработка архитектуры единой информационной системы управления цепочками поставок

При разработке функциональной архитектуры, для учета всех необходимых

функций по всему контуру управления цепочками поставок для всех отделов, выделено 8 функциональных модулей единой информационной системы:

1. Модуль управления закупками – позволяет планировать и контролировать исполнение закупок, оформлять документы по поставкам, анализировать потребности склада и магазина в товарах и др. На рис. 1 представлена модель использования модуля управления закупками в виде диаграммы вариантов использования, отражающая функциональные возможности данного модуля.

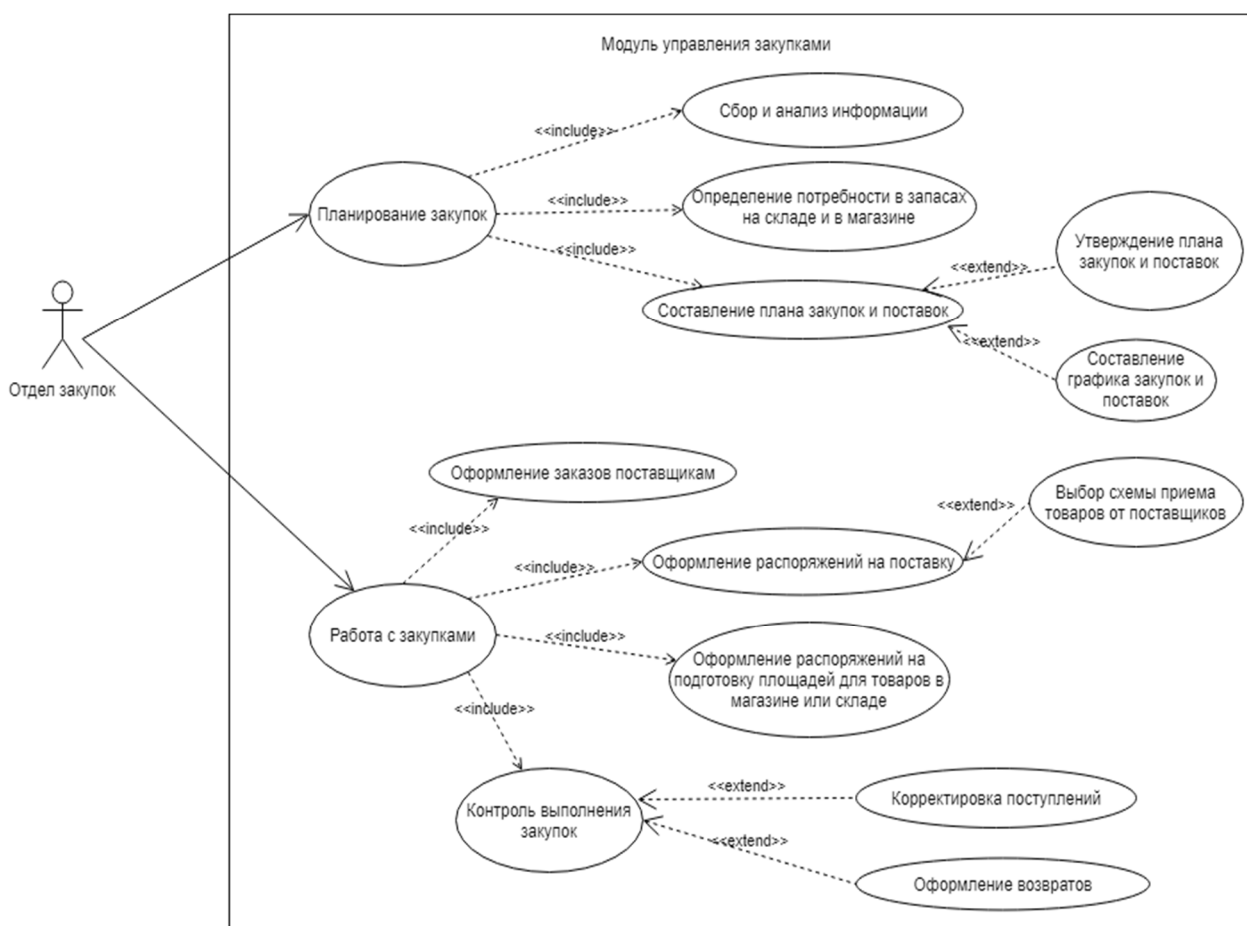


Рис. 1. Модель использования модуля управления закупками

Fig. 1. Purchasing Management Module Usage Model

2. Модуль управления поставщиками – позволяет выбрать поставщиков, мониторить цены поставщиков; оформить, согласовать и подписать договоры (с использованием электронной подписи или же в бумажном варианте), сохранить все документы по поставщикам, хранить в карточке поставщика все операции и документы, контролировать

исполнение договора с поставщиком. На рис. 2 представлена модель использования модуля управления поставщиками в виде диаграммы вариантов использования, с помощью которого отдел закупок сможет управлять взаимоотношениями с поставщиками и контролировать исполнение договоров.

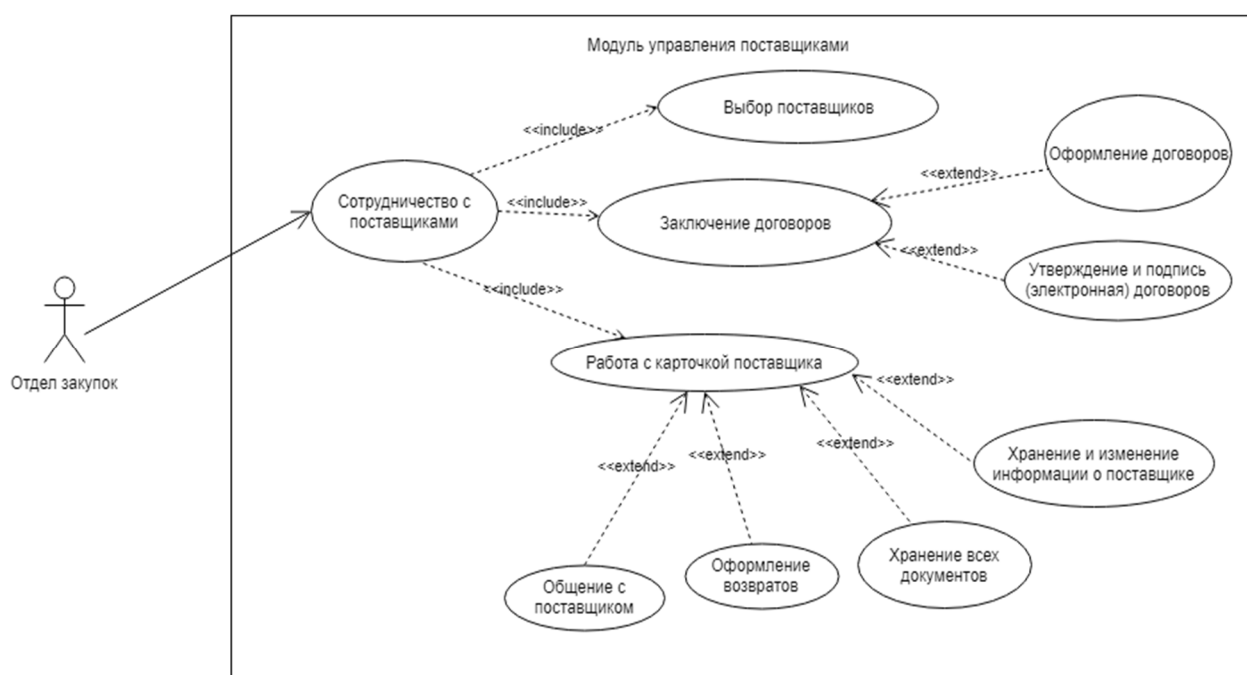


Рис. 2. Модель использования модуля управления поставщиками

Fig. 2. Supplier Management Module Usage Model

3. Модуль управления перевозками – позволяет координировать действия в рамках перевозок, управлять автопарком и материальными ресурсами, рассчитывать стоимость перевозок и т.д. На рис. 3 представлена модель использования для модуля управления перевозками, с которым будут работать отдел логистики и транспортная служба.

4. Модуль управления складом – дает возможность управлять складскими помещениями, вести учет товаров на складе, управлять внутрискладскими операциями [15-17]. Также модуль позволяет вводить информацию о товарах через штрих-код. Складская служба будет работать непосредственно с модулем управления складом, функционал которого представлен на модели использования для этого модуля (рис. 4).

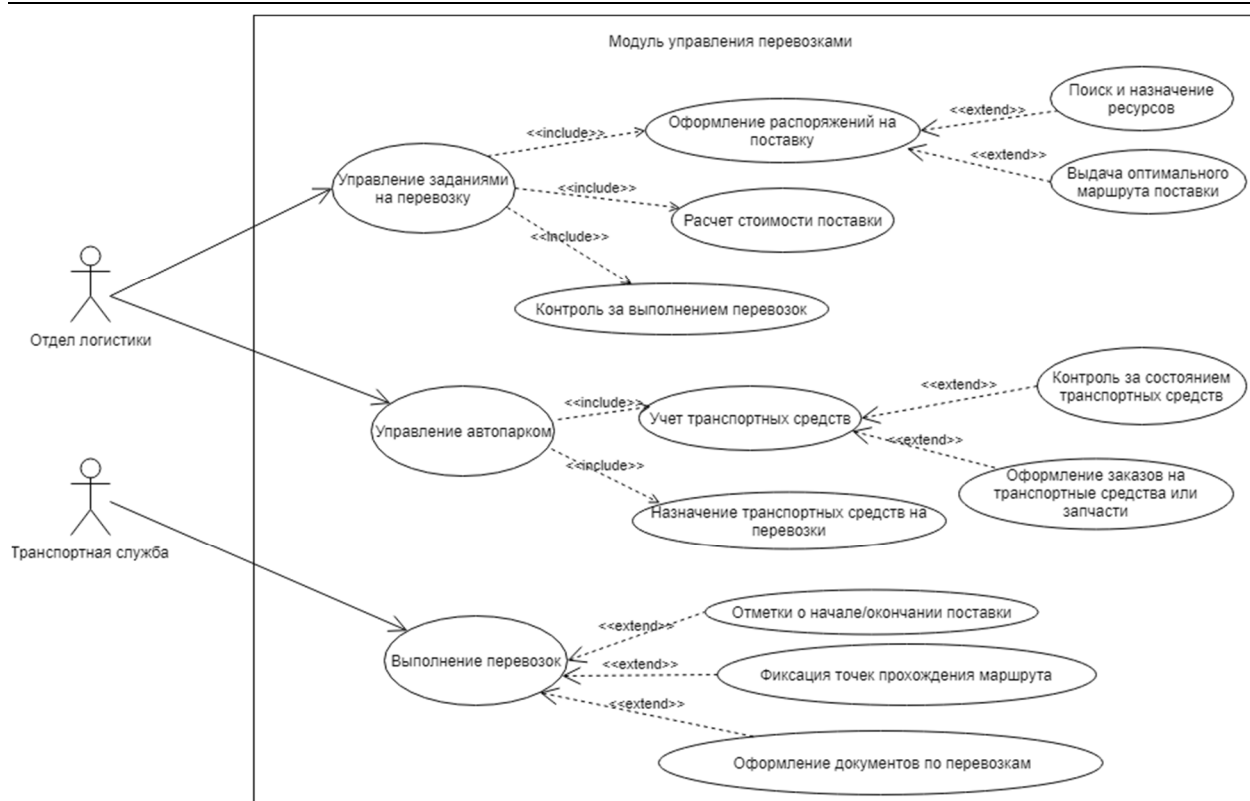


Рис. 3. Модель использования модуля управления перевозками

Fig. 3. Transportation Management Module Usage Model

5. Модуль управления магазинами – не позволяет в полной мере управлять магазинами, однако есть возможность отслеживать наличие товаров в магазине (через интеграцию с ИС магазинов), определять потребности в товарах. Сотрудники магазинов могут оформлять заказы на поставку через модуль, а также получать сообщения о поставках товаров. Модуль позволяет собрать данные о продажах. Модуль управления магазинами учитывает работу не только отдела закупок, но и работу сотрудников магазинов. Поэтому к модулю есть доступ у обоих подразделений, которые могут выполнять различные функции. Набор этих функций представлен на диаграмме вариантов использования для модуля управления магазинами (рис. 5).

6. Модуль построения оптимальных маршрутов – позволяет строить маршруты поставок от поставщика до склада, от склада до магазинов. Также данный модуль позволяет рассчитать стоимость доставки с учетом расположения поставщиков, складов и магазинов.

7. Модуль расчета стоимости товаров – с помощью определенных настроек модуль знает, какие данные необходимо собрать для расчета стоимости товаров. Расчет проходит автоматически. Модель использования для модуля расчета стоимости товаров представлена на рис. 6. На диаграмме отражены функции, с помощью которых отдел закупок сможет корректно рассчитать стоимость товаров.

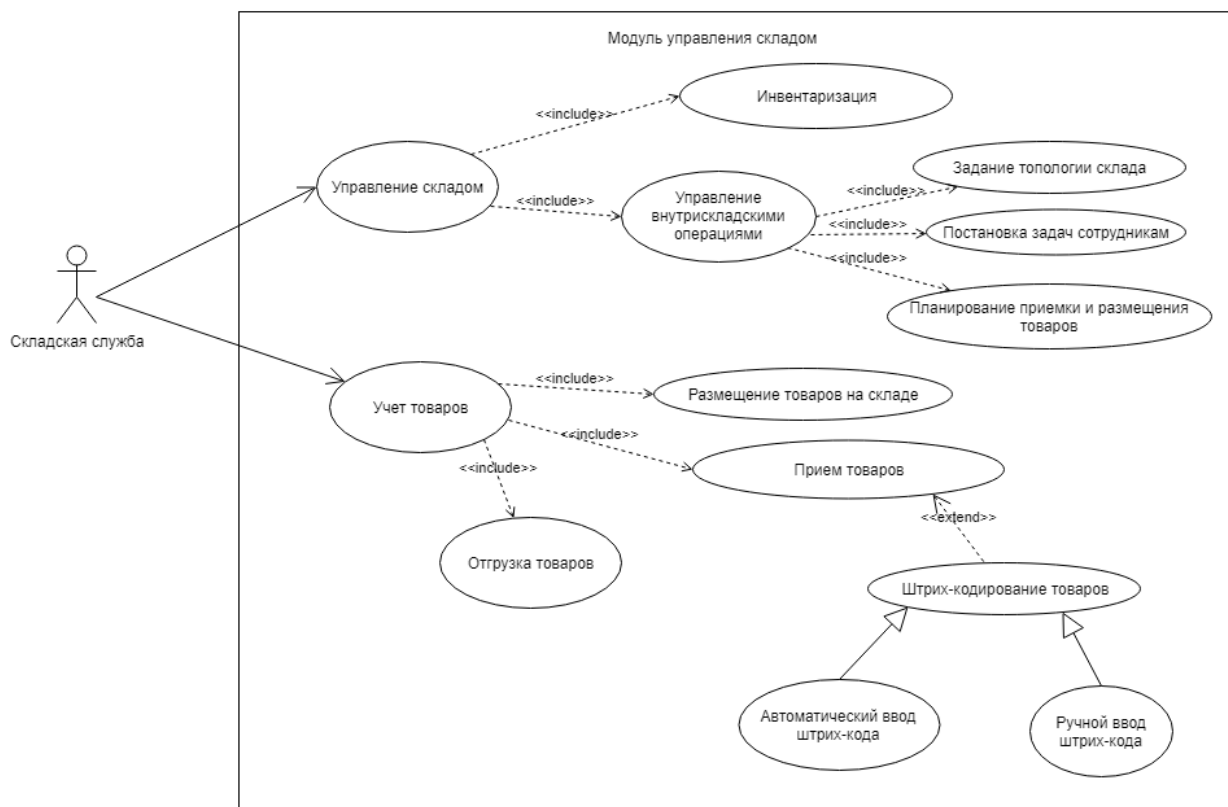


Рис. 4. Модель использования модуля управления складом

Fig. 4. Warehouse Management Module Usage Model



Рис. 5. Модель использования модуля управления магазинами

Fig. 5. Store Management Module Usage Model

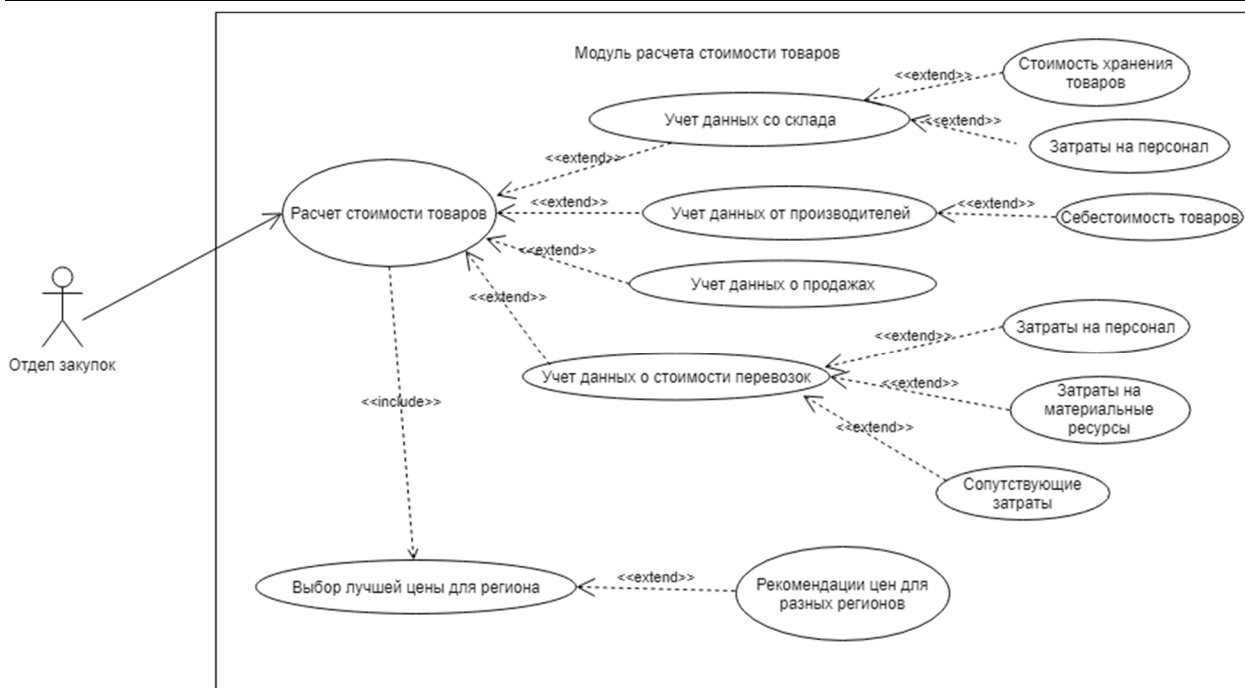


Рис. 6. Модель использования модуля расчета стоимости товаров

Fig. 6. Model of using the module for calculating the cost of goods

8. Модуль отчетности – позволяет построить отчетность и статистику по заданным пользователем параметрам.

Все модули, хоть и выполняют различные функции, но интегрированы между собой и в совокупности представляют единую систему, взаимодействующую с различными сервисами. На рис. 7 представлена модель функциональной архитектуры единой информационной системы управления цепочками поставок, отражающая все функциональные модули.

Реализация единой информационной системы управления цепочками поставок

Основываясь на предложенной функциональной модели единой информационной системы управления цепочками поставок, в ходе работы создано приложение, реализующее описанные ранее

функциональные модули системы. На рис. 8-10 отражены примеры экранных форм работающей единой информационной системы управления цепочками поставок. Рис. 8 отражает страницу данных о товарах и складах. Здесь указаны все товары, которые хранятся на складах. Выбирая конкретный товар, можно посмотреть все склады, на которых данный товар присутствует и в каком количестве [17-20]. Также выбирая склад, можно увидеть все товары, которые на нем хранятся.

Рис. 9 показывает карточку поставщика в разработанном приложении, в котором ведется вся информация о поставщике, фиксируются все операции, связанные с конкретным поставщиком, а также отсюда можно отправлять сообщения поставщику для быстрого и удобного общения.

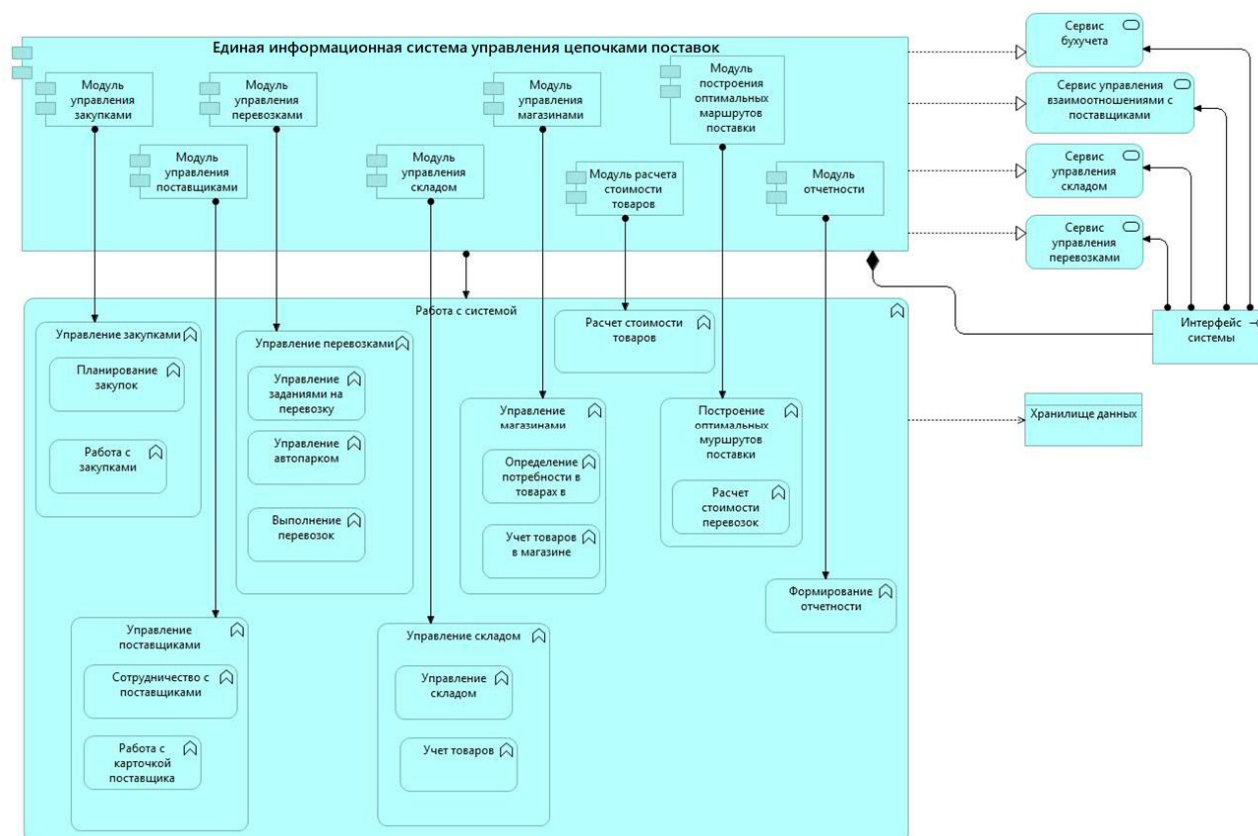


Рис. 7. Модель функциональной архитектуры единой информационной системы управления цепочками поставок

Fig. 7. Model of the functional architecture of a unified information system for supply chain management

44	WH Destination	Place To	UOM	UOM Parent	Cost/Unit	Cost Currency	Selling Cost	Selling UOM	Delay
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Container 40'		575.56	RUB	575.56	Unit	118
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Plannet E170	Plannet E170	604.91	RUB	604.91	Unit	126
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Inner	Plannet E170	612.67	RUB	612.67	Unit	126
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Outer	Plannet E170	605.34	RUB	605.34	Unit	126
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Unit	Plannet E170	636.67	RUB	636.67	Unit	126
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Plannet E170	Plannet E170	609.62	RUB	609.62	Unit	128
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Inner	Plannet E170	617.38	RUB	617.38	Unit	128
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Outer	Plannet E170	610.05	RUB	610.05	Unit	128
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Unit	Plannet E170	641.38	RUB	641.38	Unit	128
	Moscow 001	St. Petersburg 002	Plannet E170	Plannet E170	616.08	RUB	616.08	Unit	124

Рис. 8. Графический интерфейс, отражающий данные о товарах и складах в единой информационной системе

Fig. 8. Graphical interface displaying data on goods and warehouses in a single information system

На рис. 10 представлена форма из единой информационной системы, на которой после проведения расчетов отображаются рекомендованные цены товаров для регионов. Для каждого товара считается несколько вариантов цен в

зависимости от маршрута поставки, варианты цен можно посмотреть, «провалившись» в страницу товара. Также по каждому товару считаются цены для разных регионов, в которых работает компания.

Рис. 9. Графический интерфейс, отражающий карточку поставщика в единой информационной системе управления цепочками поставок

Fig. 9. Graphical interface displaying a supplier card in a unified supply chain management information system

	Recommended Price Moscow	Recommended Price South	Recommended Price Volga	Recommended Price North	Recommended Price Siberia	Recommended Price Far East	Recommended Price Kaliningra
	3,775.496	3,775.496	3,775.496	3,775.496	3,775.496	3,775.496	3,775.496
	1,529.235	1,529.235	1,529.235	1,529.235	1,529.235	1,529.235	1,529.235
	2,134.129	2,134.129	2,134.129	2,134.129	2,134.129	2,134.129	2,134.129
	3,561.568	3,561.568	3,561.568	3,561.568	3,561.568	3,561.568	3,561.568
	3,415.402	3,415.402	3,415.402	3,415.402	3,415.402	3,415.402	3,415.402
	3,848.783	3,848.783	3,848.783	3,848.783	3,848.783	3,848.783	3,848.783
	1,420.282	1,420.282	1,420.282	1,420.282	1,420.282	1,420.282	1,420.282
	1,981.486	1,981.486	1,981.486	1,981.486	1,981.486	1,981.486	1,981.486
	866.354	866.354	866.354	866.354	866.354	866.354	866.354
	1,344.00	1,384.00	1,384.00	1,354.00	1,484.00	1,584.00	1,433.00
	2,206.00	2,248.00	2,250.00	2,217.00	2,357.00	2,465.00	2,302.00
	4,665.00	4,995.00	4,995.00	4,748.00	5,823.00	6,648.00	5,400.00
	3,610.00	3,698.00	3,698.00	3,632.00	3,920.00	4,141.00	3,807.00
	1,434.00	1,474.00	1,474.00	1,444.00	1,574.00	1,674.00	1,523.00
	2,424.00	2,478.00	2,478.00	2,437.00	2,613.00	2,747.00	2,544.00
	5,228.00	5,558.00	5,558.00	5,311.00	6,386.00	7,211.00	5,963.00
	2,712.00	2,776.00	2,776.00	2,728.00	2,935.00	3,093.00	2,853.00
	3,147.00	3,235.00	3,235.00	3,168.00	3,457.00	3,678.00	3,344.00
	1,154.00	1,181.00	1,181.00	1,161.00	1,247.00	1,314.00	1,496.2041
	753.00	766.00	766.00	756.00	798.00	832.00	782.00
	3,152.00	3,227.00	3,227.00	3,171.00	3,415.00	3,603.00	3,318.00

Рис. 10. Графический интерфейс системы с результатами расчета рекомендованных цен для регионов

Fig. 10. Graphical interface of the system with the results of calculating recommended prices for regions

Разработанная единая информационная система находится на этапе опытной эксплуатации в компании, относящейся к категории среднего бизнеса, занимающегося розничной торговлей товаров бытовой техники.

Выводы

Таким образом, в работе предложена и описана функциональная модель единой информационной системы управления цепочками поставок ретейл компании, а также выполнено функциональное проектирование модулей проектируемой системы. На основе предложен-

ной модели создана единая информационная система управления цепочками поставок ретейл компании, отличительной особенностью которой является наличие возможности расчета цены товаров с учетом логистических затрат и затрат на их хранение. Разработанная система за счет автоматизации всего контура управления цепочками поставок позволяет упростить передачу информации между отделами ретейл компании, что позволяет снизить вероятность ошибок при взаимодействии между подразделениями.

Список литературы

1. Литвинова И.Ю. Управление цепями поставок как инструмент повышения эффективности деятельности компании // Стратегии бизнеса. 2020. Т.8(10). С. 261-264. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2020-10-261-264>
2. Лукина С.Г., Садыков А.А., Файзуллин Р.В. Модели оптимизации в системе SCM: прогрессивное управление цепями поставок // Вестник университета. 2023. №8. С. 116-127. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-8-116-127>
3. Пузанова И.А., Аникин О.Б., Аникин Б.А. Развитие интегрированного планирования цепей поставок на основе цифровых технологий // Современная экономика: проблемы и решения. 2020. №4(120). С. 85-95.
4. Хаирова С.М., Паравян М.К. Инструменты трансформации бизнес-процессов в цепях поставок в условиях формирования цифровой экономики // Наука о человеке: гуманитарные исследования. 2023. №17 (2). С. 239-250.
5. Антюшин С.М., Найдис О.А. Исследование стратегий управления цепями поставок // Организатор производства. 2020. №28 (3). С. 97-107.
6. Смирнова Е.А., Зуев А.В. Модели и методы управления цепями поставок // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2022. №2. С. 95-100.
7. Громова Е.А., Селезнев А.А. Многопрофильная производственная сеть в контексте управления цепями поставок // Управленческий учет. 2021. №12. С. 55-61.

8. Щёголева С.А., Белецкий А.А., Савранский С.Б. WMS-система как стратегический инструмент инновационного развития складского хозяйства России // Экономическое возрождение России. 2023. №1(75). С. 163-171.

9. Шитова Т.Ф., Молодецкая С.Ф. Внедрение системы «1С:ERP управление предприятием 2»: проблемы и пути решения // Вопросы управления. 2023. №17 (5(84)). С. 32-48. <https://doi.org/10.22394/2304-3369-2023-5-32-48>

10. Суворова С.Д., Куликова О.М. Формирование устойчивой цепочки поставок // Журнал прикладных исследований. 2022. №2(1). С. 125-129.

11. Голикова Ю. А., Ван Ю. Особенности экономического анализа, рисков и оценки эффективности проектов // Актуальные проблемы менеджмента, экономики и экономической безопасности: сборник материалов IV Международной научной конференции, Костанай, 10–11 ноября 2022 года / Челябинский государственный университет, Костанайский филиал. Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. С. 77-80. EDN TAOPDB.

12. Kornienko A. A. Organizational-economic mechanism of formation of the investment policy engineering companies by using data analysis // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2020. Vol. 10, no. 6-1. P. 94-101. <https://doi.org/10.34670/AR.2020.13.20.011>. EDN WLFFKP.

13. Алексейчик А. Б. Экономический анализ в условиях компьютерной обработки данных: проблемы и направления развития // Актуальные проблемы правовых, экономических и гуманитарных наук: материалы XII Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, магистрантов и студентов: в 3 ч. Минск, 21 апреля 2022 года / редкол.: С.И. Романюк [и др.]. Минск: Учреждение образования "БИП - Университет права и социально-информационных технологий", 2022. Ч. 2. P. 60-62. EDN VQMGAQ.

14. Самойлов А. В., Молчанова С. М. Применение технологий блокчейн в управлении цепочкой поставок продукции // Экономика и управление: проблемы, решения. 2021. Т. 3, № 9(117). С. 44-49. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2021.09.03.008>. EDN BCOALV.

15. Заозерская Л. А. Решение двухкритериальной задачи управления поставками продукции с заданными объемами партий // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем: сборник научных трудов XII Международной школы-симпозиума АМУР-2018, Симферополь-Судак, 14–27 сентября 2018 года / под общей редакцией А. В. Сигала. Симферополь-Судак: ИП Корниенко А.А., 2018. С. 172-177. EDN QRGRRM.

16. Юрченко С. В. Методика управления рисками, связанными с качеством и поставками продукции // Методы менеджмента качества. 2024. № 10. С. 20-25. EDN JVBТAM.

17. Приложение для удаленного взаимодействия с базой данных наблюдений аппеллингов / Н. А. Санников, А. С. Епифанова, А. В. Рыбин, С. А. Епифанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3(146). С. 14-24. EDN VMWYAT.

18. Грубич Т. Ю. Создание экономической модели системы и выявление требований для разработки архитектуры приложения по оценке организационной структуры предприятия // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 4-4. С. 19-22. EDN VWQGTP.

19. Кохно П. А. Направления развития информационно-коммуникационных технологий // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2023. № 5. С. 1-6. <https://doi.org/10.36535/0548-0019-2023-05-1>. EDN OTGINC.

20. Зуев Г. М., Шушунов В. В. Корректировка программ ресурсоосвоения на основе их информационного мониторинга // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2016. № 16(298). С. 30-43. EDN VVGRPT.

References

1. Litvinova I.Y. Supply chain management as a tool for improving the efficiency of companies. *Strategii biznesa = Business Strategies*. 2020; 8(10): 261-264. (In Russ.). <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2020-10-261-264>

2. Lukina G.L., Sadykov A.A., Fayzullin R.V. Optimization models in the SCM-system: progressive supply chain management. *Vestnik universiteta = Vestnik universiteta*. 2023; (8): 116–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-8-116-127>

3. Puzanova I.A., Anikin O.B., Anikin B.A. Development of integrated supply chain planning based on digital technology. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya = Modern Economics: Problems and Solutions*. 2020; (4): 85-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/meps.2020.4/2344>

4. Khairova S. M., Paravyan M. K. Tools for transforming business processes in supply chains in the context of the formation of a digital economy. *Nauka o cheloveke: gumanitarnye issledovaniya = Russian Journal of Social Sciences and Humanities*. 2023; (17): 239-250. (In Russ.). <https://doi.org/10.57015/issni998-5320.2023.i7.2.24>.

5. Antyushin S.M., Naydis O.A. Research of supply chain management strategies. *Organizator proizvodstva = Production Organizer*. 2020; 28(3): 97-107. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.60.21.010>

6. Smirnova E. A., Zuev A. V. Models and methods in supply chain administration. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*. 2022; (2): 95-100. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5537-2022-2-95-100>.

7. Gromova E.A., Seleznev A.A. A multidisciplinary production network in the context of supply chain management. *Upravlencheskii uchet = Management Accounting*. 2021; (12): 55-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.25806/uu12-1202155-61>
8. Shchegoleva S.A., Beletsky A.A., Savransky S.B. WMS as a strategic tool for innovative development of storage facilities in Russia. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii = The Economic Revival of Russia*. 2023; (1): 163-171. (In Russ.)
9. Shitova T. F., Molodetskaya S. F. Implementing the "1C:ERP enterprise management 2" system: problems and solutions. *Voprosy upravleniya = Management Issues*. 2023; (17): 32-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.22394/2304-33692023-5-32-48>
10. Suvorova S.D., Kulikova O.M. Building a sustainable supply chain. *Zhurnal prikladnykh issledovaniy = Journal of Applied Research*. 2022; (2): 125-129. (In Russ.)
11. Golikova Ju. A., Van Ju. Features of economic analysis, risks and evaluation of project effectiveness. In: *Aktual'nye problemy menedzhmenta, jekonomiki i jekonomicheskoy bezopasnosti: sbornik materialov IV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii = Actual problems of management, economics and Economic security: proceedings of the IV International Scientific Conference*. Cheboksary. 2022. P. 77-80. (In Russ.). EDN TAOPDB.
12. Kornienko A. A. Organizational-economic mechanism of formation of the investment policy engineering companies by using data analysis. *Jekonomika: vchera, segodnja, zavtra = Economics: yesterday, today, tomorrow*. 2020; 10(6-1): 94-101. <https://doi.org/10.34670/AR.2020.13.20.011>. EDN WLFFKP.
13. Aleksejchik A. B. Economic analysis in the context of computer data processing: problems and directions of development. In: *Aktual'nye problemy pravovykh, ekonomicheskikh i gumanitarnykh nauk: Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, magistrantov i studentov = Actual problems of Law, Economics and Humanities: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference of Faculty, graduate students, undergraduates and students*. Minsk: Uchrezhdenie obrazovaniya "BIP - Universitet prava i social'no-informacionnykh tehnologij"; 2022. P. 60-62. (In Russ.). EDN VQMGAQ.
14. Samojlov A. V., Molchanova S. M. Application of blockchain technologies in product supply chain management. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya = Economics and management: problems, solutions*. 2021; 3(9): 44-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2021.09.03.008>. EDN BCOALV.
15. Zaozerskaja L. A. Solving a two-criteria problem of managing the supply of products with specified batch volumes. In: *Analiz, modelirovanie, upravlenie, razvitie sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoi shkoly-simpoziuma AMUR-2018 = Analysis, modeling, management, development of socio-economic systems: collection of scientific papers of the XII International School-Symposium AMUR-2018*. Simferopol'-Sudak; 2018. P. 172-177. (In Russ.). EDN QRGRRM.

16. Jurchenko S. V. Methodology of risk management related to the quality and supply of products. *Metody menedzhmenta kachestva = Methods of quality management*. 2024; (10): 20-25. (In Russ.). EDN JBBTAM.

17. Sannikov N. A., Epifanova A. S., Rybin A. V., Epifanov S. A. Application for remote interaction with the database of observations of upwellings. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva = Trudy NSTU named after R.E. Alekseev*. 2024; (3): 14-24. (In Russ.). EDN VMWYAT.

18. Grubich T. Ju. Creation of an economic model of the system and identification of requirements for the development of an application architecture for assessing the organizational structure of an enterprise. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii = Modern trends in the development of science and technology*. 2016; (4-4): 19-22. (In Russ.). EDN VWQGTP.

19. Kohno P. A. Directions of development of information and communication technologies. *Nauchno-tehnicheskaya informatsiya. Seriya 1: Organizatsiya i metodika informatsionnoi raboty = Scientific and technical information. Series 1: Organization and methodology of information work*. 2023; (5): 1-6. (In Russ.). <https://doi.org/10.36535/0548-0019-2023-05-1>. EDN OTGINC.

20. Zuev G. M., Shushunov V. V. Adjustment of resource development programs based on their information monitoring. *Finansovaya analitika: problemy i resheniya = Financial analytics: problems and solutions*. 2016; (16): 30-43. (In Russ.). EDN VVGRPT.

Информация об авторах / Information about the Authors

Емельянов Виталий Александрович, доктор технических наук, профессор, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Vitaly A. Yemelyanov, Dr. of Sci. (Engineering), Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Черный Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, Херсонский технический университет, г. Геническ, Российская Федерация, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Sergey G. Cherny, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Kherson Technical University, Genichesk, Russian Federation, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Емельянова Наталия Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Natalia Y. Yemelyanova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 005.93:639.2(470):519.8

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-173-186>

Концептуальное моделирование процесса распределения квот на вылов водных биологических ресурсов

А. В. Олейникова ¹ ✉

¹ Астраханский государственный технический университет
ул. Татищева, д. 16, г. Астрахань 414056, Российская Федерация

✉ e-mail: a.oleynikova.astu@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является разработка концептуальных основ процесса распределения квот на вылов водных биологических ресурсов (ВБР) в Российской Федерации, с учетом сильных и слабых сторон существующей системы и её ключевых операционных проблем. Кроме того, в работе формализована новая усовершенствованная модель управления процессом квотирования, применение которой позволит повысить эффективность и устранить выявленные ограничения.

Методы. В исследовании используется систематический анализ нормативно-правовой базы и операционных механизмов распределения квот на ВБР, включая «исторический принцип», распределение на основе аукционов и «инвестиционные квоты». Для иллюстрации эффективности системы используются официальные статистические данные о динамике вылова ВБР в различных рыбохозяйственных бассейнах за 2023–2024 гг. В работе также разрабатываются формальные математические модели для описания алгоритмов и ограничений каждого метода распределения, а также для определения концептуальной основы адаптивной системы управления квотами.

Результаты. Анализ показывает, что, хотя существующая система квот на природопользование является сложной и направлена на достижение баланса между экономическими, экологическими и социальными целями, её статичный характер и опора на исторический опыт приводят к ограничениям. В частности, она часто не обеспечивает адекватного стимулирования полного и рационального использования выделенных ресурсов, что приводит к систематическому недоиспользованию квот и упущенной экономической выгоде для государства. Для решения этих проблем в исследовании представлена теоретическая модель усовершенствованного адаптивного процесса управления квотами, которая расширяет существующие штаты и действия, включая интеллектуальную поддержку принятия решений, стремясь к доминированию Парето над существующей системой с точки зрения эффективности.

Заключение. В заключение следует отметить, что, несмотря на значительные достижения и интеграцию цифровых технологий, российская система управления квотированием требует дальнейшей эволюции. Переход от чисто статического распределения к адаптивной модели, способной учитывать обратную связь по использованию ресурсов, имеет решающее значение для повышения общей эксплуатационной и экономической эффективности. В настоящем исследовании подчеркивается критический пробел в существующей литературе, касающийся детального операционного и экономического анализа механизмов распределения, передачи и ценообразования квот, особенно в целях содействия комплексной эксплуатации ресурсов.

Ключевые слова: водные биологические ресурсы; квоты; общий допустимый улов; инвестиционные квоты; промысловая история.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Олейникова А. В. Концептуальное моделирование процесса распределения квот на вылов водных биологических ресурсов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025. Т. 29, №4. С. 173-186. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-173-186>.

Поступила в редакцию 30.09.2025

Подписана в печать 06.11.2025

Опубликована 22.12.2025

Current state of the process of distribution of quotas for the extraction of aquatic biological resources

Alla V. Oleynikova ¹ ✉

¹ Astrakhan State Technical University
16, Tatishcheva str., Astrakhan 414056, Russian Federation

✉ e-mail: a.oleynikova.astu@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of this study is to develop a conceptual framework for allocating quotas for catches of aquatic biological resources (ABR) in the Russian Federation, taking into account the strengths and weaknesses of the existing system and its key operational challenges. Furthermore, the study formalizes a new, improved model for managing the quota allocation process, the application of which will improve efficiency and address the identified limitations.

Methods. The research employs a systematic analysis of regulatory frameworks and operational mechanisms governing ABR quota allocation, including the «historical principle», auction-based distribution, and «investment quotas». It utilizes official statistical data on ABR catch dynamics across various fishery basins (2023-2024) to illustrate the system's performance. The paper also develops formal mathematical models to describe the algorithms and constraints of each allocation method and to define a conceptual framework for an adaptive quota management system.

Results. The analysis reveals that while the current ABR quota system is sophisticated and aims to balance economic, environmental, and social objectives, its inherent static nature and reliance on historical precedence lead to limitations. Specifically, it often fails to adequately incentivize the full and rational utilization of allocated resources, resulting in systematic under-utilization of quotas and missed economic benefits for the state. To address these issues, the study introduces a theoretical model for an advanced, adaptive quota management process, which extends existing states and actions to incorporate intelligent decision-making support, aiming for Pareto dominance over the current system in terms of efficiency.

Conclusion. In conclusion, despite significant advancements and the integration of digital technologies, the Russian ABR management system requires further evolution. Moving beyond purely static allocation towards an adaptive model, capable of incorporating feedback on resource utilization, is crucial for improving overall operational and economic efficiency. This research highlights a critical gap in existing literature concerning the detailed operational and economic analysis of quota distribution, transfer, and pricing mechanisms, particularly in fostering comprehensive resource exploitation.

Keywords: aquatic biological resources; quotas; total allowable catch; investment quotas; fishing history.

Conflict of interest. The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Oleynikova A. V. Current state of the process of distribution of quotas for the extraction of aquatic biological resources. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 173-186 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-173-186>.

Received 30.09.2025

Accepted 06.11.2025

Published 22.12.2025

Введение

Рыбохозяйственный комплекс Российской Федерации имеет стратегическое значение, являясь ключевым сектором экономики и гарантом национальной продовольственной безопасности. Федеральное агентство по рыболовству (Росрыболовство) и его территориальные управления призваны обеспечивать устойчивое управление, охрану и возобновление водных биологических ресурсов (ВБР). Деятельность в данной сфере строго регламентирована Федеральным законом от 20 декабря 2004 г. № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» и сопутствующими нормативно-правовыми актами, которые постоянно актуализируются [1-7].

Утвержденный общий допустимый улов ОДУ делится на различные виды квот: промышленные, прибрежные, для научно-исследовательских и контрольных целей, учебные и культурно-просветительские, для аквакультуры, любительского рыболовства, для традиционного рыболовства коренных малочисленных народов (КМНС), а также квоты в рамках международных договоров.

Распределение промышленных и прибрежных квот осуществляется через три основных метода:

1) «Исторический принцип». Долгосрочное, до 15 лет, закрепление долей квот за пользователями на основе их

предшествующей промысловой истории. Обеспечивает предсказуемость, но критикуется за консервацию структуры отрасли;

2) аукционы проводятся для распределения новых или освободившихся долей квот. Победителем признается участник, предложивший наибольшую цену. Средства поступают в федеральный бюджет;

3) «Квоты под инвестиции». Метод, стимулирующий строительство новых судов на российских верфях и современных рыбоперерабатывающих заводов в РФ. Инвесторы получают дополнительные объемы квот в обмен на реализацию инвестиционных проектов.

Система квотирования Росрыболовства является сложным, динамично развивающимся механизмом, направленным на сбалансирование экономических интересов, сохранение ВБР и решение социальных задач. Ключевые вызовы включают повышение прозрачности, обеспечение равного доступа к ресурсам, стимулирование реальных инвестиций и эффективный контроль освоения квот [8-12, 13-21].

Материалы и методы

Общий объем добычи ВБР всеми российскими пользователями к концу 2024 года достиг 4882,8 тыс. тонн, включая 96,8 тыс. тонн из внутренних водных объектов. Это на 427,0 тыс. тонн (8,0%) ниже, чем в 2023 году (табл. 1).

Таблица 1. Динамика вылова водных биологических ресурсов по рыбохозяйственным бассейнам РФ в 2023-2024 гг.**Table 1.** Dynamics of water biological resources catch in the fisheries of the Russian Federation in 2023-2024

Рыбохозяйственный бассейн / Fishery basin	Год / Year	Общий вылов, тыс. тонн / Total catch, thousand tons	Изменение к предыдущему году (тыс. тонн / %) / Change from the previous year (thousand tons / %)	Основные виды ВБР и их динамика (тыс. тонн, изменение к 2023 г.) / Main types of fishing and their dynamics (thousand tons, change by 2023)	Примечания по году (2023) / Notes on the year (2023)
Дальневосточный	2024	3 696,7	-307,7 / -7,7%	Минтай: 1 942,8 (+36,6) Сельдь тихоокеанская: 450,4 (+54,3) Сардина иваси (ИЭЗ РФ): 553,9 (+16,0) Тихоокеанские лососи: 235,5 (-373,5 / -38,7%)	
	2023	4 001,3	+500,6 / +14,3% (к 2022 г.)	Лососевая путина: 608,8 Сардина иваси: 537,8	75% от общероссийского улова
Северный	2024	441,6	-33,3 / -7,0%	Треска: 222,7 (-54,3) Пикша: 64,4 (-17,3) Мойва: 51,7 (+28,6)	
	2023	474,7	-53,0 / -10,0% (к 2022 г.)		9% от общероссийского улова
Западный	2024	77,2	-1,5 / -1,9%	Шпрот (килька): 40,5 (+0,5) Сельдь балтийская (салака): 24,5 (-1,2)	
	2023	78,6	-3,7% (к 2022 г.)		96,3% от уровня 2022 г.
Азово-Черноморский	2024	35,5	-7,3 / -17,1%	Хамса: 14,1 (стабильно)	
	2023	42,7	-4,6% (к 2022 г.)		95,4% от уровня 2022 г. Снижение из-за метеоусловий и запретных районов.
Волжско-Каспийский	2024	82,2	-11,2 / -12,0%	Килька: 25,2 (-6,6) Частиковые: 22,5 (-3,0)	
	2023	90,8	-1,7% (к 2022 г.)		98,3% от уровня 2022 г. Снижение из-за погодных условий.

Расчет квот на добычу ВБР многоэтапный научно-обоснованный процесс. Выбор метода зависит от типа ВБР, биологии вида, доступности данных и характера промысла. Основные этапы: сбор и анализ исходных данных, таких как промысловая статистика, научные съемки, мониторинг среды; оценка состояния запасов (Stock Assessment) с использованием математических моделей; определение контрольных точек (Target/Limit Reference Points); применение «Правил управления промыслом» (Harvest Control Rules - HCRs); разработка прогноза и рекомендаций по ОДУ; утверждение ОДУ Рыболовством, после согласований; распределение квот.

Как было указано выше, основными методами распределения квот на вылов ВБР являются: исторический метод, метод аукционов и метод инвестиционных квот. В основе каждого лежит общий ОДУ. После определения общего объема для конкретного вида квоты, его нужно распределить между юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями.

Из табл. 1 видно, что динамика вылова по бассейнам нестабильна, а в некоторых случаях можно наблюдать снижение, что может быть связано с неэффективностью существующих методов распределения квот, приводящей к их недоосвоению. Для анализа этих механизмов были формализованы их математические модели.

Метод закрепления квот на основе промысловой истории

Суть метода заключается в закреплении доли от общего объема квоты за пользователями на длительный срок, до 15 лет, пропорционально их средним уловам или уровню освоения квот за предшествующий референтный период. Этот метод является ключевым в текущей российской системе для промышленных и прибрежных квот. Его можно представить следующим образом:

$$Q_{\text{ind}_{i,v,r,y,k_t\text{type}}} = Q_{\text{tot}_{v,r,y,k_t}} \times \frac{(\sum_{\{y_h \in Y_{\text{ref}}\}} \text{CH}_{i,v,r,y_h})}{(\sum_{\{i \in U_{\text{users}}\}} \sum_{\{y_h \in Y_{\text{ref}}\}} \text{CH}_{i,v,r,y_h})}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{tot}_{v,r,y,k_t}}$ – общий объем конкретного вида квоты k_t например, промышленной или прибрежной, для вида ВБР v в районе r на текущий год y , подлежащий распределению между пользователями; U_{users} – множество всех пользователей i , претендующих на получение доли квоты k_t для v, r, y ; Y_{ref} – множество лет, составляющих референтный период, на основе которого рассчитываются доли; CH_{i,v,r,k_t} – исторический улов пользователя $i \in U_{\text{users}}$ по виду ВБР v в районе r в исторический год $y_h \in Y_{\text{ref}}$; $Q_{\text{ind}_{i,v,r,y,k_t}}$ – искомый индивидуальный объем квоты типа k_t .

Если пользователь в течение установленного количества лет подряд осваивает менее определенного процента от выделенной ему квоты (например, менее 70% в течение двух лет подряд)

по конкретному ВБР и району, и при этом не было объективных причин для такого неосвоения (форс-мажор, запреты на промысел), то его право на долю этой квоты может быть принудительно прекращено. Освободившаяся доля затем обычно выставляется на аукцион.

Аукционный метод

Сутью метода является получения права на получение доли квоты на длительный срок или право на вылов определенного объема ВБР на короткий срок через аукционные торги. Победителем становится участник, предложивший наибольшую цену. Таким образом аукцион есть процесс оптимизации и условие определения победителя можно записать в виде:

$$\begin{aligned} & \{Win_l, P_{finl}\} = \\ & = \{\arg\max_{i \in U_{bid}} (B_{il}(t_e)), \max_{\{i \in U_{bid}\}} (B_{il}(t_e)), (2) \\ & \text{при условии } \forall i \in U_{bid}: \text{ConEliAuct}(i) = \text{TRUE}. \text{ Это ограничение гарантирует,} \\ & \text{что абсолютно все участники } i \in U_{bid}, \\ & \text{принимавшие участие в торгах, про-} \\ & \text{шли предварительную проверку и соот-} \\ & \text{ветствуют всем установленным для} \\ & \text{аукциона требованиям } \text{ConEliAuct}; \\ & Win_l \in U_{bidders} - \text{победитель аукциона по} \\ & \text{лоту } l; P_{finl} - \text{финальная цена лота } l; \\ & \arg\max_{\{i \in U_{bid}\}} (B_{il}(t_e)) - \text{участник, сде-} \\ & \text{лавший последнюю наивысшую ставку;} \\ & t_e - \text{время завершения аукциона;} \\ & \max_{\{i \in U_{bid}\}} (B_{il}(t_e)) - \text{наивысшая ставка или} \\ & \text{финальная цена лота.} \end{aligned}$$

Все этапы аукциона, публикация информации, прием заявок, проведение торгов, определение победителя, оформление результатов, должны строго соответствовать утвержденным правилам и регламентам. Это обеспечивает прозрачность и легитимность процесса.

Метод инвестиционных квот

Суть метода заключается в выделении дополнительных объемов квот, которые, выделяются пользователям в обмен на их обязательства по строительству новых рыбопромысловых судов на российских верфях или современных рыбоперерабатывающих заводов. При его применении происходит ранжирование проектов на основе их интегральной оценки и также как и аукционный, этот метод представляет собой процесс отбора и оптимизации. Результат применения данного метода можно представить в виде множества отобранных проектов, которым будут выделены квоты:

$$\begin{aligned} & \text{SelectedProjects} = \\ & = \arg\max_{P_{subset} \subseteq U_{investors}} \left(\sum_{j \in P_{subset}} \text{Score}_j \right), (3) \\ & \text{при } \sum_{j \in P_{subset}} \text{RequestQuota}_j \leq Q_{totalInvest} \text{ и} \\ & \forall j \in P_{subset}: \text{Score}_j \geq \text{Score}_{minTresh}, \\ & \text{где } \text{Score}_j = \sum_{cr \in Cr_{select}} (W_{cr} * f_{eval_{cr}}(\text{Proj}_j, cr)) \\ & - \text{максимальная сумма баллов; } cr - \text{кри-} \\ & \text{терий оценки проекта; } f_{eval_{cr}} - \text{функция} \\ & \text{оценки критерия; } W_{cr} - \text{весовой коэф-} \\ & \text{фициент критерия; } \text{Proj}_j - \text{инвестицион-} \\ & \text{ный проект. Иными словами, множество} \\ & \text{победивших проектов } \text{SelectedProjects} - \end{aligned}$$

это такое подмножество P_{subset} из всех поданных заявок $U_{\text{investors}}$, которое дает максимально возможную сумму баллов Score_j .

Не для всех видов ВБР и районов могут предоставляться инвестиционные квоты. Обычно это касается наиболее ценных и востребованных ресурсов.

Перечисленные методы составляют основу существующей системы квотирования, имеющей свои сильные и слабые стороны. Так преимущество существующей системы безусловно обеспечивает её научная обоснованность ОДУ и долгосрочность закрепленных долей распределяемых квот, позволяя заготовителям ВБР планировать обновление своих мощностей в долгосрочной перспективе для более качественного освоения выделяемых объемов лова. Вместе с тем происходит некая консервация отрасли одним из ведущих методов. Квоты, полученные по историческому принципу, это долгосрочные разрешения на вылов ВБР и в случае недобросовестного их освоения поступления сырья может задерживаться. Так же необходимо отметить и высокий уровень финансовых рисков для заготовителей, взявших квоты под инвестиции. Сложно предсказать, покроют ли их затраты на модернизацию флота результаты освоения инвестиционных квот. К недостаткам так же можно отнести бюрократизацию процесса получения разрешений, проблемы с достоверностью промысловых данных, недостаточный учет социальных аспектов, сохранение

несообщаемого и нерегулируемого промысла (ННН), «остаточный принцип» для квот КМНС.

Результаты и их обсуждение

Проведенный анализ наиболее применяемых методов распределения квот показывает, что процесс квотирования ВБР является составляющей сложной организационной системы, эффективность которой ограничена недостаточной адаптивностью процесса распределения квот к операционной деятельности пользователей, в частности, к проблеме систематического недоосвоения выделенных лимитов. Это приводит к снижению общей эффективности использования ресурсного потенциала и упущенной экономической выгоде для государства. Существующие подходы к распределению квот («исторический принцип», аукционы) не содержат явных механизмов, стимулирующих полное и рациональное освоение ресурсов и учитывающих историю такого освоения при принятии дальнейших управленческих решений.

Для решения выявленных ограничений указанных методов и повышения эффективности управления в данной организационной системе необходимо перейти от статических методов распределения к адаптивным, основанным на обратной связи. Задача дальнейших исследований заключается в разработке и анализе усовершенствованной модели процесса управления квотированием $\text{Proc}'_{\text{Квот}}$, которая бы решала указанные проблемы за счет введения новых методов и алгорит-

мов интеллектуальной поддержки принятия решений. Формально, это означает переход от исходной модели процесса $\text{Proc}_{\text{КВОТ}}$ к новой модели $\text{Proc}'_{\text{КВОТ}}$, в которой модифицированы множества состояний S' и переходов T и расширено множество действий Act' .

Пусть исходная теоретико-множественная модель процесса управления квотированием:

$$\text{Proc}_{\text{КВОТ}} = (S, T, s_0, S_F, \text{Ag}, \text{Act}, \text{Env}), \quad (4)$$

где S – множество состояний; $T \subseteq S \times (\text{Ag} \times \text{Act} \cup \text{Env}) \times S$ – множество переходов; s_0 – начальное состояние; S_F – множество финальных состояний; Ag – множество агентов; Act – множество действий; Env – множество внешних событий.

Задача дальнейших исследований заключается в синтезе и анализе усовершенствованной модели процесса управления $\text{Proc}'_{\text{КВОТ}}$:

$$\text{Proc}'_{\text{КВОТ}} = (S', T', s_0, S'_F, \text{Ag}, \text{Act}', \text{Env}), \quad (5)$$

где $S' = S \cup S_{\text{new}}$ – множество состояний S' является расширением исходного множества S за счет новых возможных состояний S_{new} , возникающих в результате применения новых действий. Состояния $s' \in S'$ описываются на основе расширенной онтологии O' , которая включает новые концепты и свойства;

$\text{Act}' = \text{Act} \cup \text{Act}_{\text{new}}$ – множество действий Act' является расширением исходного множества Act за счет нового множества управляющих действий Act_{new} ;

$T' = T_{\text{modified}} \cup T_{\text{new}}$ – множество переходов T . T_{modified} – модифицированное подмножество исходных переходов $t \in T$, для которых изменяются предусловия $\text{Pre}(\text{act}_k)$ и/или постусловия $\text{Post}(\text{act}_k)$ для учета новых состояний и правил.

$$\forall t' = (s'_i, \text{act}_k, s'_j) \in T_{\text{modified}}, \quad (6)$$

где $\text{act}_k \in \text{Act}$ – управляющее действие из множества действий.

$$\text{Pre}'(\text{act}_k) = \text{Pre}(\text{act}_k) \wedge C_{\text{newPre}(s'_i)}, \quad (7)$$

$$\text{Post}'(\text{act}_k) = \text{Post}(\text{act}_k) \cup \Delta_{\text{newPost}(s'_i, s'_j)}, \quad (8)$$

где C_{newPre} и Δ_{newPost} – это новые условия и изменения, вносимые разрабатываемым методом; T_{new} – новое множество переходов, соответствующих новым действиям из Act_{new} .

$$\forall t_{\text{new}} = (s'_i, \text{act}_{\text{new}_k}, s'_j) \in T_{\text{new}}, \quad (9)$$

где $\text{act}_{\text{new}_k} \in \text{Act}_{\text{new}}$ – новое управляющее действие из множества новых действий.

$S'_F \subseteq S'$ – новое множество финальных состояний, которое может совпадать с S_F или быть расширено.

При этом синтезированная модель $\text{Proc}'_{\text{КВОТ}}$ должна быть более эффективной по сравнению с исходной моделью $\text{Proc}_{\text{КВОТ}}$, что формально определяется через отношение доминирования по Парето.

Пусть Eff является векторной функцией, которая при симуляции процесса Proc на определенном наборе данных DataScn возвращает вектор E значений критериев эффективности:

$$E = \text{Eff}(\text{Proc}, \text{DataScn}) = \langle E_1, E_2, \dots, E_m \rangle,$$

где m – общее количество критериев эффективности.

Определим вектор показателей эффективности для усовершенствованной модели $\text{Proc}'_{\text{КВОТ}}$ как:

$$E' = \text{Eff}(\text{Proc}'_{\text{КВОТ}}, \text{DataScen}) = \\ = \langle E'_1, E'_2, \dots, E'_m \rangle$$

И для исходной модели $\text{Proc}_{\text{КВОТ}}$ как:

$$E = \text{Eff}(\text{Proc}_{\text{КВОТ}}, \text{DataScen}) = \\ = \langle E_1, E_2, \dots, E_m \rangle.$$

Усовершенствованная модель $\text{Proc}'_{\text{КВОТ}}$ считается строго более эффективной, если ее вектор показателей эффективности E' доминирует по Парето над вектором E :

$$E' \succ E. \quad (10)$$

Отношение доминирования по Парето $E' \succ E$ истинно тогда и только тогда, когда одновременно выполняются два следующих логических условия:

1. Условие нестрогого превосходства (неухудшение ни по одному критерию):

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, m\}: E'_k \geq E_k,$$

для каждого критерия k от 1 до m , значение показателя эффективности E'_k для усовершенствованной модели больше или равно значению показателя E_k для исходной модели.

2. Условие строгого превосходства (улучшение хотя бы по одному критерию):

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, m\}: E'_j > E_j,$$

существует хотя бы один критерий j от 1 до m , значение показателя эффективности E'_j для усовершенствованной модели строго больше значения показателя E_j для исходной модели.

Выводы

Система управления ВБР в Российской Федерации эволюционировала от административно-распределительной модели к современной, основанной преимущественно на «историческом принципе» долгосрочного закрепления долей квот, дополненной механизмом «инвестиционных квот». Активно внедряются цифровые технологии для повышения прозрачности и эффективности управления. Определение ОДУ базируется на научном подходе, реализуемом Всероссийским научно-исследовательским институтом рыбного хозяйства и океанографии, включая сбор данных, оценку запасов с использованием математических моделей, разработку прогнозов, общественные обсуждения и утверждение регулируемыми органами. Распределение ОДУ на различные виды квот осуществляется через «исторический принцип», аукционы и «квоты под инвестиции», завершаясь формальным закреплением прав пользователей и последующим контролем.

Несмотря на прогресс, анализ выявляет системные проблемы: «исторический принцип» может ограничивать конкуренцию; ННН-промысел остается вызовом; практика селективной добычи и выброса прилова негативно влияет на экосистемы. Важным пробелом в научной литературе является недостаточная проработка операционных аспектов и экономической эффективности механизма квотирования, особенно моделей распределения, передачи прав и ценообразования на аукционах.

Список литературы

1. Концепция перехода прикаспийских субъектов РФ к «зеленой» экономике: доктрина, законодательство, практика / А. П. Анисимов, Е. А. Бабайцева, Л. Д. Буринова [и др.]. Элиста: Калмыцкий государственный университет им. Б. Б. Городовикова, 2023. 206 с. EDN TNWLQH.
2. Богданов А. С., Зенин А. В. Развитие конкуренции в сфере добычи (вылова) водных биологических ресурсов // Новые юридические исследования: сборник статей III Международной научно-практической конференции (Пенза, 15 ноября 2020 г.). Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 76-79. EDN PUJFTA.
3. Будникова Ю. Е. Правовые проблемы в системе квотирования добычи (вылова) водных биоресурсов для целей предпринимательского рыболовства // Евразийский юридический журнал. 2018. № 9(124). С. 164-167. EDN ZACDET.
4. Быков М. А., Рагулина И. Р. Экологические проблемы ведения промысла в Северо-Восточной Атлантике // Вестник молодежной науки. 2019. № 4(21). С. 16. EDN VKXAAC.
5. Васильев Э. А. Криминологический анализ детерминант, связанных с нарушением квотирования на добычу водных биоресурсов в РФ // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2022. № 8(147). С. 95-98. EDN EGDVCF.
6. Волошин Г. А., Артеменков Д. В. О регулировании промысла с учётом его эффективности на примере минтая в северной части Охотского моря // Труды ВНИРО. 2022. Т. 189. С. 247-256. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-247-256>. EDN WJVCIJ.
7. Нефедова Е. В. Квотирование в российском праве: интеллектуально-аналитический аспект определения потребности и пределов // Юридическая техника. 2024. № 18. С. 658-660. EDN APIEKB.
8. Алексахина Л. В. Современные организационные формы регионального рыбохозяйственного морепользования // Рыбохозяйственный комплекс Крыма: проблемы и решения: материалы II Региональной научно-практической конференции (Керчь, 20 апреля 2017 г.). Керчь: Керченский государственный морской технологический университет, 2017. С. 4-10. EDN YLYQMX.
9. Захарова М. А. О досрочном расторжении договора о закреплении долей квот добычи (вылова) водных биологических ресурсов по инициативе уполномоченного органа // Правовое регулирование общества: актуальные проблемы и перспективные направления: сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции (Москва, 30 октября 2017 г.). М.: Научно-издательский центр «Открытое знание», 2017. С. 21-29. EDN ZUUTRN.
10. Карпушин И. С., Бойко В. В. Технические проблемы освоения морских биологических ресурсов // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мировой

вого океана: материалы VIII Международной научно-технической конференции (Владивосток, 23–24 мая 2024 г.). Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2024. С. 283-287. EDN IONVWY.

11. Крохалевский В. Р., Матковский А. К. Проблемы управления промыслом с помощью общего допустимого улова и квот вылова в водоемах Сибири // Вопросы рыболовства. 2015. Т. 16, № 4. С. 506-522. EDN UXVWSF.

12. Мельников П. А. Анализ законодательной базы, устанавливающей правовые и организационные основы регулирования рыболовства на территории РФ // Научно-практические вопросы регулирования рыболовства: материалы национальной научно-технической конференции (Владивосток, 22–23 мая 2019 г.). Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2019. С. 131-134. EDN LXFQZV.

13. Олейникова А. В., Олейников А. А. Усовершенствование системы квотирования вылова водных биологических ресурсов на основе онтологической модели // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2023. № 3(98). С. 40-55. EDN NKTZQH.

14. Переварюха А. Ю. Моделирование экспертно управляемой эксплуатации запасов субпопуляционных групп при агрессивных инвазиях // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов (Москва, 17–20 июня 2024 г.). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 3558-3562. EDN GNSOVZ.

15. Влияние механизма инвестиционных квот по крабам и водным биологическим ресурсам на развитие рыбной отрасли / И. Н. Рыкова, С. В. Шкодинский, В. А. Морина [и др.]. М.: Научно-исследовательский финансовый институт Министерства финансов Российской Федерации, 2022. 81 с. EDN CFJDTV.

16. Сиваков Д. О. Правовой институт инвестиционных квот в области рыболовства // Журнал российского права. 2019. № 10. С. 136-144. <https://doi.org/10.12737/jrl.2019.10.11>. EDN NNWLUN.

17. Состояние и тенденции рыбохозяйственной деятельности в Северном бассейне: проблемы и перспективы / В. Е. Храпов, А. М. Васильев, Т. В. Турчанинова, С. С. Вопиловский. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2024. 193 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.506.5>. EDN QMABPU.

18. Стаценко В. Г. Экономические эффекты реализации специального механизма инвестиционных квот в рыболовстве РФ: метод разности разностей // Новая экономика, бизнес и общество: материалы XI апрельской научно-практической конференции молодых исследователей (Владивосток, 15–26 апреля 2024 г.). Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2024. С. 1054-1058. EDN LYZUAV.

19. Харин А. Г. Экономическая оценка устойчивости рыболовства в Балтийском море // Балтийский экономический журнал. 2024. № 3(47). С. 116-134. <https://doi.org/10.46845/2073-3364-2024-0-3-116-134>. EDN QSYOIE.

20. Черданцев В. П., Щеткин Б. Н. Насыщение рынка рыбной продукции - часть государственной политики в решении проблем продовольственной безопасности // Электронное сетевое издание «Международный правовой курьер». 2023. № S4. С. 47-51. EDN UQQSRM.

21. Яркина Н. Н., Логунова Н. А. Концептуальные основы стратегического развития рыбного хозяйства Российской Федерации // Вопросы рыболовства. 2021. Т. 22, № 2. С. 123-135. <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2021-22-2-123-135>. EDN MWZIIL.

References

1. Anisimov A. P., Babaytseva E. A., Burinova L. D., et al. The concept of the transition of the Caspian subjects of the Russian Federation to a «green» economy: doctrine, legislation, practice. Elista: Kalmyczkij gosudarstvenny`j universitet im. B. B. Gorodovikova; 2023. 206 p. (In Russ.). EDN TNWLQH.

2. Bogdanov A. S., Zenin A. V. Development of competition in the field of extraction (catch) of aquatic biological resources. In: *NOVY`E YuRIDICHESKIE ISSLEDOVANIYa : sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = NEW LEGAL RESEARCH : Collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference*. Penza: Nauka i Prosveshhenie; 2020. P. 76-79 (In Russ.). EDN PUJFTA.

3. Budnikova Yu. E. Legal problems in the system of quota setting for the extraction (catch) of aquatic biological resources for commercial fishing purposes. *Evrazijskij yuridicheskij zhurnal = Eurasian Legal Journal*. 2018; (9): 164-167 (In Russ.). EDN ZACDET

4. Bykov M. A., Ragulina I. R. Ecological problems of fishing in the North-East Atlantic. *Vestnik molodezhnoj nauki = Bulletin of Youth Science*. 2019; (4): 16 (In Russ.). EDN VKXAAC

5. Vasiliev E. A. Criminological analysis of determinants associated with violations of quotas for the extraction of aquatic biological resources in the Russian Federation. *Nauka i obrazovanie: xozyajstvo i ekonomika; predprinimatelstvo; pravo i upravlenie = Science and Education: Economy and Economics; Entrepreneurship; Law and Management*. 2022; (8): 95-98 (In Russ.).

6. Voloshin G. A., Artemenkov D. V. On the regulation of fishing, taking into account its effectiveness, using the example of pollock in the northern part of the Sea of Okhotsk. *Trudy` VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2022; 189: 247-256. (In Russ.). <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-247-256>. EDN WJVCIJ.

7. Nefedova E. V. Quota setting in Russian law: intellectual and analytical aspect of determining needs and limits. *Yuridicheskaya tekhnika = Legal Technique*. 2024; (18): 658-660 (In Russ.). EDN APIEKB.

8. Alekhina L. V. Modern organizational forms of regional fisheries sea use. In: *Ryboxozyajstvennyj kompleks Kryma: problemy i resheniya: Materialy II Regionalnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Fisheries complex of Crimea: problems and solutions: Materials of the II Regional Scientific and Practical Conference*. Kerch: Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet; 2017. P. 4-10 (In Russ.).

8. Alekhina L. V. Modern organizational forms of regional fisheries sea use. In: *Ryboxozyajstvennyj kompleks Kryma: problemy i resheniya: Materialy II Regionalnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Fisheries complex of Crimea: problems and solutions: Materials of the II Regional Scientific and Practical Conference*. Kerch: Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet; 2017. P. 4-10 (In Russ.).

9. Zakharova M. A. On early termination of the agreement on securing shares of quotas for the extraction (catch) of aquatic biological resources at the initiative of the authorized body. In: *Pravovoe regulirovanie obshchestva: aktualnye problemy i perspektivnye napravleniya: Sbornik nauchnykh trudov po materialam I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Legal regulation of society: current problems and promising directions. Collection of scientific papers based on the materials of the I International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2017. P. 21-29 (In Russ.). EDN ZUUTRN.

10. Karpushin I. S., Boyko V. V. Technical problems of marine biological resource development. In: *Aktualnye problemy osvoeniya biologicheskix resursov Mirovogo okeana : Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Actual problems of the development of biological resources of the World Ocean: Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference*, Vladivostok: Dalnevostochnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij ryboxozyajstvennyj universitet; 2024. P. 283-287 (In Russ.). EDN IONVWY.

11. Krokhaevsky V. R., Matkovsky A. K. Problems of fisheries management using total allowable catch and catch quotas in Siberian waters. *Voprosy rybolovstva = Fisheries Issues*. 2015; 16(4): 506-522 (In Russ.). EDN UXVWSF.

12. Melnikov P. A. Analysis of the legislative framework establishing the legal and organizational bases for regulating fisheries in the Russian Federation. In: *Nauchno-prakticheskie voprosy regulirovaniya rybolovstva: Materialy nacionalnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Scientific and practical issues of fisheries regulation: Materials of the national scientific and technical conference*. Vladivostok: Dalnevostochnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij ryboxozyajstvennyj universitet; 2019. P. 131-134 (In Russ.). EDN LXFQZV.

13. Oleynikova A. V., Oleynikov A. A. Improvement of the system for quota setting for the catch of aquatic biological resources based on an ontological model. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Saratov State Technical University*. 2023; (3): 40-55 (In Russ.). EDN NKTZQH.

14. Perevaryukha A. Yu. Modeling of expertly managed exploitation of subpopulation group stocks during aggressive invasions. In: XIV *Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravleniya: sbornik nauchny`x trudov* = XIV All-Russian Meeting on Management Problems: Collection of scientific papers. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN; 2024. P. 3558-3562 (In Russ.). EDN GNSOVZ.
15. Rykova I. N., Shkodinsky S. V., Morina V. A., et al. The influence of the mechanism of investment quotas for crabs and aquatic biological resources on the development of the fishing industry. Moscow: *Nauchno-issledovatel'skij finansovyj institut Ministerstva finansov Rossijskoj Federacii*; 2022. 81 p. (In Russ.). EDN CFJDTV.
16. Sivakov D. O. Legal institution of investment quotas in the field of fisheries. *Zhurnal rossijskogo prava* = *Journal of Russian Law*. 2019; (10): 136-144. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/jrl.2019.10.11>.
17. Khrapov V. E., Vasiliev A. M., Turchaninova T. V., Vopilovsky S. S. State and trends of fisheries activities in the Northern Basin: problems and prospects. Apatity: Kolskij nauchnyj centr RAN; 2024. 193 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.506.5>.
18. Statsenko V. G. Economic effects of implementing a special mechanism of investment quotas in Russian fisheries: difference-in-differences method. In: *Novaya ekonomika, biznes i obshchestvo: Materialy XI aprejskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyx issledovatelej*. = *New Economy, Business and Society: Materials of the XI April Scientific and Practical Conference of Young Researchers*. Vladivostok: Dalnevostochnyj federalnyj universitet; 2024. P. 1054-1058 (In Russ.). EDN LYZUAV.
19. Kharin A. G. Economic assessment of fisheries sustainability in the Baltic Sea. *Baltijskij ekonomicheskij zhurnal* = *Baltic Economic Journal*. 2024; (3): 116-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.46845/2073-3364-2024-0-3-116-134>.
20. Cherdantsev V. P., Shchetkin B. N. Saturation of the fish product market as part of state policy in solving food security problems. *Elektronnoe setevoe izdanie «Mezhdunarodnyj pravovoj kuryer»* = *Electronic network publication «International Legal Courier»*. 2023; (S4): 47-51 (In Russ.). EDN UQQSRM.
21. Yarkina N. N., Logunova N. A. Conceptual foundations for the strategic development of the fisheries sector of the Russian Federation. *Voprosy rybolovstva* = *Fisheries Issues*. 2021; 22(2): 123-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2021-22-2-123-135>

Информация об авторе / Information about the Author

Олейникова Алла Владимировна,
аспирант кафедры прикладной информатики,
Астраханский государственный технический
университет, г. Астрахань, Российская Федерация,
e-mail: a.oleynikova.astu@mail.ru

Alla V. Oleynikova, Post-Graduate Student
of Applied Informatics Department,
Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation,
a.oleynikova.astu@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 519.85

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-187-203>

Алгоритм автоматического подсчета рыб на изображении и слежения за их движением на основе нейронной модели YOLOv9t

В.Н. Ле ¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: lenghia18071999@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Традиционные методы, основанные на визуальном наблюдении и ручном подсчете, не только обладают очевидными ограничениями с точки зрения затрат времени и людских ресурсов, но и дают недостаточно точные результаты из-за субъективного человеческого фактора в процессе работы. Эти погрешности, даже незначительные, могут привести к ошибочным управленческим решениям, что негативно сказывается на эффективности производства в аквакультуре.

Методы. С целью устранения указанных недостатков в данной статье представлено автоматизированное решение, использующее нейронную модель YOLOv9t для задачи обнаружения и подсчета рыбы на изображениях, выполненных под водой. Благодаря оптимизированной архитектуре нейронной модели YOLOv9t, включающей всего 2 млн параметров, продемонстрированы высокие результаты определения рыб на изображениях из набора данных DeepFish: Точность - 0.928, Полнота - 0.91, mAP50 - 0.961 и mAP50-95 - 0.584. Метод Non-Maximum Suppression использован для устранения дублирующихся случаев обнаружения рыб на одной области, а применение алгоритма DeepSORT позволило непрерывно отслеживать каждую особь на последовательности кадров в видеозаписи с помощью уникальных идентификаторов.

Результаты исследования подтвердили, что нейронная модель YOLOv9t пригодна для создания автоматизированных систем видеоаналитики в рыбоводстве для мониторинга за поведением рыб и управления активационными устройствами. Это позволяет перевести ключевые процессы контроля на полностью автоматизированную основу, оптимизируя использование ресурсов. Предложенная архитектура обеспечила высокую точность и надежность в различных условиях среды - от прозрачной до мутной воды, открывая перспективы для применения на производстве в реальных условиях эксплуатации.

Заключение. Такая стабильность работы делает систему готовой для внедрения в промышленных масштабах с целью повышения эффективности управления хозяйством.

Ключевые слова: YOLO; искусственный интеллект; аквакультура; машинное обучение; нейронная сеть.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Ле В.Н. Алгоритм автоматического подсчета рыб на изображении и слежения за их движением на основе нейронной модели YOLOv9t // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 187-203. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-187-203>.

Поступила в редакцию 11.09.2025

Подписана в печать 27.10.2025

Опубликована 22.12.2025

© Ле В.Н., 2025

Algorithm for automatic counting of fish in an image and tracking their movement based on the YOLOv9t neural model

Le Van Nghia¹ ✉

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
14th Line V.O., 39, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: lenghia18071999@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Traditional methods based on visual observation and manual counting not only have obvious limitations in terms of time and human resource costs but also yield insufficiently accurate results due to the subjective human factor involved in the process. These inaccuracies, even minor ones, can lead to erroneous management decisions, which negatively impact production efficiency in aquaculture.

Methods. To eliminate these shortcomings, this paper presents an automated solution that utilizes the YOLOv9t neural network model for the task of detecting and counting fish in underwater images. Thanks to the optimized architecture of the YOLOv9t neural model, which contains only 2 million parameters, it demonstrated high performance in identifying fish in images from the DeepFish dataset, with the following evaluation metrics: Precision - 0.928, Recall - 0.91, mAP50 - 0.961, and mAP50-95 - 0.584. The Non-Maximum Suppression method was used to eliminate duplicate detections of fish in the same area, while the application of the DeepSORT algorithm enabled the continuous tracking of each individual across video frame sequences by assigning unique identifiers.

Results. The research results confirmed that the YOLOv9t neural model is suitable for creating automated video analytics systems in aquaculture for monitoring fish behavior and managing activation devices. This enables the transition of key control processes to a fully automated basis, thereby optimizing resource utilization. The proposed architecture provided high accuracy and reliability across various environmental conditions—from clear to murky water—opening prospects for application in real-world production environments.

Conclusion. This operational stability makes the system ready for industrial-scale implementation with the aim of enhancing farm management efficiency.

Keywords: YOLO, artificial intelligence, aquaculture, machine learning, neural network.

Conflict of interest. The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Le V.N. Algorithm for automatic counting of fish in an image and tracking their movement based on the YOLOv9t neural model. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 187-203 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-187-203>.

Received 11.09.2025

Accepted 27.10.2025

Published 22.12.2025

Введение

Одной из самых серьезных проблем, с которыми сталкиваются владельцы рыбных хозяйств, является точное определение плотности рыбы, отслеживание уровня потерь и прогнозирование

объема вылова. Традиционные методы, такие как ручной подсчет, не только требуют значительных затрат времени и рабочей силы, но и подвержены большим погрешностям, вызывают стресс у рыб [1], а главное – приводят к неточ-

ным управленческим решениям в вопросах кормления, профилактики заболеваний и планирования сбора урожая.

Прогресс в области робототехники [2-3], Интернета вещей (IoT) [4], искусственного интеллекта (AI) [5-7], и особенно компьютерного зрения [8-10], открывает новую эпоху индустриальной аквакультуры [11-12]. В этом контексте глубокие нейронные сети позволяют реализовать автоматический, непрерывный и высокоточный мониторинг поведения рыб и отдельных особей. Среди них особенно выделяется семейство нейронных моделей YOLO (You Only Look Once) – архитектура для обнаружения объектов в реальном времени, отличающаяся высокой скоростью и точностью [13]. Способность модели обрабатывать видеопотоки, поступающие напрямую с камер, установленных в рыбноводных садках, с целью распознавания и подсчета каждой особи в реальном времени делает модель YOLO идеальным решением, способным революционизировать процесс управления рыбными фермами [14-15]. Однако успешное внедрение модели YOLO в условиях промышленного рыбноводства требует специализированного процесса ее обучения и подготовки представительного корпуса данных. Кроме того, необходимо адаптировать ее к специфическим особенностям среды, таким как: высокая мутность воды, высокая плотность рыбы, вызывающая взаимное перекрытие особей, разнообразие размеров и видов рыб в одной системе, а также из-

менения освещенности в течение суток [16]. Это, в свою очередь, требует качественного набора изображений, тщательно размеченного на основе данных реальных ферм, а также применения методов аугментации данных и тонкой настройки модели.

Исходя из указанных практических требований, данное исследование было направлено на разработку и обучение оптимизированной модели YOLO, адаптированной для условий промышленного рыбноводства при подсчете рыбы. В статье подробно рассматриваются алгоритм обучения модели и результаты экспериментов, включая показатели точности и полноты обнаружения. В разделе 1 представлена методика и алгоритм обучения модели YOLO, а также алгоритм подсчета рыбы. В разделе 2 описаны эксперименты и оценка результатов на модели YOLOv9t.

Материалы и методы

YOLO – это модель глубокой нейронной сети, разработанная для решения задачи распознавания объектов на изображениях и в видео. Особенностью YOLO по сравнению с другими моделями является способность быстро и точно определять объекты, одновременно предоставляя информацию об их расположении и типе на изображении.

YOLO использует глубокую нейронную сеть, состоящую из множества слоев, включая сверточные слои (CNN) [17], которые извлекают признаки из изображения.

Модель делит входное изображение на небольшие сетки (grid cells), каждая из которых предсказывает параметры, связанные с возможным присутствием объекта в этой области, включая:

- Положение объекта (координаты углов ограничивающего прямоугольника - bounding box).
- Вероятность наличия объекта (связанную с вероятностью присутствия, например, рыбы).
- Класс объекта (например, рыба или другие животные).

Благодаря этому YOLO может распознавать и классифицировать несколько объектов на одном изображении или в видео без необходимости выполнять множество отдельных проходов, как это делают традиционные модели.

Для повышения точности и скорости были разработаны усовершенствованные версии YOLO, последняя из которых - YOLOv12 [18]. Каждая версия содержит значительные улучшения в точности распознавания объектов и скорости обработки, особенно в условиях видеоанализа.

Алгоритм обучения модели YOLO для подсчета рыб

Процесс обучения модели нейронной модели YOLO, предназначенной для решения задач обнаружения и подсчета рыб на изображениях или видеопоследовательностях, представлен на рис. 1. На первом этапе проводится сбор изображений, после чего созданный корпус разделяется на три незави-

симые части, используемые для различных этапов разработки модели глубокого обучения. В частности, 80 % изображений формируют обучающую выборку, предназначенную для оптимизации весовых коэффициентов нейронной сети; 10 % данных составляют валидационную выборку, служащую для контроля и оценки производительности модели в процессе обучения, а также для настройки гиперпараметров и выявления признаков переобучения; оставшиеся 10 % образуют тестовую выборку, применяемую для оценки способности модели к обобщению на новых, ранее не встречавшихся данных.

Все изображения после аннотирования масштабируются до стандартизированного разрешения 640×640 пикселей. Данный размер является оптимальным и широко используется в современных архитектурах сверточных нейронных сетей, применяемых для решения задач обнаружения объектов (object detection), включая модель YOLO. Выбор такого разрешения обеспечивает сохранение достаточного количества визуальных признаков при умеренных вычислительных затратах, что особенно важно при обучении на графических процессорах со средней производительностью.

Перед подачей в сеть все изображения проходят нормализацию интенсивностей пикселей в диапазоне $[-1, 1]$ посредством линейного преобразования исходных значений, находящихся в диапазоне $[0, 255]$. Этот этап способствует стабилизации процесса распространения

сигналов по слоям сети, ускоряет сходимость оптимизационного процесса и снижает дисперсию входных данных между мини-пакетами изображений.

Следующим шагом является аугментация данных [19], направленная на повышение разнообразия обучающей выборки. В рамках данного этапа применяются различные методы преобразования изображений, такие как поворот, зеркальное отражение, изменение яркости и контрастности, масштабирование и трансляция. Использование этих приемов позволяет модели повысить устойчивость к вариациям визуальных условий, улучшить способность к обобщению, снизить риск переобучения и, как следствие, увеличить точность распознавания и подсчета рыб в реальных условиях эксплуатации.

После тщательной подготовки данных алгоритм переходит к этапу инициализации числа эпох и размера пакета изображений. Число эпох изначально устанавливается равным 1, что соответствует одному полному проходу модели по всему обучающему набору данных. Размер пакета (количество образцов, подаваемых в модель за одну итерацию вычислений) также инициализируется, начиная с 1. После инициализации первый пакет данных подается на вход нейронной сети, и модель выполняет расчет параметров на основе этих данных.

Далее модель осуществляет обнаружение рыб на входных изображениях. Этот этап является ключевым в процессе обучения, так как модель должна определить положение рыб на каждом

изображении, что позволяет вычислить соответствующие значения, такие как вероятность присутствия рыбы в данной области. После выполнения детекции модель вычисляет общую функцию ошибки путем сравнения предсказанных результатов с истинными значениями из обучающего набора данных. Полученная ошибка используется для обновления параметров сети.

Процесс обучения продолжается с использованием алгоритма оптимизации AdamW [20]. AdamW является эффективным методом оптимизации, который позволяет модели корректировать свои параметры таким образом, чтобы функция ошибки снижалась быстрее. AdamW представляет собой усовершенствованную версию алгоритма Adam, включающую регулярное обновление весов для уменьшения переобучения и улучшения способности модели к обобщению. После этапа оптимизации параметров алгоритм вычисляет градиенты функции ошибки и обновляет параметры нейронной сети.

После каждой итерации обучения алгоритм проверяет ряд условий для принятия решения о продолжении процесса обучения. Сначала проверяется количество обработанных пакетов изображений: если оно меньше 64, обучение продолжается; если количество пакетов достигло M , алгоритм переходит к следующему этапу. Затем, если значение потерь e уменьшается по истечении каждых 5 эпох, процесс обучения продолжается [21]. Обучение длится до достижения максимального количества

эпох. В противном случае, если значение потерь e не уменьшается через 5 эпох, алгоритм переходит к этапу сохранения лучшей модели и завершает свою работу.

Когда количество эпох достигает N , алгоритм завершает обучение и выполняет проверку результатов. Если сни-

жение функции ошибки соответствует заданным требованиям, модель сохраняется. Сохранение модели является критически важным этапом, поскольку после завершения обучения модель используется для обнаружения рыб на новых изображениях или видео без необходимости повторного обучения.

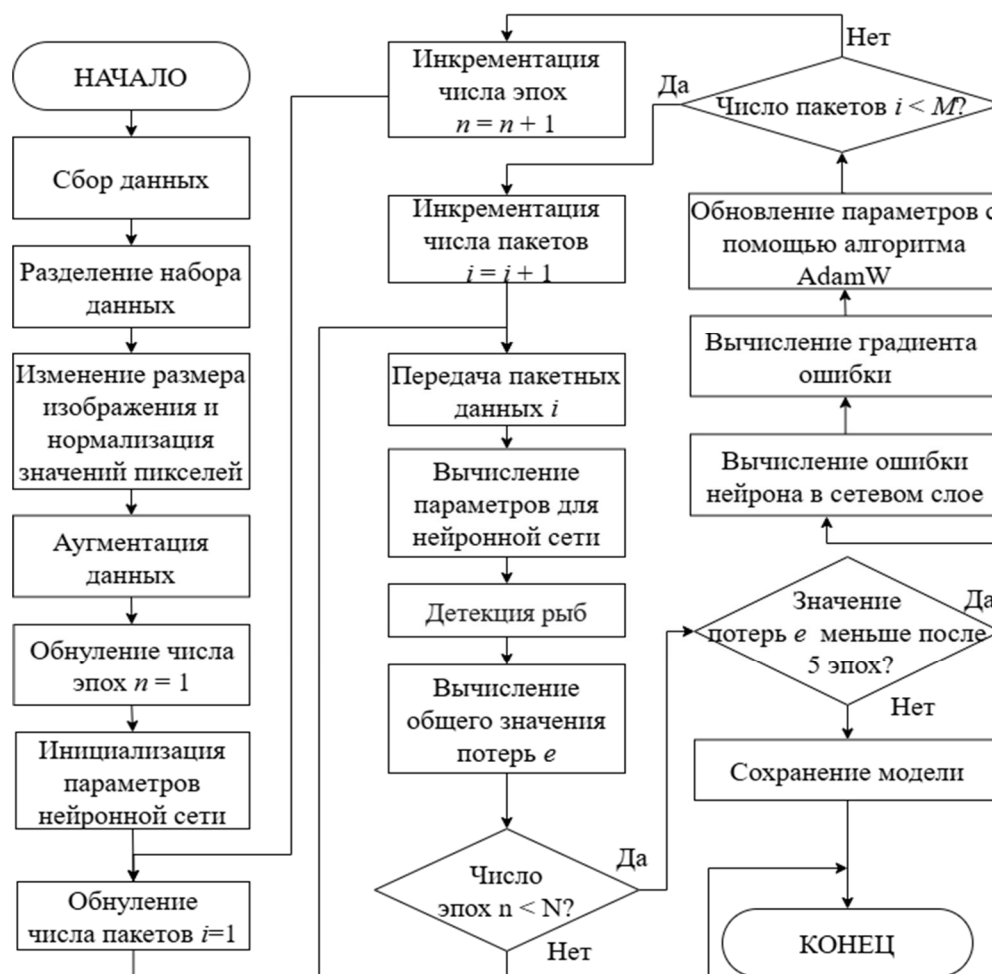


Рис. 1. Алгоритм обучения нейронной модели YOLO

Fig. 1. The YOLO neural model training algorithm

Алгоритм подсчета рыб на изображении и слежения за их движением

Разработанный алгоритм подсчета рыб, представленный на рис. 2, начинается со сбора изображений. После сбора данные проходят предварительную обработку, включающую масштабирование

изображений до стандартного размера 640×640 пикселей и нормализацию в диапазоне $[-1, 1]$ с помощью линейного преобразования, аналогичного процессу нормализации, используемому при обучении модели.

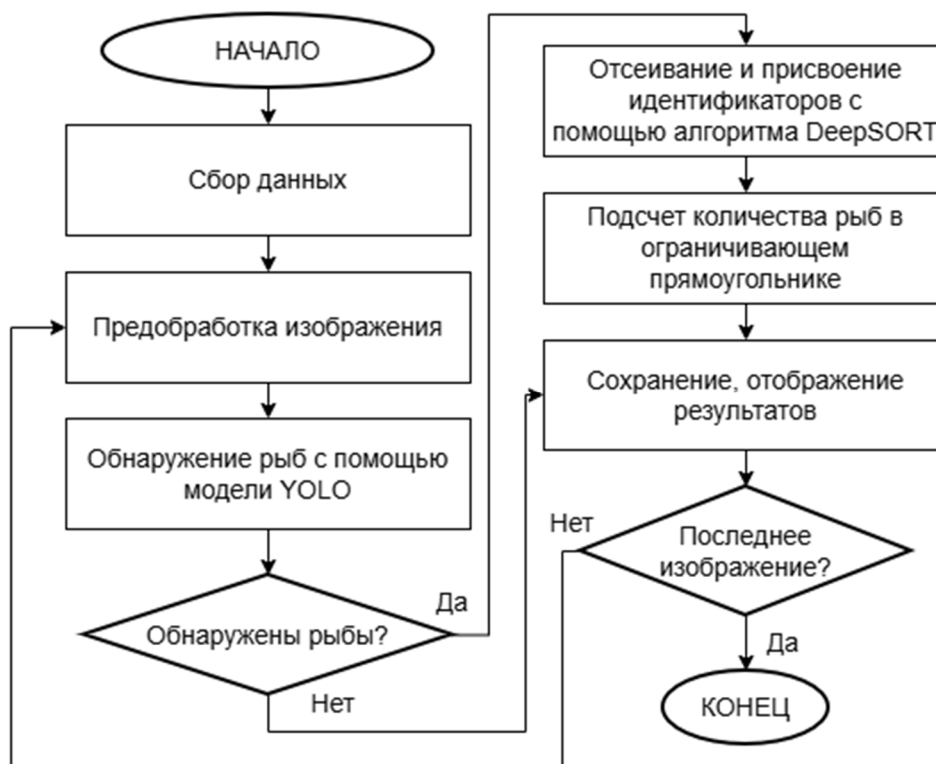


Рис. 2. Алгоритм автоматического подсчета рыб с использованием модели YOLO

Fig. 2. The automated fish counting algorithm using the YOLO model

Далее для обнаружения рыб используется заранее обученная модель YOLO. При обработке изображения модель формирует ограничивающие рамки вокруг объектов, распознанных как рыбы, и присваивает каждой рамке оценку достоверности, отражающую точность предсказания.

Одним из ключевых этапов является применение метода Non-Maximum Suppression (NMS) [22], который позволяет удалять перекрывающиеся рамки, принадлежащие изображению одной и той же рыбы. Метод NMS сохраняет рамку с наивысшей достоверностью и исключает другие рамки, охватывающие тот же объект, обеспечивая, что каждый экземпляр рыбы будет обнаружен только один раз.

После определения точных рамок каждой рыбе присваивается уникальный идентификатор (*ID*) с использованием алгоритма DeepSORT [23], что позволяет различать объекты и отслеживать движение каждого экземпляра через последовательные кадры.

Данный процесс не только обеспечивает обнаружение и классификацию рыб, но и позволяет подсчитывать их количество путем суммирования всех обнаруженных ограничивающих рамок. Полученные результаты сохраняются и отображаются в реальном времени, что предоставляет пользователю возможность точно контролировать и оценивать численность рыб.

Разработанный алгоритм представляет собой полностью автоматизирован-

ный инструмент для подсчета рыб с высокой точностью, который может быть использован в различных практических приложениях, таких как мониторинг и управление аквакультурой, а также экологические исследования. Благодаря своей способности быстрой и точной обработки данных, алгоритм позволяет сократить человеческое вмешательство в процесс наблюдения и одновременно предоставляет ценную информацию для оптимизации процессов разведения рыб.

Результаты и их обсуждение

Корпус данных и вычислительное оборудование

Для проведения экспериментальной оценки эффективности обученной модели YOLO в задаче подсчета рыб на подводных видеоданных, в данном исследовании была применена архитектура YOLOv9t [24]. Модель использовалась для детектирования и количественного анализа рыб в естественной среде с использованием части набора данных DeepFish [25], специально разработанного для повышения производительности распознавания объектов в подводных условиях.

Использованный корпус данных включает в общей сложности 400 изображений с аннотированными объектами рыб в сложных условиях съемки. Каждое изображение имеет разрешение 640×640 пикселей, что обеспечивает однородность входных данных для модели YOLOv9t. Все изображения снабжены аннотациями ограничивающих рамок и метками классов, точно определяющими

ми локализацию и тип рыб в кадре. Распределение набора данных составило 80% для тренировки, 10% для валидации и 10% для тестирования, что обеспечивает сбалансированное распределение для точной оценки производительности модели.

Процесс обучения модели YOLOv9t осуществлялся на платформе Google Colab с использованием графического ускорителя Tesla T4, что позволило максимально эффективно использовать вычислительные ресурсы для оптимизации производительности модели. Размер пакета был установлен на 64 изображения, обеспечивая эффективное использование памяти GPU. Обучение проводилось в течение 50 эпох, что позволило модели достичь постепенной сходимости и стабильной производительности без переобучения.

Показатели эффективности алгоритмов

При оценивании эффективности функционирования алгоритмов обнаружения объектов применялись два основных аспекта: точности детекции и сложности модели. Точность детекции измеряется такими метриками, как Точность (Precision - P), Полнота (Recall - R) и Средняя точность (Average Precision, AP), которые оценивают распознающую способность модели. С другой стороны, сложность модели оценивается через размер файла весов и общее количество параметров, что отражает уровень потребления вычислительных ресурсов. В совокупности эти факторы определяют производительность и практическую применимость модели.

Точность определяется как отношение корректно классифицированных ограничивающих рамок целевых объектов к общему количеству обнаруженных рамок, служа ключевым показателем точности алгоритма детекции объектов.

Полнота представляет долю корректно обнаруженных рамок среди общего количества фактических целевых рамок, измеряя степень охвата и способность алгоритма к извлечению объектов.

Средняя точность представляет собой комплексный показатель оценки, используемый для объективной оценки производительности моделей детекции объектов при различных порогах Пересечения по Объединению (IoU). AP вычисляется путем расчета площади под кривой Точность-Полнота (Precision-Recall curve). Конкретно, для каждой категории объектов набор значений Точности и Полноты вычисляется на основе различных порогов IoU. Этот набор значений затем интерполируется для расчета площади под кривой, представляющей AP для данной категории.

mAP-средняя точность (*mAP* – Mean Average Precision) служит комплексным метрическим показателем, получаемым путем усреднения площадей под кривыми Точность-Полнота для различных категорий. *mAP* является одной из наиболее широко используемых метрик оценки производительности в области детекции объектов, обеспечивая интегральную оценку Точности и Полноты модели. Обычно *mAP* вычисляется для серии порогов IoU, таких как 0.5 и 0.95, для оценки произ-

водительности при различных пороговых значениях.

Предположим, что количество истинно-положительных образцов в результатах прогнозирования обозначается как *TP* (True Positives), количество ложно-положительных образцов представляется как *FP* (False Positives), а количество ложно-отрицательных образцов указывается как *FN* (False Negatives), где *i* обозначает категорию в наборе данных. На основе данных определений, уравнения для расчета Точности (*P*), Полноты (*R*) и Средней Точности (*mAP*) выражаются следующим образом:

$$R = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$AP = \int_0^1 P(R) dR,$$

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i.$$

Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены кривые потерь на обучающей и валидационной выборках, иллюстрирующие процесс сходимости модели YOLOv9t в ходе обучения. Обе кривые демонстрируют устойчивую тенденцию к снижению, что свидетельствует об эффективном протекании процесса оптимизации и отсутствии выраженного переобучения. Стабильная производительность модели, отраженная в метриках Точность, Полнота и *mAP*, подтверждает ее надежность при решении задачи обнаружения рыб.

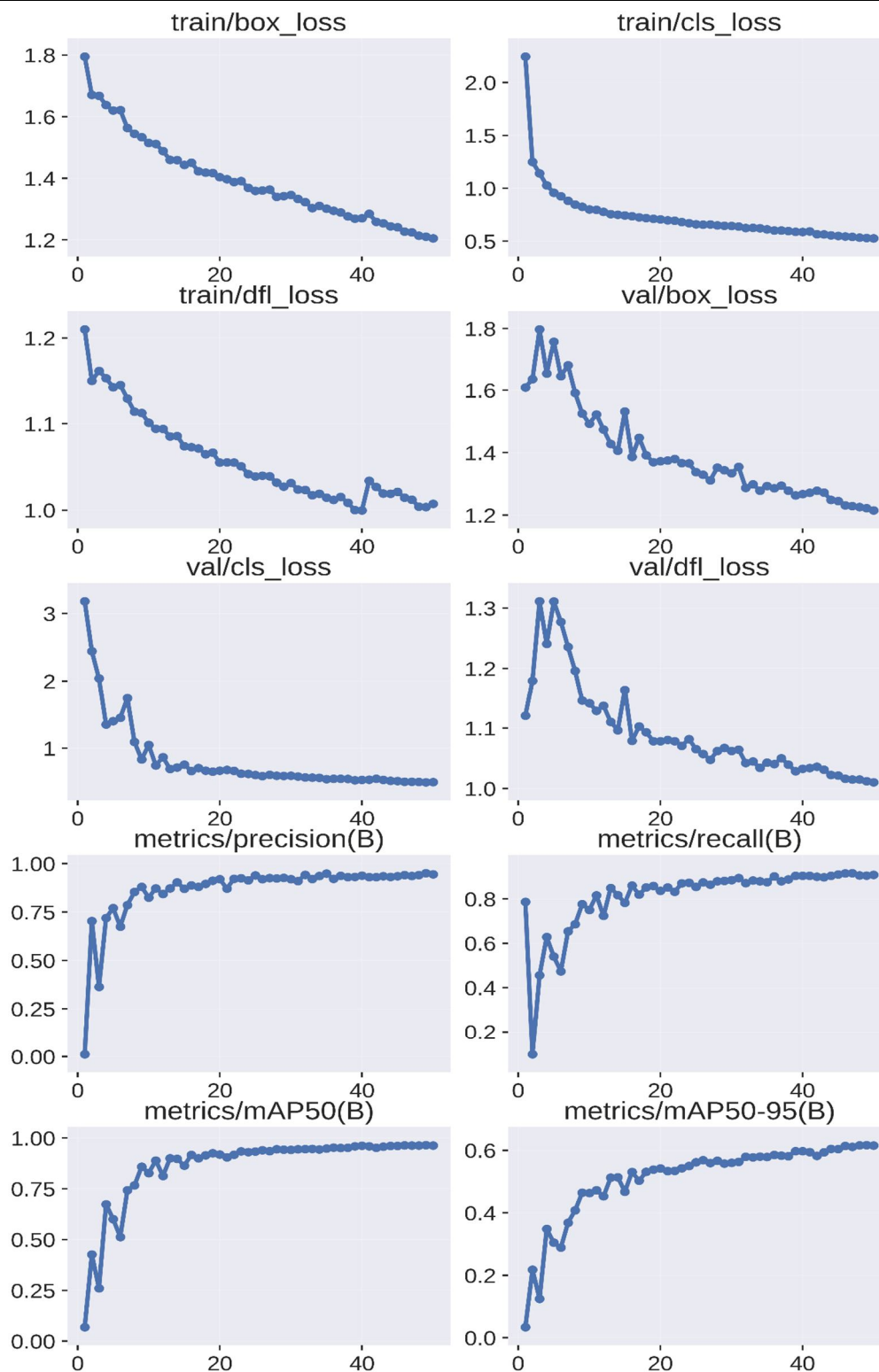


Рис. 3. Кривые потерь на обучении и валидации для YOLOv9t

Fig. 3. Training and validation loss curves for YOLOv9t

Для всесторонней оценки способности модели обнаруживать рыбу при различных порогах уверенности, нами были

проанализированы посемейные кривые F1 (рис. 4). Показатель F1 выступает в качестве агрегированной метрики, отра-

жающей общую производительность модели посредством балансировки между точностью и полнотой. Оптимальное значение F1, равное 0.93, достигается при пороге уверенности приблизительно 0.356, что указывает на наилучший баланс между точностью и полнотой на данном уровне и обуславливает применимость модели в приложениях, требующих оптимизации F1-score.

Эксперименты на наборе данных DeepFish с использованием модели YOLOv9t показали высокие результаты:

точность составила 0,928, Полнота — 0,91, mAP50 - 0,961, а mAP50-95 - 0,584. Эти показатели демонстрируют, что YOLOv9t эффективно распознает рыб в различных условиях среды, включая прозрачную и мутную воду, а также ситуации с низкой контрастностью. Несмотря на то, что такие факторы, как изменение освещения или тени, могут снижать качество обнаружения, YOLOv9t сохраняет высокую точность и быструю обработку.

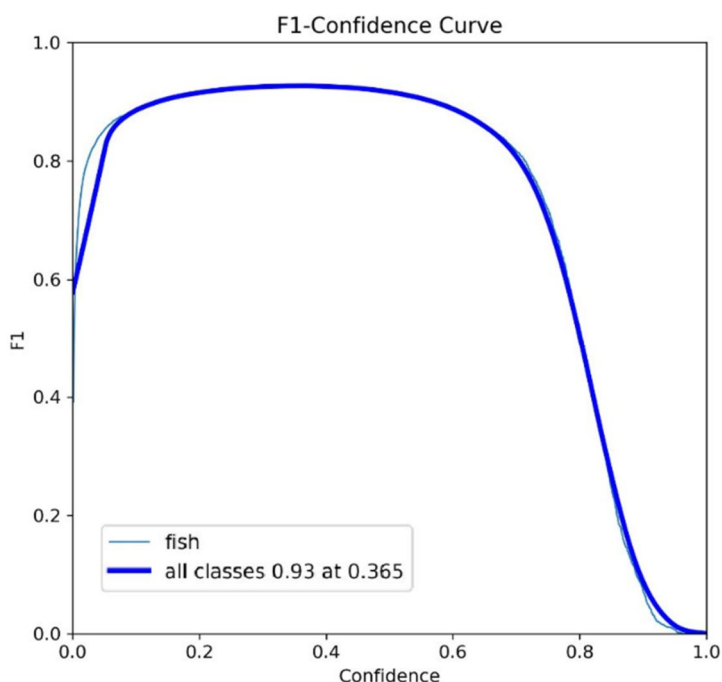


Рис. 4. Кривая F1-Confidence для модели YOLOv9t

Fig. 4. The F1-Confidence curve for the YOLOv9t model

С имеющимися всего 2005603 параметрами и 7,8 GFLOPs, модель YOLOv9t превосходит традиционные методы в задачах обнаружения и подсчета рыб, сочетая высокую производительность с оптимальной вычислительной эффективностью. Результаты экспериментов показывают, что модель обеспечивает

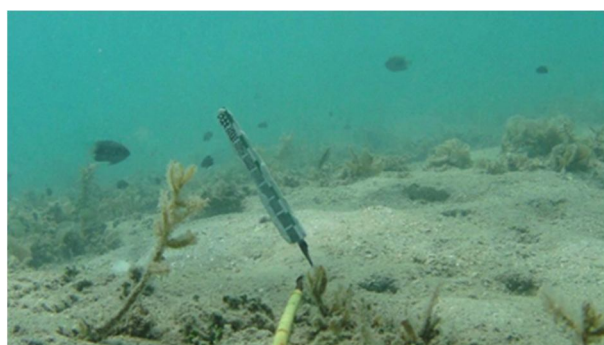
высокую точность обнаружения и подсчета, особенно когда рыбы не слишком скрыты или перемещаются явно в кадре. Одним из ключевых факторов, способствующих высокой точности YOLOv9t, является способность быстро и точно обрабатывать рамки, ограничивающие объекты, минимизируя ошибки в слож-

ных ситуациях, например, при малых размерах объектов или их частичном перекрытии другими предметами.

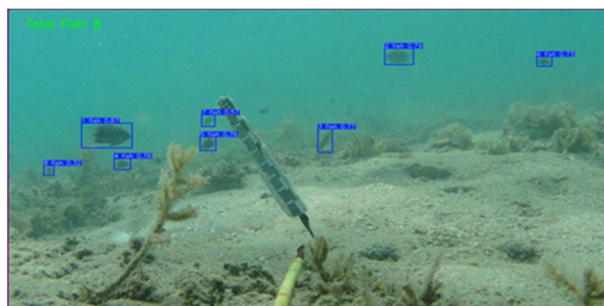
Кроме того, YOLOv9t демонстрирует высокую эффективность в сложных сценариях, таких как присутствие нескольких рыб в одном кадре или быстрое движение объектов. Методы, такие как Non-Maximum Suppression, и усовершенствования модели YOLOv9t позволяют устранять ложные срабатывания и минимизировать дублирование,

обеспечивая корректное распознавание и подсчет каждой рыбы.

Для подсчета количества рыб, после обнаружения и маркировки объектов в каждом кадре, YOLOv9t использует алгоритм DeepSORT для присвоения уникального идентификатора каждой рыбе. Этот процесс позволяет отслеживать каждую особь на последовательных кадрах без дублирования при подсчете. На рис. 5 представлены примеры подсчета рыб с использованием модели YOLOv9t.



(a)



(б)

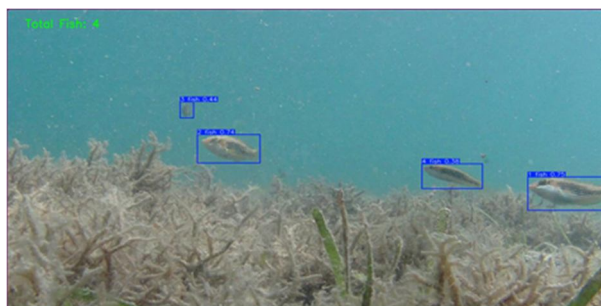


Рис. 5. Результаты подсчета рыб с использованием модели YOLO: **а** – исходные изображения; **б** – изображения после обработки моделью YOLOv9t

Fig. 5. Fish counting results using the YOLO model: **a** – original images; **b** – images after processing by the YOLOv9t model

На изображении модель обнаруживает рыб и выводит результаты подсчета 8 и 4, что соответствует действительности. Результаты показывают, что система обеспечивает точный подсчет об-

щего количества рыб, одновременно отображая результаты на пользовательском интерфейсе и поддерживая высокую производительность на протяжении всего процесса обработки.

Полученные результаты экспериментов продемонстрировали, что YOLOv9t является не только мощным инструментом для обнаружения рыб под водой, но и эффективным решением для задач подсчета рыб в естественной среде. Это открывает значительный потенциал для применения в таких областях, как экологические исследования, охрана дикой природы и управление аквакультурой, где отслеживание и мониторинг численности рыб имеют критически важное значение.

Выводы

В статье представлен алгоритм обучения модели YOLO и алгоритм автоматического подсчета рыб с использованием модели YOLO. Для тестирования разработанных алгоритмов были проведены эксперименты по оценке эффективности обученной модели YOLOv9t при решении задачи обнаружения и подсчета рыб на подводных видеозаписях с использованием стандартного набора данных DeepFish. Ключевым фактором успеха системы является метод Non-Maximum Suppression, который эффективно фильтрует перекрывающиеся или дублирующие области обнаружения, оставляя только ограничивающую рамку с наивысшей вероятностью для каждого объ-

екта, что делает результаты обнаружения более точными и надежными. Экспериментальные результаты служат убедительным доказательством эффективности модели, демонстрируя превосходные показатели: Точность - 0,928, Полнота - 0,91, mAP50 - 0,961 и mAP50-95 - 0,584. Примечательно, что модель YOLOv9t достигает таких впечатляющих показателей при крайне оптимизированной архитектуре, имея всего 2 005 603 параметра и 7,8 GFLOPs, что подтверждает ее преимущества не только с точки зрения точности, но и вычислительной эффективности, позволяя использовать модель на ограниченном аппаратном обеспечении. Для задачи подсчета рыб в исследовании успешно применен алгоритм DeepSORT. После того как YOLOv9t обнаруживает объекты в каждом кадре, каждому объекту присваивается уникальный идентификатор. Система затем отслеживает перемещение объектов по последовательным кадрам на основе корреляции их положения, размера и визуальных признаков. Интеллектуальное управление жизненным циклом объектов (отслеживание появления, исчезновения и поддержание ID) минимизирует ошибки дублирующего подсчета или пропуска объектов, обеспечивая точный и стабильный подсчет общего числа рыб в видео.

Список литературы

1. Overview of smart aquaculture system: Focusing on applications of machine learning and computer vision / T.T.E. Vo, H. Ko, J. H. Huh, Y. Kim // Electronics. 2021. Vol. 10(22). P. 2882.

2. Ji Y., et al. Design and realization of a novel hybrid-drive robotic fish for aquaculture water quality monitoring // *Journal of Bionic Engineering*. 2023. Vol. 20.2. P. 543-557.
3. Kruusmaa M., et al. Salmon behavioural response to robots in an aquaculture sea cage // *Royal Society open science*. 2020. Vol. 7.3. P. 191220.
4. Rastegari H., et al. Internet of Things in aquaculture: A review of the challenges and potential solutions based on current and future trends // *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 4. P. 100187.
5. Mandal A., Apurba R.G. Role of artificial intelligence (AI) in fish growth and health status monitoring: A review on sustainable aquaculture // *Aquaculture International*. 2024. Vol. 32.3. P. 2791-2820.
6. Ле В.Н., Ронжин А.Л. Обзор интеллектуальных систем управления и робототехнических задач в производстве аквакультуры // *Морские интеллектуальные технологии*. 2024. Vol. 63. P. 171–180.
7. Chiu M.C., et al. Development of smart aquaculture farm management system using IoT and AI-based surrogate models // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022. Vol. 9. P. 100357.
8. Ронжин А.Л., Ле В.Н., Шувалов Н. Оптимизация технологической карты допустимых системотехнических решений задачи видеоаналитики аквакультуры // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. 2024. Т. 16. С. 50-58.
9. Yang L., et al. Computer vision models in intelligent aquaculture with emphasis on fish detection and behavior analysis: a review // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. Vol. 28.4.
10. Quaade S., et al. Remote sensing and computer vision for marine aquaculture // *Science Advances*. 2024. Vol. 10.42.
11. Le V.N., Tuyen T. V., Ronzhin A. L. Fish image classification based on MobileNetV2 with transfer learning technique for robotic application in aquaculture // *International Conference on Interactive Collaborative Robot*. 2024. P. 201-212.
12. Tran T., Duong B., Vu Q., Le V., Glibko O., Ronzhin A. Methods and Technical Means of Nonintrusive Assessment of Fish Bio-mass and Robotic Maintenance of Cage Aquaculture // *International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production*. 2024. P. 207-215.
13. Terven J., Diana-Margarita C., Julio-Alejandro R. A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS // *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023. Vol. 5.4. P. 1680–1716.
14. Zhang Z., et al. A method for counting fish based on improved YOLOv8 // *Aquacultural Engineering*. 2024. Vol. 107. P. 102450.
15. Yu H., et al. An automatic detection and counting method for fish lateral line scales of underwater fish based on improved YOLOv5 // *IEEE*. 2023. P. 143616-143627.

16. Ле В.Н., Ронжин А.Л. Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. Т. 6(116). С. 167–178.
17. Wu J. Introduction to convolutional neural networks // National Key Lab for Novel Software Technology. 2017. P. 495.
18. Khanam R., Muhammad H. A Review of YOLOv12: Attention-Based Enhancements vs. Previous Versions // arXiv preprint arXiv:2504.11995. 2025.
19. Shorten C., Taghi, M. K. A survey on image data augmentation for deep learning // Journal of Big Data. 2019. Vol. 6(1). P. 1–48.
20. Zhuang Z., et al. Understanding AdamW through proximal methods and scale-freeness // arXiv preprint arXiv:2202.00089. 2022.
21. Prechelt L. Early stopping—but when? // Neural Networks: Tricks of the trade. 2002. P. 55–69.
22. Hosang J., Rodrigo B., Bernt S. Learning non-maximum suppression // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017.
23. Wojke N., Alex B., Dietrich P. Simple online and realtime tracking with a deep association metric // 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2017.
24. Wang C., Hau Y., Hong-Yuan M.L. Yolov9: Learning what you want to learn using programmable gradient information // European conference on computer vision. 2024.
25. Saleh A., et al. A realistic fish-habitat dataset to evaluate algorithms for underwater visual analysis // Scientific reports. 2020. P. 14671.

References

1. Vo T. T. E., Ko H., Huh J. H., Kim Y. Overview of smart aquaculture system: Focusing on applications of machine learning and computer vision. *Electronics*. 2021; 10(22): 2882.
2. Ji, Yiting, et al. Design and realization of a novel hybrid-drive robotic fish for aquaculture water quality monitoring. *Journal of Bionic Engineering*. 2023; 20.2: 543-557.
3. Kruusmaa Maarja, et al. Salmon behavioural response to robots in an aquaculture sea cage. *Royal Society open science*. 2020; 7.3: 191220.
4. Rastegari Hajar, et al. Internet of Things in aquaculture: A review of the challenges and potential solutions based on current and future trends. *Smart Agricultural Technology*. 2023; 4: 100187.
5. Mandal Arghya, Apurba Ratan Ghosh. Role of artificial intelligence (AI) in fish growth and health status monitoring: A review on sustainable aquaculture. *Aquaculture International*. 2024; 32.3: 2791-2820.

6. Le V. N., Ronzhin A. L. A Review of Intelligent Control Systems and Robotics Applications in Aquaculture Production. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine intelligent technologies*. 2024; 63: 171–180. (In Russ.).

7. Chiu Min-Chie, et al. Development of smart aquaculture farm management system using IoT and AI-based surrogate models. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022; 9: 100357.

8. Ronzhin A. L., Le V. N., Shuvalov N. Optimization of the process map of admissible system-technical solutions for the problem of video analytics in aquaculture. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University*. 2024; 16: 50-58. (In Russ.).

9. Yang Ling, et al. Computer vision models in intelligent aquaculture with emphasis on fish detection and behavior analysis: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021; 28.4.

10. Quaade Sebastian, et al. Remote sensing and computer vision for marine aquaculture. *Science Advances*, 2024; 10.42.

11. Van Nghia, Le, Tran Van Tuyen, Andrey Ronzhin. Fish image classification based on MobileNetV2 with transfer learning technique for robotic application in aquaculture. In: *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2024. P. 201-212.

12. Tran T., Duong B., Vu Q., Le V., Glibko O., Ronzhin A. L.. Methods and Technical Means of Nonintrusive Assessment of Fish Biomass and Robotic Maintenance of Cage Aquaculture. *International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production*. 2024. 207-215.

13. Terven Juan, Diana-Margarita Córdova-Esparza, Julio-Alejandro Romero-González. A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023; 5.4: 1680–1716.

14. Zhang Zhenzuo, et al. A method for counting fish based on improved YOLOv8. *Aquacultural Engineering*. 2024; 107: 102450.

15. Yu Huihui, et al. An automatic detection and counting method for fish lateral line scales of underwater fish based on improved YOLOv5. *IEEE*, 2023. P. 143616-143627,

16. Le V. N., Ronzhin A. L. Methods and technical means of positioning and navigation of robots in the aquatic environment. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023; 6(116): 167–178 (In Russ.).

17. Wu Jianxin. Introduction to convolutional neural networks. *National Key Lab for Novel Software Technology*. 2017. P. 495.

18. Khanam Rahima, Muhammad Hussain. A Review of YOLOv12: Attention-Based Enhancements vs. Previous Versions. *arXiv preprint arXiv:2504.11995*, 2025.

19. Shorten Connor, Taghi M. Khoshgoftaar. A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of big data*. 2019; 6(1): 1–48.
20. Zhuang Zhenxun, et al. Understanding AdamW through proximal methods and scale-freeness. arXiv preprint arXiv:2202.00089, 2022.
21. Prechelt L. Early stopping—but when? *Neural Networks: Tricks of the trade*. 2022. P. 55–69.
22. Hosang Jan, Rodrigo Benenson, Bernt Schiele. Learning non-maximum suppression. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017.
23. Wojke Nicolai, Alex Bewley, Dietrich Paulus. Simple online and realtime tracking with a deep association metric. In: *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017.
24. Wang Chien-Yao, I-Hau Yeh, Hong-Yuan Mark Liao. Yolov9: Learning what you want to learn using programmable gradient information. In: *European conference on computer vision*, 2024.
25. Saleh Alzayat, et al. A realistic fish-habitat dataset to evaluate algorithms for underwater visual analysis. In: *Scientific reports*. 2020. P. 14671.

Информация об авторе / Information about the Author

Ле Ван Нгиа, аспирант, Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: lenghia18071999@gmail.com

Le Van Nghia, Post-Graduate Student,
St. Petersburg Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: lenghia18071999@gmail.com

УДК 0004.9

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-204-215>

Метод извлечения векторов движения в системах технического зрения, использующих сжатие с потерями

И. О. Шальнев¹, А. Ю. Аксенов¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: a_aksenov@iiias.spb.su

Резюме

Цель исследования. В современном цифровом повышается роль использования видеокамер в качественных источниках первичных данных. Однако сами по себе «сырые» видеоданные несут низкую информационную ценность без последующего анализа. Ключевыми задачами, позволяющими извлечь смысловую информацию из видеопоследовательности, является локализация объектов и определение их движения. Актуальность этой задачи обусловлена ее критической важностью для широкого спектра прикладных и исследовательских дисциплин. Несмотря на длительную историю, определение движущихся объектов остается актуальной научной проблемой в связи с наличием следующих трудностей: изменчивость условий освещения, динамический фон, эффекты окклюзии, необходимость работы в реальном времени. Целью работы является снижение вычислительной нагрузки при решении задач анализа движения объектов в реальном времени путем разработки и апробации метода извлечения векторов движения из сжатых видеопотоков.

Методы. Для реализации поставленной цели был использован аппарат векторов движения как основа компенсации временной избыточности, а также алгоритмы технического зрения и алгоритмы компенсации движения в видеоданных.

Результаты. Создан программный модуль, позволяющий извлекать векторы движения непосредственно из видеопотока. Выполнена экспериментальная проверка эффективности работы предложенного метода и продемонстрирована его эффективность в различных прикладных областях, включая видеонаблюдение, сельское хозяйство и робототехнику при значительном снижении вычислительных затрат.

Заключение. Произведенные экспериментальные проверки показали, что использование векторов движения, уже содержащихся в сжатых видеоданных, позволяет эффективно решать задачи анализа движения без необходимости их повторного вычисления, что особенно актуально для систем с ограниченными вычислительными ресурсами.

Ключевые слова: машинное зрение; оптический поток; векторы движения; сжатие с потерями; видеоданные.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Шальнев И. О., Аксенов А. Ю. Метод извлечения векторов движения в системах технического зрения, использующих сжатие с потерями // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 204-215. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-204-215>.

Поступила в редакцию 12.10.2025

Подписана в печать 06.11.2025

Опубликована 22.12.2025

© Шальнев И. О., Аксенов А. Ю., 2025

Motion vector extraction method for computer vision systems employing lossy compression

Ilia O. Shalnev¹, Alexey Yu. Aksenov¹ ✉

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
14th Line V.O., 39, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: a_aksenov@iias.spb.su

Abstract

Purpose of research. In the modern digital era, the role of video cameras as high-quality sources of primary data is increasing. However, raw video data by themselves carry low informational value without subsequent analysis. The key tasks that allow extracting semantic information from a video sequence are object localization and motion detection. The relevance of this task is determined by its critical importance for a wide range of applied and research disciplines. Despite its long history, detecting moving objects remains a relevant scientific problem due to the following challenges: variability of lighting conditions, dynamic background, occlusion effects, and the need to operate in real time. The aim of this work is to reduce computational load when solving object motion analysis tasks in real time by developing and testing a method for extracting motion vectors from compressed video streams.

Methods. To achieve this goal, the framework of motion vectors was used as the basis for compensating temporal redundancy, along with computer vision algorithms and motion compensation algorithms in video data.

Results. A software module has been developed that allows extracting motion vectors directly from a video stream. An experimental evaluation of the proposed method's effectiveness was carried out, demonstrating its efficiency in various applied fields, including video surveillance, agriculture, and robotics, with a significant reduction in computational costs.

Conclusion. The experimental evaluations have shown that using motion vectors already contained in compressed video data allows effectively solving motion analysis tasks without the need to recalculate them. This is especially relevant for systems with limited computational resources.

Keywords: computer vision; optical flow; motion vectors; lossy compression; video data.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Shalnev I. O., Aksenov A. Yu. Motion vector extraction method for computer vision systems employing lossy compression. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 204-215 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-204-215>.

Received 12.10.2025

Accepted 06.11.2025

Published 22.12.2025

Введение

В современном цифровом мире повышается роль использования видеокамер в качестве источников первичных данных. Однако сами по себе «сырые» видеоданные без последующего анализа имеют низкую информационную ценность. Ключевыми задачами, решение которых позво-

лит извлечь смысловую информацию из видеопоследовательности, являются локализация объектов и определение их движения. Актуальность этой задачи обусловлена ее критической важностью для широкого спектра прикладных и исследовательских дисциплин.

Примерами задач, где требуется анализ движения на видеокадре, являются: системы видеонаблюдения и безопасности (обнаружение, подсчет посетителей, мониторинг дорожного трафика), автономные транспортные системы, системы помощи водителю [1], компьютерное зрение в робототехнике (включая задачи навигации мобильных роботов в динамически изменяющейся среде) [2], анализ медицинских изображений (отслеживание движения контрастного вещества в сосудах, изучение двигательной активности пациентов с неврологическими заболеваниями, распознавание людей по походке, анализ мимики и жестов), человеко-машинное взаимодействие и дополненная реальность (системы управления жестами и технологии дополненной реальности) [3].

Несмотря на длительную историю, определение движущихся объектов остается актуальной научной проблемой в связи с наличием таких трудностей, как изменчивость условий освещения, динамический фон, эффекты окклюзии, необходимость работы в реальном времени [4].

Анализ ранних исследований [5–6] показал снижение активности по разработке собственных алгоритмов оценки движения в видеоданных примерно с 2010 года, что обусловлено переходом на доступные программные реализации алгоритмов Лукаса-Канаде, Фарнбека, реализованные в составе открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV¹.

¹ OpenCV library. OpenCV; 2025. URL: <https://opencv.org/>.

Большинство современных цифровых камер имеют в своем составе блоки сжатия видео с потерями на основе стандартных кодеков (кодеров/декодеров): MPEG-4 Part 2, H.264/AVC, H.265/HEVC и др. В свою очередь, большинство видеокодеков реализует устранение временной избыточности видеопотока за счёт поиска и кодирования векторов перемещённых блоков (motion vectors) [7–8], описывающих смещение пиксельных макроблоков В между соседними кадрами (рис. 1).

Восстановление произвольного кадра видеопотока в грубом приближении происходит за счет разбиения на макроблоки полностью сохраненных кадров (называемых опорными), из которых затем собирается искомый кадр путем перемещения макроблоков с помощью векторов движений.

Таким образом, сам закодированный видеопоток уже содержит информацию о движении в кадре. Учитывая факт, что большинство цифровых, сетевых камер выдают видеоданные в сжатом формате, целесообразно использовать имеющиеся в них данные о временной избыточности, выраженной в виде векторов движений отдельных макроблоков. В этом случае не требуется привлечение дополнительных вычислительных ресурсов для повторного извлечения векторов движения для объектов, которые нужны в ряде известных алгоритмов [9, 10].

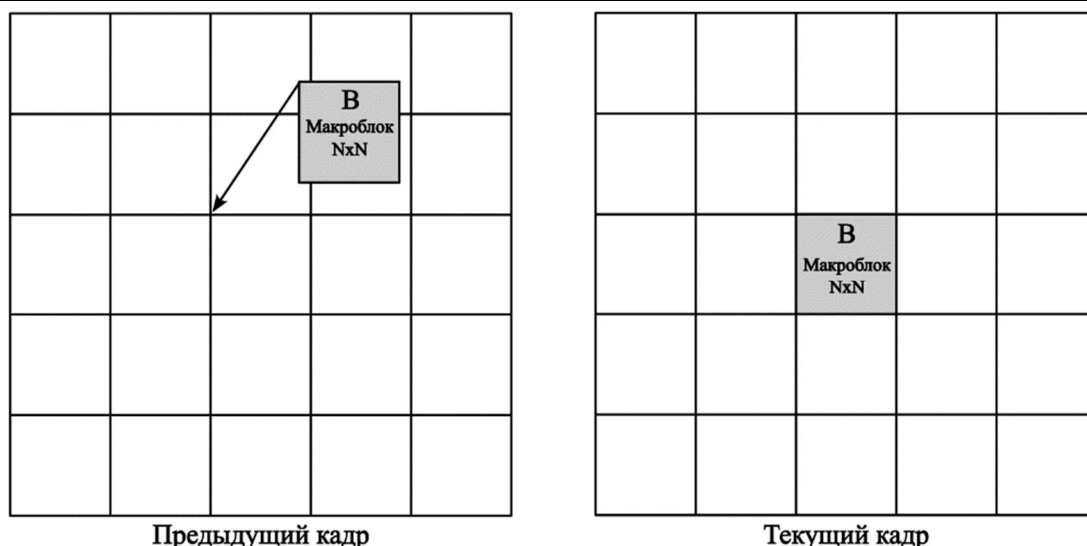


Рис. 1. Принцип определения векторов движений

Fig. 1. The principle of motion vectors detection

Материалы и методы

Векторы движения как основа компенсации временной избыточности.

Одним из базовых механизмов алгоритмов сжатия видео с потерями (стандарты семейства H.26x и VP9/AV1) является устранение временной избыточности. В связи с тем, что соседние кадры в видеопоследовательности (Group of Pictures) часто содержат незначительные изменения, связанные с перемещением объектов или камеры, попиксельное хранение каждого кадра оказывается неэффективным. Вместо этого используется компенсация движения – метод, предсказывающий содержимое текущего кадра (Р- или В-кадра) на основе одного или нескольких ранее закодированных опорных кадров (I- или Р-кадров). Ключевым элементом такого представления является вектор движения (Motion Vector), который указывает, откуда в опорном кадре был взят блок

пикселей для предсказания текущего блока в кодируемом кадре¹ [11-14].

Процесс работы с векторами движения в кодеках состоит из двух этапов: оценка движения (Motion Estimation) и компенсация движения (Motion Compensation).

Пусть $I_t(x, y)$ – интенсивность пикселя с координатами (x, y) в текущем кадре в момент времени t , а $I_{t-\Delta t}(x, y)$ – интенсивность в опорном кадре.

Задача оценки движения для макроблока B размером $N \times N$ (например, 16×16 или 8×8) в текущем кадре сводится к поиску такого вектора $\vec{v} = (v_x, v_y)$, который минимизирует функцию ошибки предсказания в пределах области поиска в опорном кадре:

¹ Joint Video Team (JVT) of ITU-T VCEG and ISO/IEC MPEG. Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification (ITU-T Rec. H.264 | ISO/IEC 14496-10 AVC). Document JVT-G050; 2003.

$$\vec{v} = \operatorname{argmin}_{(v_x, v_y) \in S} \sum_{(x, y) \in B} D(I_t(x, y), I_{t-\Delta t}(x + v_x, y + v_y)),$$

где D – функция оценки искажений (distortion), например сумма разностей – SAD (Sum of Absolute Differences) или сумма квадратов отклонений (SSE):

$$SAD(v_x, v_y) = \sum_{(x, y) \in B} D|I_t(x, y) - I_{t-\Delta t}(x + v_x, y + v_y)|.$$

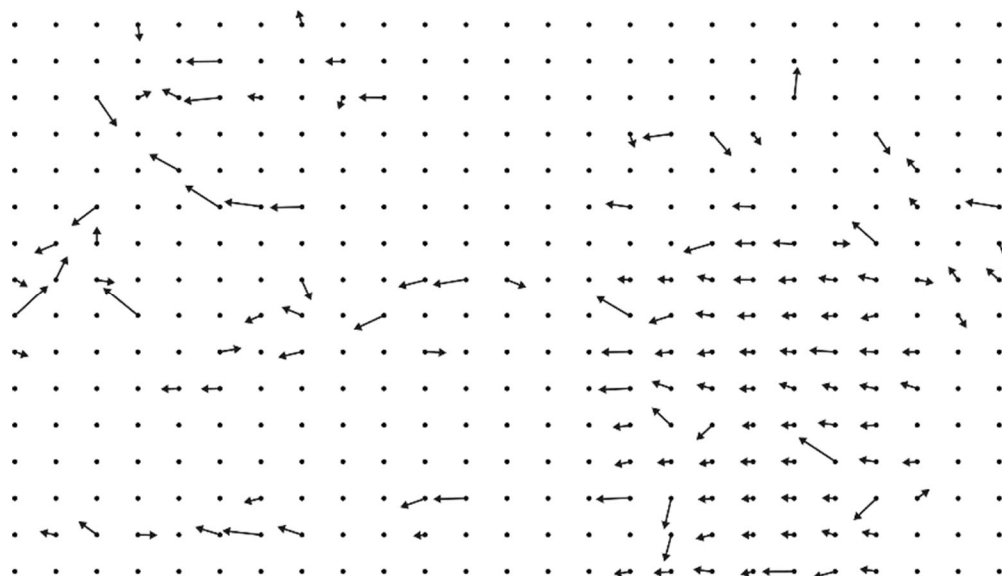


Рис. 2. Типичное представление карты векторов движения в кодеке H.264 [15]

Fig. 2. Typical representation of motion vector map in H.264 codec [15]

Для поиска движений может быть использован полный перебор (Full Search) всех возможных смещений в области поиска, который обеспечивает нахождение глобального оптимума, но вычислительно сложен. Также применяются быстрые алгоритмы поиска:

1. Трехшаговый поиск – итеративный поиск с большим шагом на первом этапе и уменьшением шага на последующих.

2. Алгоритм diamond search – поиск по шаблону в форме ромба, что лучше соответствует естественному распределению векторов движения.

Найденный вектор \vec{v} является вектором движения для макроблока – группы пикселей прямоугольной формы. В процессе кодирования кодер передает не сам блок пикселей, а его вектор движения и разницу между реальным блоком и предсказанным (ошибку предсказания, residual) (рис. 2).

3. Иерархический (пирамидальный) поиск – оценка движения начинается на уменьшенной копии кадра для поиска грубого смещения с последующим уточнением на кадрах большего разрешения.

Современные кодеки (например, HEVC и AV1) используют адаптивное разбиение на блоки (Coding Tree Units). Это позволяет использовать векторы движения для блоков разного размера – от крупных (64x64) для однородных областей до мелких (4x4) – для границ объектов и мелких деталей.

Использование метаданных кодека позволяет извлекать эти векторы без

полной декомпрессии видеопотока. Известны программные реализации, частично реализующие функцию извлечения таких метаданных в виде интерпретируемого кода на языке Python¹, а также аппаратные варианты реализации² [16].

Результаты и их обсуждение

Программная реализация. Для извлечения векторов движения из видеопотока был разработан программный модуль захвата видеокадров на основе библиотеки FFmpeg³ (рис. 3). Данная реализация инвариантна к виду источника данных (видеопоток с камеры, сетевой ресурс, локальный файл).

На первом этапе выполняется инициализация источника видеопотока, что включает следующие стандартные для FFmpeg действия:

- открытие контейнера
(`avformat_open_input`);
- чтение заголовков
(`avformat_find_stream_info`);

¹ Motion Vector Extractor [сайт]. GitHub; 2025 [обновлено 25 октября 2025; процитировано 25 октября 2025]. URL: <https://github.com/LukasBommes/mv-extractor>.

² Патент № 2837541 С1 Российская Федерация, МПК H04N 19/513, H04N 19/139, H04N 19/105. Устройство и способ для кодирования вектора движения и устройство и способ для декодирования вектора движения / М. Парк, М. Парк, К. Чои и др.; № 2024101234: заявл. 25.04.2024; опубл. 01.04.2025; заявитель САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС КО., ЛТД; Патент № 2408160 С1 Российская Федерация, МПК H04N 7/28, G06T 7/20. Способ нахождения векторов движения деталей в динамических изображениях и устройство для его реализации / В. П. Дворкович, А. В. Дворкович, В. В. Нечепасв. № 2009130446/09: заявл. 10.08.2009; опубл. 27.12.2010 /.

³ FFmpeg [сайт]. FFmpeg; 2025. URL: <https://ffmpeg.org>.

– поиск требуемого видеопотока среди доступных потоков внутри контейнера;

– создание и инициализация видеodeкодера на основе параметров найденного потока.

Ключевым отличием от типичного декодирования является необходимость явно указать декодеру экспортировать векторы движения. Это достигается установкой соответствующего флага через словарь опций кодера:

```
av_dict_set(&mCodecOptions, "flags2",  
"+export_mvs", 0);
```

где "flags2" – имя параметра, а "+export_mvs" – значение, включающее экспорт векторов движения.

После успешной инициализации декодера можно последовательно извлекать кадры: сначала в сжатом виде (пакеты, `AVPacket`), затем передавать их в декодер (`avcodec_send_packet`), после чего получать раскодированные кадры (`AVFrame`) в формате, определяемом исходным видео (`avcodec_receive_frame`).

Если декодер был корректно настроен с флагом `export_mvs`, то в раскодированном кадре (`AVFrame`) будут присутствовать дополнительные (side) данные с типом `AV_FRAME_DATA_MOTION_VECTORS`.

Их можно получить следующим образом:

```
AVFrameSideData* side_data =  
av_frame_get_side_data(mAvFrame,  
AV_FRAME_DATA_MOTION_VECTORS);
```

При наличии таких данных они содержат массив структур `AVMotionVector`, содержащий искомые векторы движения для отдельных блоков кадра (рис. 4).

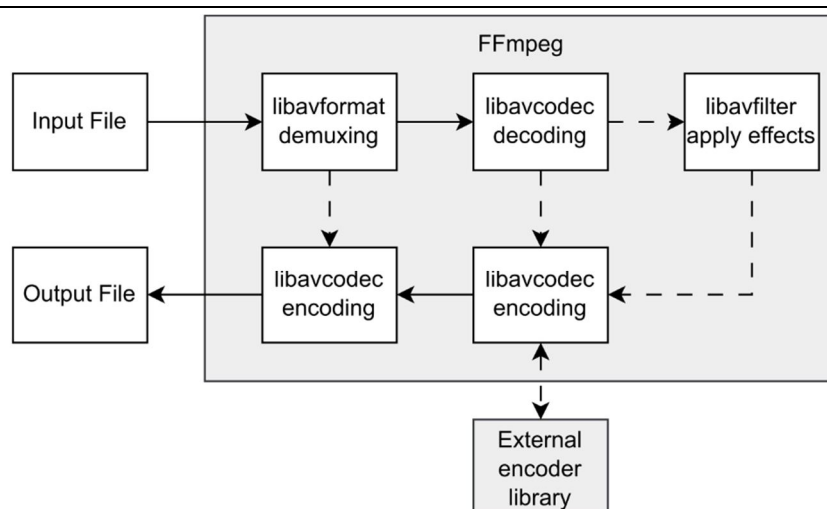


Рис. 3. Структурная схема взаимодействий компонентов FFmpeg¹

Fig. 3. Structural scheme of FFmpeg components interaction¹

```
typedef struct AVMotionVector {
    int32_t source;
    uint8_t w, h;
    int16_t src_x, src_y;
    int16_t dst_x, dst_y;
    uint64_t flags;
    int32_t motion_x, motion_y;
    uint16_t motion_scale;
} AVMotionVector;
```

Рис. 4. Описание структуры данных AVMotionVector

Fig. 4. The AVMotionVector data structure description

Области применения. Разработанный программный модуль был протестирован в трех различных задачах.

1. Мониторинг двигательной активности в поле зрения камеры – наиболее общий случай задачи, имеющий применение в охранных системах, системах сбора данных и аналитики (рис. 5).

2. Мониторинг поведения биологических объектов для решения сельскохозяйственных задач (рис. 6а, 6б). Дан-

ный мониторинг используется для раннего выявления физиологических отклонений, либо заболеваний у животных путем определения определенных физиологических состояний, либо отклонений от нормы через анализ их движения [17].

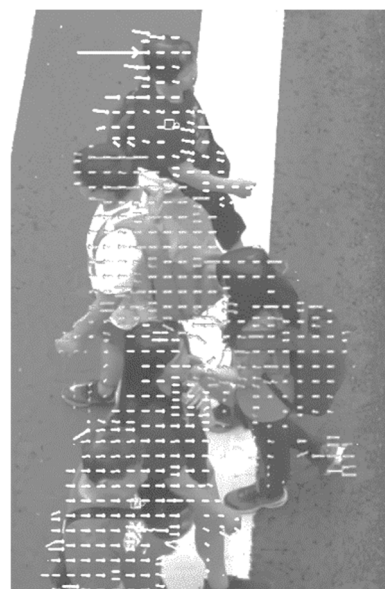


Рис. 5. Выделение векторов движения в задаче мониторинга дорожной обстановки

Fig. 5. The motion vectors detection in road situational monitoring

¹ FFmpeg [сайт]. FFmpeg; 2025. URL: <https://ffmpeg.org>.



а)

б)

Рис. 6. а – Определение состояний животных через выделение характерных движений,
б – Определение физиологических отклонений в походке животных

Fig. 6. а – Obtaining of cattle health state through detection of characteristic motion patterns,
б – Detection of physiological deviation in cattle walk pattern

3. Задача визуальной одометрии для автономных робототехнических комплексов (рис. 7). Данная задача актуальна для уточнения положения робототехнических комплексов (в частности, БЛА) в условиях недоступности систем глобальной спутниковой навигации (ГНСС) [18].

Разработанный программный модуль также может использоваться в задачах идентификации и сравнения видеопоследовательностей [19].

Выводы

Методы технического зрения, основанные на поиске и использовании векторов движения, являются важным

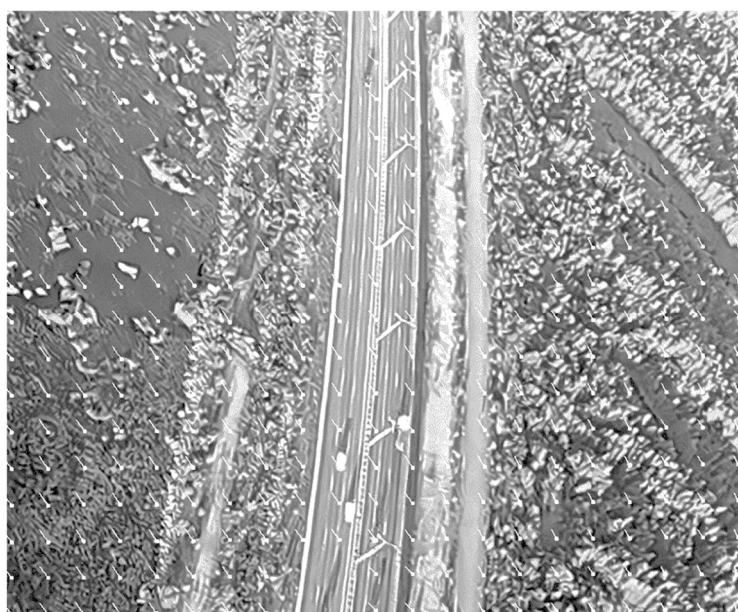


Рис. 7. Выделение векторов движения в задаче визуальной одометрии при движении БЛА

Fig. 7. Detection of motion vectors in visual odometry task for UAV

инструментом для устранения временной избыточности в видеопоследовательностях, сжатия видеоданных, решении прикладных задач, основанных на понимании семантики движения на видеокадре. Эволюция методов работы с ними – от простого блочного сопоставления до адаптивного разбиения, аффинного преобразования и сложных режимов предсказания – напрямую определяет рост эффективности сжатия в новых стандартах кодирования.

Анализ ранних исследований показал снижение активности по разработке собственных алгоритмов оценки движения в видеоданных примерно с 2010 года, что обусловлено переходом на доступные программные реализации алгоритмов Лукаса-Канаде, Фарнбека, реализованные в составе открытых и коммерческих библиотек компьютерного зрения.

Вместе с тем, большинство используемых методов остаются достаточно

ресурсоемкими по отношению к вычислителю.

Авторами предложен подход, основанный на использовании уже существующих данных о движении, которые формируются стандартными видеокодеками, и разработан программный модуль на языке C++ для извлечения векторов движения, позволяющий значительно сократить потребности вычислительных ресурсов при решении задачи определения движения объектов в видеоданных.

Данный подход может быть эффективно применен в задачах, где объемы обрабатываемых данных превосходят возможности используемых вычислителей, востребованных при разработке таких крупномасштабных проектов, как бортовые системы технического зрения, многоканальные системы транспортной безопасности, системы мониторинга живых объектов, системы поиска и идентификации видеоданных.

Список литературы

1. Audio-visual speech recognition based on regulated transformer and spatio-temporal fusion strategy for driver assistive systems / D. Ryumin, A. Axyonov, E. Ryumina, D. Ivanko, A. Kashevnik, A. Karpov // *Expert Systems with Applications*. 2024. 252(12). P.124159. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124159>.
2. Gupta S., Mamodiya U., Al-Gburi A. Speech Recognition-Based Wireless Control System for Mobile Robotics: Design, Implementation, and Analysis // *Automation*. 2025. 6(3). P.25. <https://doi.org/10.3390/automation6030025>.
3. Intelligent Human Operator Mental Fatigue Assessment Method Based on Gaze Movement Monitoring / A. Kashevnik, S. Kovalenko, A. Mamonov, B. Hamoud, A. Bulgin, V. Kuznetsov, I. Shoshina, I. Brak, G. Kiselev // *Sensors*. 2024. 24(21). P.6805. <https://doi.org/10.3390/s24216805>.
4. Gershman S.J., Bill J., Drugowitsch J. Hierarchical Vector Analysis of Visual Motion Perception // *Annual Review of Vision Science*. 2025. 11. P.411-422. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-110323-031344>.

5. Paragios N., Chen Y., Faugeras O., editors. *Mathematical Models in Computer Vision*. New York: Springer, 2005. P. 239-258.
6. Kesrarat D., Patanavijit V. Noise resistance evaluation of spatial-field optical flow using modifying Lorentzian function // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022; 11(5):2603-2610. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i5.3815>.
7. Liu H., Fach S., Steinebach M. Motion Vector based Robust Video Hash // *Proc. IS&T Int'l. Symp. on Electronic Imaging: Media Watermarking, Security, and Forensics*, 2020. P. 218-1–218-7. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2020.4.MWSF-218>.
8. Chang S., Wang R. Novel motion estimation algorithm for image stabilizer // *Engineering Computations*. 2017. 34(1). P.77-89. <https://doi.org/10.1108/EC-11-2015-0345>.
9. Методы поиска движения в видеопоследовательностях / М.Н. Фаворская, А.И. Пахирка, А.С. Шилов, М.В. Дамов // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2009. № 1-2. С. 69-73.
10. Chu Z., Li M. A Specific Algorithm Based on Motion Direction Prediction // *Complexity*. 2021. 2021. P. 6678596. <https://doi.org/10.1155/2021/6678596>.
11. Richardson I.E.G. *H.264 and MPEG-4 Video Compression*. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. P. 27-28.
12. Li D. Moving objects detection by block comparison // *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*. 2000. Vol. 1. P. 341-344.
13. Кулешов С.В., Зайцева А.А. Временной анализ кодеков H.264 // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60, № 11. С. 1092-1095.
14. Кулешов С.В. Гибридные кодеки и их применение в цифровых программируемых каналах передачи данных // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2012. Т. 10, №5. С.41-45.
15. Vector Bank Based Multimedia Codec System-on-a-Chip (SoC) Design / R.-X. Chen, W. Zhao, J. Fan, A. Davari // *2009 International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks*. 2009. P. 515-520. <https://doi.org/10.1109/I-SPAN.2009.74>.
16. Метод вычисления плотного оптического потока на ПЛИС в реальном времени / А.В. Братулин, М.Б. Никифоров, П.В. Беляков, Е.Ю. Холопов // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2019. Т.15, №2. С. 320-330. <https://doi.org/10.25559/SITITO.15.201902.320-330>.
17. Анализ динамики физиологического состояния продуктивных коров на основе видеомониторинга / В.Ю. Осипов, С.В. Кулешов, А.А. Зайцева, В.Н. Суровцев, В.В. Ачилов // *Сельскохозяйственная биология*. 2024. 59(6). С.1131-1144. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.6.1131rus>.
18. Комплексный подход к визуальной навигации по естественным ориентирам для БПЛА, работающих в условиях недоступности ГНСС / С.В. Кулешов, А.В. Кваснов, А.А. Зайцева, А.Л. Ронжин // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2025. №2. С.269-278.

19. Фахрутдинов Р.Ш., Мирин А.Ю. Изучение возможности использования векторов движения сжатого видеопотока для его идентификации // Труды учебных заведений связи. 2022. №8(1). С.57-64. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2022-8-1-57-64>.

References

1. Ryumin D., Axyonov A., Ryumina E., Ivanko D., Kashevnik A., Karpov A. Audio-visual speech recognition based on regulated transformer and spatio-temporal fusion strategy for driver assistive systems. *Expert Systems with Applications*. 2024; 252(12):124159. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124159>.
2. Gupta S., Mamodiya U., Al-Gburi A. Speech Recognition-Based Wireless Control System for Mobile Robotics: Design, Implementation, and Analysis. *Automation*. 2025; 6(3):25. <https://doi.org/10.3390/automation6030025>.
3. Kashevnik A., Kovalenko S., Mamonov A., Hamoud B., Bulygin A., Kuznetsov V., Shoshina I., Brak I., Kiselev G. Intelligent Human Operator Mental Fatigue Assessment Method Based on Gaze Movement Monitoring. *Sensors*. 2024; 24(21):6805. <https://doi.org/10.3390/s24216805>.
4. Gershman S.J., Bill J., Drugowitsch J. Hierarchical Vector Analysis of Visual Motion Perception. *Annual Review of Vision Science*. 2025; 11:411-422. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-110323-031344>.
5. Paragios N., Chen Y., Faugeras O. (eds.). *Mathematical Models in Computer Vision: The Handbook*. New York: Springer; 2005. P. 239-258.
6. Kesrarat D., Patanavijit V. Noise resistance evaluation of spatial-field optical flow using modifying Lorentzian function. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022; 11(5):2603-2610. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i5.3815>.
7. Liu H., Fach S., Steinebach M. Motion Vector based Robust Video Hash. In: *Proc. IS&T Int'l. Symp. on Electronic Imaging: Media Watermarking, Security, and Forensics*. 2020. P. 218-1-218-7. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2020.4.MWSF-218>.
8. Chang S., Wang R. Novel motion estimation algorithm for image stabilizer. *Engineering Computations*. 2017;34(1):77-89. <https://doi.org/10.1108/EC-11-2015-0345>.
9. Favorskaya M.N., Pakhirka A.I., Shilov A.S., Damov M.V. Motion search methods in video sequences. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva = Bulletin of the Siberian State Aerospace University. academician M.F. Reshetnev*. 2009;(1-2):69-73. (In Russ.)
10. Chu Z, Li M. A Specific Algorithm Based on Motion Direction Prediction. *Complexity*. 2021; 2021:6678596. <https://doi.org/10.1155/2021/6678596>.
11. Richardson I.E.G. *H.264 and MPEG-4 Video Compression*. Chichester: John Wiley & Sons; 2003. P. 27-28.
12. Li D. Moving objects detection by block comparison. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*. 2000. Vol. 1. P. 341-344.

13. Kuleshov S.V., Zaytseva A.A. Temporal analysis of H.264 codecs. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Priboroostroenie = News of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2017;60(11):1092-1095. (In Russ.)
14. Kuleshov S.V. Hybrid codecs and their application in digital programmable data transmission channels. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and control systems*. 2012;10(5):41-45. (In Russ.)
15. Chen R.-X., Zhao W., Fan J., Davari A. Vector Bank Based Multimedia Codec System-on-a-Chip (SoC) Design. In: *2009 International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks*. 2009. P. 515-520. <https://doi.org/10.1109/I-SPAN.2009.74>.
16. Bratulin A.V., Nikiforov M.B., Belyakov P.V., Kholopov E.Y. Method for computing dense optical flow on FPGA in real time. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern information technologies and IT education*. 2019; 15(2):320-330. (In Russ.). <https://doi.org/10.25559/SITITO.15.201902.320-330>
17. Osipov V.Y., Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Surovtsev V.N., Achilov V.V. Analysis of the dynamics of the physiological state of productive cows based on video monitoring. *Selskokhozyaistvennaya Biologiya = Agricultural Biology*. 2024;59(6):1131-1144. (In Russ.). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.6.1131rus>.
18. Kuleshov S.V., Kvasnov A.V., Zaytseva A.A., Ronzhin A.L. An integrated approach to visual navigation by natural landmarks for UAVs operating in GNSS-denied conditions. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie Nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences*. 2025;(2):269-278. (In Russ.)
19. Fakhrutdinov R.Sh., Mirin A.Y. Studying the possibility of using compressed video stream motion vectors for its identification. *Trudy Uchebnykh Zavedenii Svyazi = Proceedings of educational institutions of communication*. 2022; (8):57-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2022-8-1-57-64>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шальнев Илья Олегович, младший научный сотрудник лаборатории автоматизации научных исследований, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: shalnev.i@iias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9383-1089>

Аксенов Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории автоматизации научных исследований, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: a_aksenov@iias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3365-0056>

Ilya O. Shalnev, Junior Researcher of laboratory for research automation, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: shalnev.i@iias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9383-1089>

Alexey Yu. Aksenov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of laboratory for research automation, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: a_aksenov@iias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3365-0056>

УДК 338.364

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-216-230>

Математическая модель анализа данных запросов сервисного обслуживания и рекламаций предприятия

А.В. Быкова¹ ✉

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Вадковский пер., д.3а, г. Москва 127055, Российская Федерация

✉ e-mail: balabolik@mail.ru

Резюме

Цель исследования: повышение эффективности и контроля процессов производства путем выявления потенциальных скрытых рисков возникновения инцидентов и дефектов продукции предприятия на этапе постпроизводственной эксплуатации.

Методы. В данной статье рассматривается процесс автоматизированного интеллектуального анализа запросов сервисного обслуживания и рекламаций производственного предприятия. Данный процесс включает в себя анализ поступающих данных о произошедших инцидентах и дефектах продукции, и поиск причинно-следственных связей с производственными процессами различных этапах ЖЦИ. Запросы о произошедших дефектах и инцидентах продукции предварительно регистрируются в единой базе данных предприятия через CRM-систему и доступны для дальнейшего анализа. Для выполнения исследования разработана математическая модель анализа запросов сервисного обслуживания и рекламаций с применением факторного анализа.

Результаты. На основе математической модели выполнен практический анализ данных предприятия с выделением главных факторов. Расчеты выполнены с применением пакета статистической обработки данных STATISTICA. Физическая интерпретация полученных скрытых факторов позволяет объяснить происхождение ряда возникших инцидентов и дефектов продукции, предоставить экспертное заключение и принять меры по дальнейшей корректировке производственных процессов. Практическое применение разработанной математической модели выполнено в виде программного модуля, который внедряется в CRM-систему предприятия в качестве дополнительной компоненты для автоматизированной обработки данных.

Заключение. Для проведения регулярного контроля предварительно подготовленные данные запросов сервисного обслуживания и рекламаций поступают из CRM-системы на анализ. Разработанный программный модуль проводит автоматизированный анализ поступивших данных. Результаты анализа подвергаются физической интерпретации и используются для принятия обоснованных управленческих решений на предприятии, что позволяет проводить регулярный контроль существующих производственных процессов предприятия и вносить соответствующие корректировки для повышения эффективности производственных процессов.

Ключевые слова: сервис; рекламации; ремонт; факторный анализ; статистика; CRM-система.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Быкова А.В. Математическая модель анализа данных запросов сервисного обслуживания и рекламаций предприятия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(4): 216-230. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-216-230>.

Поступила в редакцию 23.07.2025

Подписана в печать 10.09.2025

Опубликована 22.12.2025

© Быкова А.В., 2025

Mathematical model of data analysis of service requests and complaints at an enterprise

Anna V. Bykova ¹ ✉

¹ Moscow State University of Technology "STANKIN"
Vadkovskii alleyway, 3a, Moscow 127055, Russian Federation

✉ e-mail: balabolik@mail.ru

Abstract

Purpose of research: improving the efficiency and control of production processes by identifying potential risks of incidents and product defects during post-production stage.

Methods. This article examines the analysis of service requests and complaints automated processing at an enterprise. This process includes the analysis of incoming data on product incidents and defects and the search for cause-and-effect relationships with production processes at various stages of the product life cycle. Requests about defects and product incidents are pre-registered in the unified database through the CRM-system and are available for further analysis. To carry out the research, a mathematical model for analyzing service requests and complaints using factor analysis was developed.

Results. Based on the mathematical model, a practical analysis of the enterprise's data was carried out and the main factors have been identified. The calculations were performed using the STATISTICA data processing package. The physical interpretation of the obtained factors makes it possible to explain the cause of incidents and defects, provide an expert opinion and to take measures on further production processes adjustments. The practical application of the developed mathematical model is carried out as the software module, which is implemented into the CRM system at an enterprise as an additional component for automated data processing.

Conclusion. The pre-prepared data of service requests and complaints is sent from the CRM system for analysis. The developed software module performs an automated analysis of the received data. The results of the analysis are physically interpreted and used to make management decisions at the enterprise, which allows regular monitoring of current production processes of the enterprise and make appropriate adjustments to improve the efficiency of production processes.

Keywords: service; complaints; repair process; factor loading; statistic; CRM-system.

Conflict of interest. The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Bykova A.V. Mathematical model of data analysis of service requests and complaints at an enterprise. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(4): 216-230 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-4-216-230>.

Received 23.07.2025

Accepted 10.09.2025

Published 22.12.2025

Введение

Целью исследования является повышение эффективности и контроля процессов производства, путем выявления

потенциальных скрытых рисков возникновения инцидентов и дефектов продукции на этапе постпроизводственной эксплуатации. По заключению специалистов в области проектирования и развития ав-

томатизированных систем основным направлением развития и поддержания конкурентоспособности промышленных предприятий является внедрение цифровых технологий и интеллектуальных систем [1, 2, 3].

Задачей разрабатываемого математического аппарата анализа данных является определение зависимостей между производственными процессами на этапах жизненного цикла изделия (далее ЖЦИ¹) [4, 5] и возникновением инцидентов и дефектов продукции, зафиксированных в CRM-системе предприятия в виде клиентских запросов сервисного обслуживания и рекламаций². [6, 7]. Выявленные зависимости позволяют выявить скрытые причины возникновения дефектов продукции и провести корректирующие мероприятия по их устранению.

Данный математический аппарат служит частью автоматизированной системы поддержки принятия управленческих решений [8] и позволяет вычислить

влияющие факторы для дальнейшего экспертного определения физической обоснованности полученных результатов, привязанных к реальной производственной ситуации.

Материалы и методы

При выполнении исследования используется методы математического моделирования, статистики, экспертно-аналитического, сравнительного и факторного анализа.

Возникновение инцидентов и дефектов продукции зависит от большого количества характеристик самой продукции, особенностей ее эксплуатации и обслуживания, среди которых напрямую сложно установить взаимосвязи. [9] При использовании CRM-системы в качестве единой точки входа, вся информация по запросам сервисного обслуживания размещается в стандартизированном виде в едином хранилище [10]. Параметрами запросов является перечень характеристик, среди которых можно выделить:

- наименование продукции;
- тип комплектующего оборудования;
- модель комплектующего оборудования;
- тип инцидента;
- детали инцидента;
- адрес установки (страна/регион/край/область/город);
- дата отгрузки продукции;
- наименование транспортной компании или данные водителей собственной службы доставки;

¹ Жизненный цикл изделия (жизненный цикл продукции) — последовательные и взаимосвязанные стадии системы жизненного цикла продукции от приобретения или производства из природных ресурсов или сырья до конечного размещения в окружающей среде (в виде отходов, сбросов и выбросов).

² Рекламация — письменное заявление потребителя по установленной форме поставщику изделия военной техники на обнаруженные в период действия гарантийных обязательств дефекты, несоответствия комплектности и/или другие несоответствия поставленного изделия военной техники, выполненной работы (оказанной услуги) установленным требованиям, а также требование об их устранении, восстановлении исправного состояния (замене) или укомплектованности дефектного изделия военной техники или повторном выполнении работы (оказания услуги).

- статус изделия (на гарантийном обслуживании/на постгарантийном обслуживании/истек срок гарантийного обслуживания);

- дата поступления запроса сервисного обслуживания;

- предоставленное решение по запросу сервисного обслуживания;

- трудоемкость по разрешению запроса сервисного обслуживания.

Список может быть расширен набором специфических характеристик конкретного предприятия, что определяет универсальность предложенной методики анализа данных клиентских запросов сервисного обслуживания и рекламаций. Это могут быть финансовые показатели стоимости продукции, затраты на ремонт, замену комплектующих по запросу сервисного обслуживания или производственные характеристики толщины и состава металла, типа крепления деталей, особенности обработки деталей при производстве, данные конструкторской документации, фамилии ответственных рабочих, конкретных сервисных инженеров или наименования производственных отделов.

По мнению исследователей, в этой области для таких ситуаций целесообразно применение методов многомерного статистического анализа, позволяющих найти решение подобных задач стандартными математическими подходами. Итоговым решением подобных задач служат многомерные массивы дискретных величин, выражающие зависимость искомой функции (управляющего

параметра) от определяющих параметров рассматриваемой задачи. На основе исходных статистических данных, предоставленных для анализа, с помощью многомерных статистических методов можно выбрать и обосновать выбор наиболее показательной, с точки зрения описания, математической модели.

Анализ многомерных данных – это совокупность методов и алгоритмов, позволяющих получить максимально возможную информацию о массиве числовых данных, расположенных в некоторой области многомерного пространства.

На основе изученных работ Буре-евой Н.Н., Бондарева А.Е., Ким Дж., Мюллера Ч. и научных статей авторов в области анализа многомерных данных [11, 12, 13, 14, 15] для рассматриваемой задачи выявления зависимостей между производственными процессами и множеством исходных параметров, целесообразным и необходимым считается отбор наиболее существенных параметров, поступивших в CRM-систему запросов сервисного обслуживания и рекламаций, для дальнейшего отбора и изучения минимально необходимого количества показателей. Выполнение отбора показателей производится методами снижения размерности, одним из которых является факторный анализ. Это позволит описать исследуемые данные, структуру и их взаимосвязи более точно и просто, так как для исследования будет взято меньшее количество факторов, чем количество показателей в первоначальной задаче. Выявленные факторы не являются непо-

средственными показателями исследуемых наблюдений, они не изменяются и не поступают в качестве входящих параметров наблюдений. Факторы еще называют скрытыми (латентными) переменными, имеющими связи с признаками поступающих в CRM-систему запросов сервисного обслуживания и рекламаций.

Представим в общем виде, что в рассматриваемую CRM-систему предприятия поступило n запросов на возникновение инцидентов по выпущенной продукции. В запросе сервисного обслуживания указаны значения p признаков поступивших инцидентов и получены значения случайных многомерных нормально распределенных величин. Для удобства будем считать исследуемые наблюдения X_1, X_2, \dots, X_n нормированными. Представим модель в виде матрицы наблюдений

$$X=(X_{ik}), \quad (1)$$

где X_{ik} – значение k -го признака для i -го запроса сервисного обслуживания (рекламации), поступившего в рассматриваемую CRM-систему.

$$X_i=(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip}), \quad (2)$$

где $i=1, 2, \dots, n$.

В изученной научной литературе для достижения эффективности использования выбранного математического аппарата рекомендуется исследовать количество наблюдений n , соответствующее числу рассматриваемых признаков p : $n \gg p$. Таким образом, количество анализируемых запросов n должно значительно превосходить количество признаков p , описывающих поступившие инциденты.

Для выполнения этого условия будем проводить анализ по запросам сервисного обслуживания, поступившим в CRM-систему за выбранный период времени.

Большое количество известных признаков p по каждому запросу сервисного обслуживания не позволяет построить наглядную корреляционную матрицу этих признаков и установить их взаимосвязи с производственными процессами.

Поэтому главной задачей проводимого факторного анализа считается снижение количества p исходных внешних признаков запросов и построение перехода к меньшему количеству искусственно построенных факторов m , что, в свою очередь, позволяет построить наиболее показательную систему зависимых скрытых факторов f_1, f_2, \dots, f_m , при условии, что $m < p$. Такие факторы принято называть общими или главными, которые непосредственно имеют выявленные зависимости с исходными признаками p . Применяя методы факторного анализа к настоящему исследованию, выявим гипотетические (ненаблюдаемые) факторы, призванные объяснить корреляционную матрицу количественных наблюдаемых показателей поступивших запросов сервисного обслуживания и объяснить их взаимосвязь с производственными процессами. В рамках решения поставленной задачи определения зависимостей большого количества признаков поступивших запросов сервисного обслуживания и производственных процессов, недостаточно установить факт существования меньшего числа скрытых

факторов. Для практического решения поставленной задачи необходимо непосредственно определить эти общие факторы и дать им содержательную интерпретацию.

Добавим условия наблюдений, выполнение которых обязательно для эффективного применения аппарата:

$$n \gg p.$$

Характерные факторы $e_{hi}=0$ для i -го запроса сервисного обслуживания, где h – порядковый номер характерного фактора. Факторы e_{hi} одновременно влияют только на одну переменную и не представляют физической ценности для дальнейшего исследования;

Факторы погрешности $e_{si}=0$ для i -го запроса сервисного обслуживания, где s – порядковый номер фактора погрешности. Такие факторы включают в себя погрешность выполняемых наблюдений, поэтому не имеют конкретного значения и могут быть случайными.

Построим практическую модель факторного анализа исследуемого нормированного наблюдения, учитывающего данные каждого запроса сервисного обслуживания в установленный период наблюдения и запишем в виде

$$x_{ik} = a_{1k}f_{i1} + a_{2k}f_{i2} + \dots + a_{jk}f_{ij} + \dots + a_{(m-1)k}f_{i(m-1)} + a_{mk}f_{im} = \sum_{j=1}^m a_{jk}f_{ij}, \quad (3)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ – порядковый номер запроса сервисного обслуживания, поступившего в рассматриваемую CRM-систему; $k=1, 2, \dots, p$ – порядковый номер

признака рассматриваемого запроса сервисного обслуживания; n – количество исследуемых запросов; p – количество признаков, характерных для каждого запроса; m – количество общих факторов; f_j – общие факторы, которые влияют на несколько переменных x_i поступающих запросов одновременно, где $j=1, 2, \dots, m$; a_{jk} – нагрузка фактора j на признак k (факторная нагрузка).

В табл. 1 представлена в общем виде матрица нагрузок на признаки рассматриваемых запросов сервисного обслуживания и рекламаций исследуемого производственного предприятия.

Факторные нагрузки – это значения коэффициентов корреляции каждого из исходных признаков запроса с каждым из выявленных искусственно-построенных факторов.

В матричном виде модель выглядит как

$$X=AF, \quad (4)$$

где $A = a_{jk}$ – прямоугольная $m \times p$ матрица нагрузок общих факторов на исследуемые признаки поступающих запросов, связывающих исследуемые наблюдения x_i со скрытыми общими факторами $f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_m$.

Величина значения факторной нагрузки объясняется уровнем связи признака запросов с рассматриваемым фактором. Чем больше значение, тем плотнее связь, и чем меньше значение, тем менее выражена связь признака с фактором.

Таблица 1. Матрица нагрузок на признаки запросов сервисного обслуживания и рекламаций**Table 1.** The matrix of loading on the parameters of service requests and complaints

	Наименование продукции/Product name $k = 1$	Тип комплектующего оборудования/type of component equipment $k = 2$	Модель комплектующего оборудования/model of component equipment $k = 3$	Тип инцидента/incident type $k = 4$	Детали инцидента/incident details $k = 5$	Адрес установки/address $k = 6$	Решение по запросу/settlement of request $k = 7$	Дата отгрузки/shipment date $k = 8$	Транспортная компания/transport company $k = 9$	Статус изделия/product status $k = 10$	Дата запроса/CO/request data $k = 11$	Трудоемкость по разрешению запроса/labour input $k = 12 = p$
Фактор/factor f_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{110}	a_{111}	a_{112}
Фактор/factor f_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	a_{28}	a_{29}	a_{210}	a_{211}	a_{212}
Фактор/factor f_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}	a_{37}	a_{38}	a_{39}	a_{310}	a_{311}	a_{312}
...
Фактор/factor f_j	a_{j1}	a_{j2}	a_{j3}	a_{j4}	a_{j5}	a_{j6}	a_{j7}	a_{j8}	a_{j9}	a_{j10}	a_{j11}	a_{j12}
...
Фактор/factor f_m	a_{m1}	a_{m2}	a_{m3}	a_{m4}	a_{m5}	a_{m6}	a_{m7}	a_{m8}	a_{m9}	a_{m10}	a_{m11}	a_{m12}

Факторная нагрузка может обозначать прямую и обратную связь признака с выявленным фактором, что показывает знак «+» или «-» перед полученным значением. Анализируя полученную матрицу с рассчитанными значениями исследуемого наблюдения, можно сделать заключение о перечне признаков, которые вносят максимальный вклад в формирование каждого фактора, такие значения обозначают вес признака [16].

Результаты и их обсуждение

Анализ многомерных данных является одним из основных направлений

развития прикладной математики в последние двадцать лет [17]. Задача анализа данных в многомерном пространстве, а не в двух- или трехмерном, потребовала создания узкопрофильных программных реализаций. Рассматривая существующие программные пакеты статистической обработки данных, можно выделить STATISTICA, STATGRAPHICS, STADIA, SPSS. Перечисленные средства имеют штатные возможности автоматизации применения наиболее известных методов статистического анализа, таких как факторный анализ, кластерный анализ, регрессионный анализ, многомерный анализ, и др.

В соответствии с полученной математической моделью исследуемых наблюдений за возникающими инцидентами выпущенной продукции, для решения поставленной задачи факторного анализа большого количества исходных признаков поступивших запросов сервисного обслуживания выполнено программное решение в системе STATISTICA [18].

Данный подход был использован при выполнении работ по повышению эффективности деятельности объединенного сервисного центра предприятия металлообработки и производства многокомпонентной сборочной продукции, производящее устройства банковского самообслуживания, кассовые счетные машины и роботов-манипуляторов.

Рассмотрим данные по поступившим запросам сервисного обслуживания в CRM-систему предприятия за месяц – декабрь 2024 года.

В качестве исходных показателей взяты статистически независимые признаки запросов, что облегчает их физическую интерпретацию. Значения параметров имеют формат текста, целых и дробных чисел, даты. Для проведения статистического анализа значениям признаков надо присвоить цифровые значения. Для этого построим таблицы соответствия для кодирования данных запросов. Установим диапазон значения для каждого признака, исходя из физической интерпретации признаков:

- наименование продукции (данному показателю были присвоены цифровые значения от 1 до 40);

- тип комплектующего оборудования (от 1 до 24);

- модель комплектующего оборудования (от 1 до 250);

- тип инцидента или дефекта выпущенной продукции (от 1 до 15);

- детали инцидента или дефекта выпущенной продукции (от 1 до 100);

- адрес установки (от 1 до 90);

- решение по запросу (от 1 до 30);

- дата отгрузки изделия клиенту (данному показателю были присвоены фактические значения даты отгрузки изделия клиенту в формате даты ДД.ММ.ГГГГ);

- транспортная компания (от 1 до 10);

- статус изделия (от 1 до 3 в зависимости от условий обслуживания данного устройства);

- дата запроса сервисного обслуживания (данному показателю были присвоены фактические значения даты поступления запроса сервисного обслуживания в CRM-систему в формате даты ДД.ММ.ГГГГ);

- трудоемкость запроса сервисного обслуживания (данному показателю были присвоены фактические временные значения трудозатрат, потраченных на разрешения данного обращения в часах – может принимать не целое значение).

При построении матрицы нагрузок общих факторов, максимальное количество факторов соответствует количеству признаков запросов сервисного обслуживания предприятия. С увеличением числа факторов существенно возрастают трудности их физической интерпретации. Для рассматриваемых на-

блюдений получено 12 факторов. Определим количество общих факторов, которые следует оставить для проведения дальнейшего анализа. Для этого применим факторный анализ методом выделения главных компонент.

На рис. 1 представлены результаты расчетов численных значений полученных факторных нагрузок в системе

STATISTICA, являющиеся значением коэффициента корреляции каждой из переменных с каждым из выявленных факторов.

Значения, близкие к 0, не несут смысловой нагрузки при дальнейшем анализе, такие показатели можно игнорировать при рассмотрении связи с конкретным фактором.

Factor Loadings (Unrotated) (Spreadsheet1.sta) Extraction: Principal components (Marked loadings are > ,700000)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Наим	-0,348113	-0,540842	0,332792	-0,265655
Тип компл	0,784982	-0,539344	0,053880	-0,082098
Модель компл	0,791453	-0,525865	0,046031	-0,081152
Тип инц	-0,382316	0,076461	-0,312519	-0,181894
Детали инц	-0,054027	0,597477	0,071341	0,427413
Адрес	-0,221895	-0,008092	0,161085	-0,809354
Решение	-0,338673	-0,484686	0,297202	0,364420
Дата отгр	0,626647	0,527760	0,294704	-0,250800
Тр комп	0,004352	-0,135188	0,720054	0,379581
Статус	-0,388283	-0,533240	-0,596943	0,208045
Дата запр	-0,618528	-0,039698	0,495036	-0,025341
Трудоем	-0,522282	0,028469	0,106270	-0,295226
Expl. Var	2,875623	2,041284	1,550831	1,425587
Prp. Totl	0,239635	0,170107	0,129236	0,118799

Рис. 1. Факторные нагрузки без вращения

Fig.1. Factor Loading (Unrotated)

Значение факторной нагрузки, большее 0,7, показывает, что данный признак тесно связан с рассматриваемым фактором. Чем теснее связь данного признака с рассматриваемым фактором, тем выше значение факторной нагрузки.

При проведении анализа рассчитанных в системе STATISTICA факторных нагрузок выявлены сложности с интерпретацией 2-ого фактора. Для таких ситуаций в исследуемой литературе

по проведению факторного анализа с помощью программных средств рекомендовано прибегнуть к повороту осей, с целью получения решения, которое можно интерпретировать в исследуемой предметной области. Проведя эксперимент с применением различных поворотов оси для нормализованных и исходных (ненормализованных) факторов: Varimax (Варимакс), Biquartimax (Биквартимакс), Quartimax (Квартимакс) и

Equamax (Эквимакс) получим схожие значения (в пределах изменения 0,02) по каждому фактору. На рис. 2 представлен результат вращения исходных факторов поворотом оси Varimax (Варимакс).

Практическое применение выполнено в виде программного модуля аналитического блока автоматизированного интеллектуального анализа данных для интеграции с эксплуатируемой CRM-системой предприятия.

Factor Loadings (Varimax raw) (Spreadsheet1.sta)				
Extraction: Principal components				
(Marked loadings are > ,700000)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Наим	0,086145	0,291809	0,429387	-0,563977
Тип компл	0,954683	-0,070692	0,010657	0,014205
Модель компл	0,951296	-0,078519	-0,001391	0,022463
Тип инц	-0,335195	0,250421	-0,267911	-0,189531
Детали инц	-0,445059	-0,301926	0,041998	0,506625
Адрес	-0,098003	-0,168656	-0,129536	-0,821873
Решение	0,004862	0,423150	0,625566	0,018398
Дата отгр	0,192213	-0,867331	-0,170579	0,051593
Тр комп	0,063106	-0,188600	0,788587	0,139402
Статус	-0,002046	0,899923	-0,149259	0,050889
Дата запр	-0,452323	0,066163	0,554702	-0,336434
Трудоем	-0,400571	0,107382	0,082610	-0,439577
Expl.Var	2,549851	2,071289	1,653904	1,618281
Prp.Totl	0,212488	0,172607	0,137825	0,134857

Рис. 2. Факторные нагрузки с применением вращения

Fig. 2. Factor Loading (Varimax raw)

Для интерпретации результатов необходимо воспользоваться методом экспертного анализа специалиста, погруженного в специфику исследуемого предприятия, и рассмотреть признаки с наибольшей корреляцией, обозначенные на рис. 1 и 2 красным цветом. Интерпретация факторов представляет собой многоэтапный процесс. Далее приведен пример результатов интерпретации 1-го фактора.

Первый фактор представляет собой фактор влияния производителя комплектующего оборудования на частоту возникновения запросов сервисного обслуживания.

В качестве управленческого решения инициировано изменение технологического процесса комплектации выпускаемой продукции устройствами, более устойчивыми в эксплуатации и сужение вариативности модельного ряда комплектующего оборудования.

Выводы

Физическая интерпретация, предоставляющая доказательное объяснение и расшифровку полученных значений, позволяет установить зависимости с процессами на этапах ЖЦИ и принять меры по корректировке и совершенствованию су-

ществующих процессов. Интерпретация полученных данных позволяет прогнозировать дальнейшее развитие ситуации с высокой долей достоверности. Проведенное исследование было выполнено с применением системы STATISTICA, позволяющее реализовать данные математического аппарата и выполнить визуализацию и документирование результатов, характеризующих процессы сервисного обслуживания предприятия и установить их взаимосвязи с производственными процессами.

Разработанная математическая модель анализа данных запросов сервисного обслуживания позволяет выделить ключевые скрытые характеристики поступающих запросов, установить зависимости с производственными процессами и осознанно влиять на эффективность этих процессов

С увеличением объема анализируемой информации происходит корректировка результатов анализа, уточнение и изменение структуры преобладающих факторов, что обеспечивает динамический контроль и постоянство совершенствования процессов в перспективе. Применяемая методика факторного анализа позволяет обнаружить искажение корреляционных связей между параметрами значительно раньше, чем изменение одного параметра. Таким образом можно обнаружить возникновение нарушений производственных процессов (снижение эффективности процессов) на ранней стадии, которое часто невозможно заме-

тить путем непосредственного наблюдения за признаками объекта. Чтобы применять факторный анализ в исследованиях предприятия достаточно организовать процедуру накопления и хранения массивов данных за продолжительный период, что полностью обеспечивает CRM-система при работе с запросами пользователей выпускаемой продукции [19, 20].

В исследованиях Буреевой Н.Н. лаконично формализована основная идея факторного анализа:

«- Сущность вещей заключена в их простых и многообразных проявлениях, которые могут быть объяснены с помощью комбинации нескольких основных факторов.

- Общая сущность наблюдаемых вещей постигается через бесконечное приближение.».

Взяв за основу вышеприведенные утверждения, было выполнено исследование процесса анализа данных этапа постпроизводственного сопровождения продукции методом факторного анализа. Получена модель взаимосвязи возникающих инцидентов и дефектов продукции, которыми в системе являются запросы клиентов, и причин их возникновения. Взаимосвязи с производственными процессами позволяют выявить источник возникновения появившихся событий, что имеет большую ценность для теоретического исследования и для дальнейшего практического применения при оптимизации производственных процессов предприятия.

Список литературы

1. Управление устойчивым развитием промышленности в условиях цифровизации / В.Н. Андреев, В.В. Баранов, А.А. Бурдина, С.В. Лукина, Е.Д. Коршунова, А.А. Око-ракова, Е.Б. Фролов. М.: Янус-К, 2022. 119 с.
2. Крючкова Е.В., Можаровская А.А., Тохунц Н.Б. Реструктуризация предприятия. М.: Янус-К, 2023. 120 с.
3. Колошкина И.Е., Капитанов А.В., Феофанов А.Н. Эффективность применения автоматизированной интеллектуальной системы для формирования технологической документации // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2024. №1(193). С. 50-57.
4. Мешков В.Г. Определение взаимосвязей между процессами в условиях автоматизации производственных систем предприятия // Вестник МГТУ "Станкин". 2023. № 2(65). С. 105-109. https://doi.org/10.47617/2072-3172_2023_2_105
5. Egorov S., Kapitanov A., Kozlova A. Application problems of process capability evaluation methods in modern quality assurance systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09-13 sept. 2019. Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 033054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033054>
6. Быкова А.В., Капитанов А.В. Принципы взаимодействия автоматизированной системы взаимоотношений с клиентами и АС предприятия на различных этапах жизненного цикла продукции // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2023. №1 (64). С.15-21
7. Быкова А.В., Капитанов А.В. Анализ CRM-систем и формирование структуры архитектурного решения автоматизированной CRM-системы для машиностроительного производства // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2024. №1 (68). С.129-137
8. Bykova A.V., Pozdnyak Y. Algorithmization of Automation and Service Management Processes of an Industrial Enterprise // Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (QM&TIS&IT), 2024. P.155-159.
9. Корочкина С.В., Долженкова А.В. Оптимизация бизнес-процесса «Управление рекламациями» с целью повышения удовлетворенности клиентов // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2020. №6. С.247-252.
10. Быкова А.В., Бекмешов А.Ю. Формализация бизнес-процессов предприятия при моделировании автоматизированной системы управления взаимоотношениями с клиентами // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024 № 1 (23). С. 33-41. <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2024-1-33-41>
11. Бабаев Р.Н., Бессчётнова Н.Н., Бессчётнов В.П. Многопараметрический анализ пигментного состава листового аппарата представителей рода *Betula L.* // Вестник По-

волжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. №3 (59). С.42-54. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.3.42>

12. Гончаренко С.Н., Лачихина А.Б. Мониторинг инцидентов безопасности геоинформационной системы управления и контроля деятельности промышленного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. №3. С. 108-116. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_3_0_108

13. Multivariate framework for introspecting the motivational factors for satisfaction in HR profession / M.R. Chaki, Guha Banhi, Biswas Sanjib, et al. // Vojnotehnički glasnik. Military technical courier. 2024. Vol. 72, is. 2. P. 651-675. <https://doi.org/10.5937/vojtehg72-48661>

14. Шнякина Е.А., Костин В.Н. Разработка алгоритмического обеспечения принятия решений по идентификации типовых нарушителей категорируемым объектам // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. №3. С. 72-82. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-3-5>

15. Гаврильев Э.И., Авдеенко Т.В. Структурная модель оценки квалификации ИТ-специалистов на основе интеллектуального анализа данных информационных систем // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17, №4. С. 15-33. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-4-15-33>.

16. Афонин П.Н., Афонин Д.Н. Статистический анализ с применением современных программных средств. СПб.: ИЦ «Интермедия», 2017. 100 с.

17. Козлова А.В. Разработка алгоритма цифровой обработки данных с целью осуществления анализа полученных результатов, прогнозирования качества и их последующее внедрение в другие задачи с необходимой адаптацией // Вестник МГТУ Станкин. 2021. №1(56). С. 59-63.

18. Исследование показателей эффективности информационных систем с помощью программы STATISTICA / Е.М. Баранова, А.Н. Баранов, С.Ю. Борзенкова, Н.В. Кулешова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 10. С. 199-205. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-199-205>

19. Raiko D., Abdunurova A. Defining a selection procedure of CRM systems for the information-analytical support to the marketing activities at an enterprise // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Is. 13 (127). P. 41-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298301>

20. Быкова А.В., Карлова Т.В. Выявление оптимальных параметров для оценки эффективности внедрения на предприятии системы управления взаимоотношениями с клиентами // Качество. Инновации. Образование. 2023. №3 (185). С. 25-32.

References

1. Andreev V.N., Baranov V.V., Burdina A.A., Lukina S.V., Korshunova E.D., Okorakova A.A., Frolov E.B. Managing the sustainable development of industry in the context of digitalization. Moscow: Janus-K; 2022. 119 p. (In Russ.)

2. Kryuchkova E.V., Mozharovskaya A.A., Tohunc N.B.. Enterprise restructuring. Moscow: Yanus-K; 2023. 120 p. (In Russ.).
3. Koloshkina I.E., Kapitanov A.V., Feofanov A.N. The effectiveness of the automated intelligent system for the formation of technological documentation. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2024; (1): 50-57 (In Russ.)
4. Meshkov V.G. Identification of interrelations between processes in the context of automation of production systems of the enterprise. *Vestnik MGTU "Stankin" = Bulletin of MSTU "Stankin"*. 2023; (2): 105-109. (In Russ.). https://doi.org/10.47617/2072-3172_2023_2_105
5. Egorov S., Kapitanov A., Kozlova A. Application problems of process capability evaluation methods in modern quality assurance systems. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019*. Sevastopol: Institute of Physics Publishing; 2020. 033054 p. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033054>
6. Bykova A.V., Kapitanov A.V. Principles of interaction of the automated customer relationship system and the company's automated control system at various stages of the product lifecycle. *Vestnik MGTU «STANKIN» = Bulletin of MSTU "Stankin"*. 2023; (1): 15-21. (In Russ.)
7. Bykova A.V., Kapitanov A.V. Analysis of CRM systems and formation of the architectural solution structure of an automated CRM system for machine-building production. *Vestnik MGTU «STANKIN» = Bulletin of MSTU "Stankin"*. 2024; (1): 129-137. (In Russ.).
8. Bykova A.V., Pozdnyak Y. Algorithmization of Automation and Service Management Processes of an Industrial Enterprise. In: *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (QM&TIS&IT)*, 2024. P.155-159.
9. Korochkina S.V., Doljenkova A.V. Optimization of the Complaints Management business process in order to increase customer satisfaction. *Vestnik Altajskoj Akademii Jekonomiki i Prava = Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2020; (6): 247-252. (In Russ.)
10. Bykova A.V., Bekmeshov A.Ju. Formalization of business processes of an enterprise when modeling an automated customer relationship management system. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovaniii i upravlenii = Automation and Modeling in Design and Management*. 2024; (1): 33-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2024-1-33-41>
11. Babaev R.N., Besschyotnova N.N., Besschyotnov V.P. A multiparametric analysis of the pigment composition of the leaf apparatus of representatives of the genus *Betula* L. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Les. Ecology. Environmental management*. 2023; (3): 42-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.3.42>
12. Goncharenko S.N., Lachihina A.B. Monitoring of security incidents of the geoinformation management and control system of an industrial enterprise. *Gornyi informacionno-analiticheskij byulleten = Mining Information and Analytical Bulletin*. 2022; (3): 108-116. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_3_0_108

13. Chaki M.R., Guha Banhi, Biswas Sanjib, et al. Multivariate framework for introspecting the motivational factors for satisfaction in HR profession. *Vojnotehnički glasnik. Military technical courier*. 2024. 72(2): 651-675. <https://doi.org/10.5937/vojtechg72-48661>
14. Shnyakina E.A., Kostin V.N. Development of algorithmic support for decision-making on identification of typical violators of categorized objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. The Volga region. Technical sciences*. 2023; (3): 72-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-3-5>
15. Gavriliev E.I., Avdeenko T.V. A structural model for assessing the qualifications of IT specialists based on data mining of information systems. *Vestnik SibGUTI = Bulletin of SibGUT*. 2023; 17(4): 15-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-4-15-33>
16. Afonin P.N., Afonin D.N. Statistical analysis using modern software tools. St. Petersburg: IC "Intermedia"; 2017. 100 p. (In Russ.)
17. Kozlova A.V. Development of an algorithm for digital data processing in order to analyze the results obtained, predict quality and their subsequent implementation in other tasks with the necessary adaptation. *Vestnik MGTU Stankin = Bulletin of MSTU Stankin*. 2021; (1): 59-63 (In Russ.).
18. Baranova E.M., Baranov A.N., Borzenkova S.Yu., Kuleshova N.V. Research of information system performance indicators using the STATISTICA program. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical science*. 2022; (10): 199-205. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-199-205>
19. Raiko D., Abdunurova A. Defining a selection procedure of CRM systems for the information-analytical support to the marketing activities at an enterprise. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024; (13): 41-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298301>
20. Bykova A.V., Karlova T.V. Identification of optimal parameters for evaluating the effectiveness of the company's implementation of a customer relationship management system. *Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie = Quality. Innovations. Education*. 2023;(3): 25-32 (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Быкова Анна Владимировна, аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: balabolik@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6865-231X>

Anna V. Bykova, Post-Graduate Student, sub-department «Automated information processing and management systems», Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: balabolik@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6865-231X>

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. Публикация бесплатная.

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: <https://science.swsu.ru/>, 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://science.swsu.ru>.