



RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и нанoeлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств. Управление в организационных системах*

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества



RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
 - Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
 - Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
 - Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
 - Аналитическое приборостроение и технологии
 - Математическое моделирование
 - Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах
 - Управление качеством продукции. Стандартизация
 - Мировоззренческие основы технологии и общества
- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
 - Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and nondestructive testing
 - Modern radio engineering and telecommunication systems
 - Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
 - Analytical instrument engineering and technology
 - Mathematical modeling
 - Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems
 - Product quality management. Standardization
 - Philosophical foundations of technology and society

Russian Technological Journal
2025, том 13, № 5

Russian Technological Journal
2025, Vol. 13, No. 5

Дата опубликования 30 сентября 2025 г.

Publication date September 30, 2025.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

The peer-reviewed scientific and technical journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Периодичность: 6 раз в год.

Periodicity: six times a year.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 г. издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026), а с января 2016 г. по июль 2021 г. под названием «Российский технологический журнал» (ISSN 2500-316X).

The journal was founded in December 2013. The titles were «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026) and «Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal» from January 2016 until July 2021 (ISSN 2500-316X).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» 119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution of Higher Education
«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук, входит в RSCI, РГБ, РИНЦ, eLibrary, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation. The Journal is included in Russian Science Citation Index (RSCI), Russian State Library (RSL), Science Index, eLibrary, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, президент ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, President of MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор А.С. Алексеенко
Технический редактор Д.В. Трофимова
119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Р-108.
Тел.: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Editorial staff:

Managing Editor Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennady V. Kulikov
Executive Editor Anna S. Alekseenko
Technical Editor Darya V. Trofimova
86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 81733 от 19.08.2021 г. СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

The registration number ПИ № ФС 77 - 81733 was issued in August 19, 2021 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media of Russia.

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

<https://www.rtj-mirea.ru>

Редакционная коллегия

- Кудж Станислав Алексеевич** д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Банис Юрас Йонович** хабилитированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Бетелин Владимир Борисович** академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Боков Алексей Алексеевич** д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Вахрушев Сергей Борисович** д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Гуляев Юрий Васильевич** академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Жуков Дмитрий Олегович** д.т.н., профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Кимель Алексей Вольдемарович** к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Крамаров Сергей Олегович** д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Новиков Дмитрий Александрович** академик РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>, novikov@ipu.ru
- Перно Филипп** Dr. Sci. (Electronics), профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Романов Михаил Петрович** д.т.н., профессор, научный руководитель Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Савиных Виктор Петрович** академик РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Соболевский Андрей Николаевич** д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, <http://orcid.org/0000-0002-3082-5113>, sobolevski@iitp.ru
- Сюй Ли Да** академик Европейской академии наук, Российской инженерной академии и Инженерной академии Армении, Dr. Sci. (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, <https://orcid.org/0000-0002-5954-5115>, lxu@odu.edu
- Харин Юрий Семенович** академик Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Чаплыгин Юрий Александрович** академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
- Шпак Василий Викторович** к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

- Stanislav A. Kudzh** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Juras Banys** Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Vladimir B. Betelin** Academician at the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Alexei A. Bokov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Sergey B. Vakhrushev** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Yury V. Gulyaev** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academic Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Dmitry O. Zhukov** Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Alexey V. Kimel** PhD (Phys.-Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Sergey O. Kramarov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Dmitry A. Novikov** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>, novikov@ipu.ru
- Philippe Pernod** Dr. Sci. (Electronics), Professor, Dean of Research of Centrale Lille, Villeneuve-d'Ascq, France. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Mikhail P. Romanov** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic Supervisor of the Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Viktor P. Savinykh** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Andrei N. Sobolevski** Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director of Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Moscow, Russia. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, <http://orcid.org/0000-0002-3082-5113>, sobolevski@iitp.ru
- Li Da Xu** Academician at the European Academy of Sciences, Russian Academy of Engineering (formerly, USSR Academy of Engineering), and Armenian Academy of Engineering, Dr. Sci. (Systems Science), Professor and Eminent Scholar in Information Technology and Decision Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA, the United States of America. Scopus Author ID 13408889400, <https://orcid.org/0000-0002-5954-5115>, lxu@odu.edu
- Yury S. Kharin** Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Yuri A. Chaplygin** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Departments of Nanotechnology and Information Technology of the RAS, President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
- Vasily V. Shpak** Cand. Sci. (Econ.), Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia; Associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *Zaid Arafat, Olga V. Yudina, Zainab A. Abdulazeez*
Generative adversarial networks in cyber security: Literature review
- 25** *В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, М.Г. Огур, Г.И. Линец, В.П. Мочалов*
Имитационная модель масштабируемого метода выявления многовекторных атак с учетом ограничений вычислительных и информационных ресурсов IoT-устройств
- 41** *Д.В. Жматов, А.С. Леонтьев*
Анализ процессов передачи информации в многомодовых оптоволоконных сетях с маркерным методом доступа

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 51** *Н.Р. Левченко, М.С. Костин*
Анализ временных программно-аппаратных задержек в схемах аудиомодулей с киберфизической SPICE-эмуляцией
- 63** *Г.В. Коняшкин, Г.В. Куликов*
Режекция нефлуктационных помех с помощью адаптивного фильтра на основе анализа огибающей спектра
- 75** *А.В. Ксендзук, И.А. Кузнецов*
К вопросу выбора критериев качества алгоритмов планирования наблюдений за космическими аппаратами

Математическое моделирование

- 87** *М.М. Закатов*
Аналитическая модель нормальной составляющей магнитной индукции постоянного магнита
- 95** *А.И. Попов, А.В. Еремин*
Исследование теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой на основе гироида
- 104** *С.Е. Савотченко, В.А. Захаров*
Моделирование теплофизических процессов в нефтяном пласте при прогреве в остановленной скважине

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах

- 119** *В.В. Сидорин*
Оценка проекта на основе теории нечетких множеств и концепции нечеткой логики. Метод и методика

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Zaid Arafat, Olga V. Yudina, Zainab A. Abdulazeez*
Generative adversarial networks in cyber security: Literature review
- 25** *Vyacheslav I. Petrenko, Fariza B. Tebueva, Maxim G. Ogur, Gennady I. Linets, Valery P. Mochalov*
Simulation model of a scalable method for detecting multi-vector attacks taking into account the limitations of computing and information resources of IoT devices
- 41** *Dmitry V. Zhmatov, Alexander S. Leontyev*
Analysis of information transmission processes in multimode fiber-optic networks with a token-based access method

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 51** *Nikita R. Levchenko, Mihail S. Kostin*
Analysis of time software and hardware delays in audio module circuits with cyber-physical SPICE emulation
- 63** *Georgy V. Konyashkin, Gennady V. Kulikov*
Non-fluctuation interference rejection using an adaptive filter based on spectrum envelope analysis
- 75** *Alexander V. Ksendzuk, Ivan A. Kuznetsov*
Optimization criterion for spacecraft observation planning algorithms

Mathematical modeling

- 87** *Mikhail M. Zakatov*
Analytical model for the normal component of magnetic induction of a permanent magnets
- 95** *Andrey I. Popov, Anton V. Eremin*
Heat transfer in a porous medium having an ordered gyroid-based macrostructure
- 104** *Sergey E. Savotchenko, Vasily A. Zakharov*
Modeling of thermophysical processes in an oil reservoir during heating in a stopped well

Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries.

Management in organizational systems

- 119** *Viktor V. Sidorin*
Evaluation of the project based on the theory of fuzzy sets and the concept of fuzzy logic. Method and methodology

УДК 004.056:004.8

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-7-24>

EDN ISXHGA



REVIEW ARTICLE

Generative adversarial networks in cyber security: Literature review

Zaid Arafat ^{1, @},
Olga V. Yudina ²,
Zainab A. Abdulazeez ¹

¹ University of Kerbala, Karbala, 5600 Iraq

² Cherepovets State University, Cherepovets, 162600 Russia

@ Corresponding author, e-mail: zaid.q@uokerbala.edu.iq

• Submitted: 26.01.2025 • Revised: 28.04.2025 • Accepted: 28.07.2025

Abstract

Objectives. This review article sets out to evaluate the use of Generative Adversarial Networks (GANs) to revolutionize cybersecurity and anomaly detection process. The research focuses in particular on the capabilities of GANs to produce synthetic data and simulate adversarial attacks, as well as identifying outliers and resolving training, instability, and ethical issues.

Methods. A systematic review of relevant peer-reviewed articles spanning 2014 through 2024 was undertaken.

Results. The discussion concentrated on two main areas of GAN application: (1) cybersecurity through intrusion detection and adversarial testing; (2) anomaly detection for medical diagnostics and surveillance purposes. The research studied two essential GAN variants named Wasserstein GANs and Conditional GANs for their performance in addressing technical challenges. The assessment of synthetic data quality used the Fréchet Inception Distance and Structural Similarity Index Measure as evaluation metrics.

Conclusions. GANs enhance security measures through their production of caused datasets resulting in a 25% improvement of detection systems accuracy. The technique allows strong adversarial assessment to reveal system weaknesses while helping detect irregularities in data-poor areas for medical diagnostics. High-dimensional tasks demonstrate 40% training instability and lead to 30% output diversity loss. The need for regulatory frameworks becomes essential due to ethical issues, which include the use of deepfakes that result in 25% success rates of biometric system evasion. Given ethical rules regulating their proper use, GANs advance cybersecurity by providing anomaly detection simultaneously with improved training stability and lower operating expenses. Prior versions of GAN-reinforcement learning and additional transparent systems require focused development as part of responsible innovation efforts.

Keywords: generative adversarial networks, cybersecurity, anomaly detection, synthetic data generation, adversarial attacks, Wasserstein GANs

For citation: Arafat Z., Yudina O.V., Abdulazeez Z.A. Generative adversarial networks in cyber security: Literature review. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):7–24. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-7-24>, <https://www.elibrary.ru/ISXHGA>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Генеративные состязательные сети в кибербезопасности: обзор литературы

З. Арафат^{1, @},
О.В. Юдина²,
З.А. Абдулазиз¹

¹ Университет Кербалы, Кербала, 56001 Ирак

² Череповецкий государственный университет, Череповец, 162600 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: zaid.q@uokerbala.edu.iq

• Поступила: 26.01.2025 • Доработана: 28.04.2025 • Принята к опубликованию: 28.07.2025

Резюме

Цели. Основной целью обзора является оценка изменений кибербезопасности и методов обнаружения аномалий в результате действия генеративно-состязательных сетей (ГСС). В исследовании анализируются возможности ГСС при генерации синтетических данных, моделировании состязательных атак, выявлении выбросов, а также решении проблем нестабильности обучения и этических вопросов.

Методы. Проведено систематическое исследование на основе научных статей, охватывающих период с 2014 по 2024 гг.

Результаты. Обсуждение сосредоточено на двух основных областях применения ГСС: обеспечении кибербезопасности посредством обнаружения вторжений и проведения состязательного тестирования, а также обнаружении аномалий в целях медицинской диагностики и мониторинга. Исследованы два ключевых варианта ГСС – вассерштейновские ГСС и условные ГСС – с точки зрения их эффективности в решении технических задач. При оценке качества синтетических данных использованы две метрики: расстояние Фреше и показатель структурного сходства.

Выводы. ГСС улучшают безопасность за счет генерации специализированных наборов данных, что приводит к повышению точности систем обнаружения на 25%. Метод позволяет проводить углубленную состязательную оценку для выявления слабых мест систем, а также способствует обнаружению нарушений в областях с дефицитом данных для медицинской диагностики. Высокоразмерные задачи демонстрируют 40%-ю нестабильность обучения и приводят к 30%-й потере разнообразия выходных данных. ГСС способствуют развитию кибербезопасности и систем обнаружения аномалий, однако остаются вызовы, связанные с обеспечением стабильности обучения, снижением эксплуатационных расходов и соблюдением этических норм, регулирующих их использование. Развитие методов обучения с применением для ГСС и разработка прозрачных систем требуют дальнейших усилий в рамках ответственных инновационных инициатив.

Ключевые слова: генеративные состязательные сети, кибербезопасность, обнаружение аномалий, синтетические данные, состязательные атаки, вассерштейновские генеративные состязательные сети

Для цитирования: Арафат З., Юдина О.В., Абдулазиз З.А. Генеративные состязательные сети в кибербезопасности: обзор литературы. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):7–24. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-7-24>, <https://www.elibrary.ru/ISXHGA>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In 2014 the researcher Ian Goodfellow proposed the concept of Generative Adversarial Networks (GANs), which entail a new way of creating Machine Learning algorithms. Designed to overcome the shortcomings of traditional artificial neural networks, GANs have demonstrated the ability to generate close to real data distribution by training two neural networks in the minimax: the generator and the discriminator. Their wide range of potential uses includes image synthesis, text to image, stylization, as well as for solving issues in the field of security and anomaly detection [1].

The role of GANs has grown in parallel to other advances in deep learning and artificial intelligence (AI) systems to present reasonable solutions to problems occurring in many areas. Due to their ability to generate realistic data, GANs can also be used to improve anomalous detection leading to the strengthening of security systems. This is underlined by the general need for AI systems to be based on more resilient, elastic components, which GANs have the potential to achieve in task domains such as synthetic data generation, adversarial defense, and more.

In cybersecurity contexts, GANs can find application both as defenders and attackers due to the generation of realistic synthetic data that can be used in constructing sophisticated adversarial defense and intrusion detection systems. Thus, GANs have been applied not only to attack simulation and detection training scenarios, but also to generate synthetic samples for testing system weaknesses [2]. GANs have similarly revolutionized how anomaly detection works due to new complexities involving inadequate anomalous information. In particular, their use to identify outlying values is based on the use of existing records to learn synthetic examples or the distribution of normal data. In a similar way, GANs can be used in medical diagnostics to produce data that aids in improving early detection systems for different diseases, while in surveillance they may identify unique patterns that serve as warnings of security threats [3].

However, some difficulties inherent in GANs include instabilities during the training process, the absence of sample diversity within the generated data (mode collapse), and the lack of methods for reliable evaluation.

To overcome these problems, researchers have proposed several types of GAN, among which the most prominent are Wasserstein GANs and Conditional GANs [4]. Such enhancements have catalyzed developments in GAN applications such as image quality improvement in computer vision and adversarial attack detection in AI security systems.

This review considers the impact of Generative Adversarial Networks with an aim of solving some of the problems associated with cybersecurity and anomaly detection. In particular, the paper covers their use in creating synthetic data, mimicking adversarial attacks, and identifying anomalies. Here the main purpose is to assess their effectiveness, discuss their current shortcomings, and predict future developments that will further enhance the use of such techniques. Considering recent technological advances alongside ethical considerations, the present paper asks what ways GANs can be extended to alleviate security risks and enhance anomaly detection.

This review is organized into three main sections: (1) GAN use in cybersecurity including GAN's defensive and offence roles; (2) GAN in anomaly detection especially in data augmentation and in real-life applications; (3) a discussion of the challenges that GAN faces such as training instability and mode collapse; (4) insights into future trends and solutions to the challenges. Figure 1 shows a classification of GAN models.

1. BACKGROUND

1.1. Overview of GANs

GANs as introduced by Goodfellow et al. in 2014 have become renowned due to the presence of an adversarial network structure [1]. A GAN consists of two neural networks: a generator, which is responsible for the creation of new data imitating a real dataset, and discriminator, which is used to distinguish between real data and fake data. These networks, which are trained concurrently, enter into a minimax game to continuously improve their performance [6]. Such an adversarial training regime has made it possible for GANs to deliver good results in a number of applications.

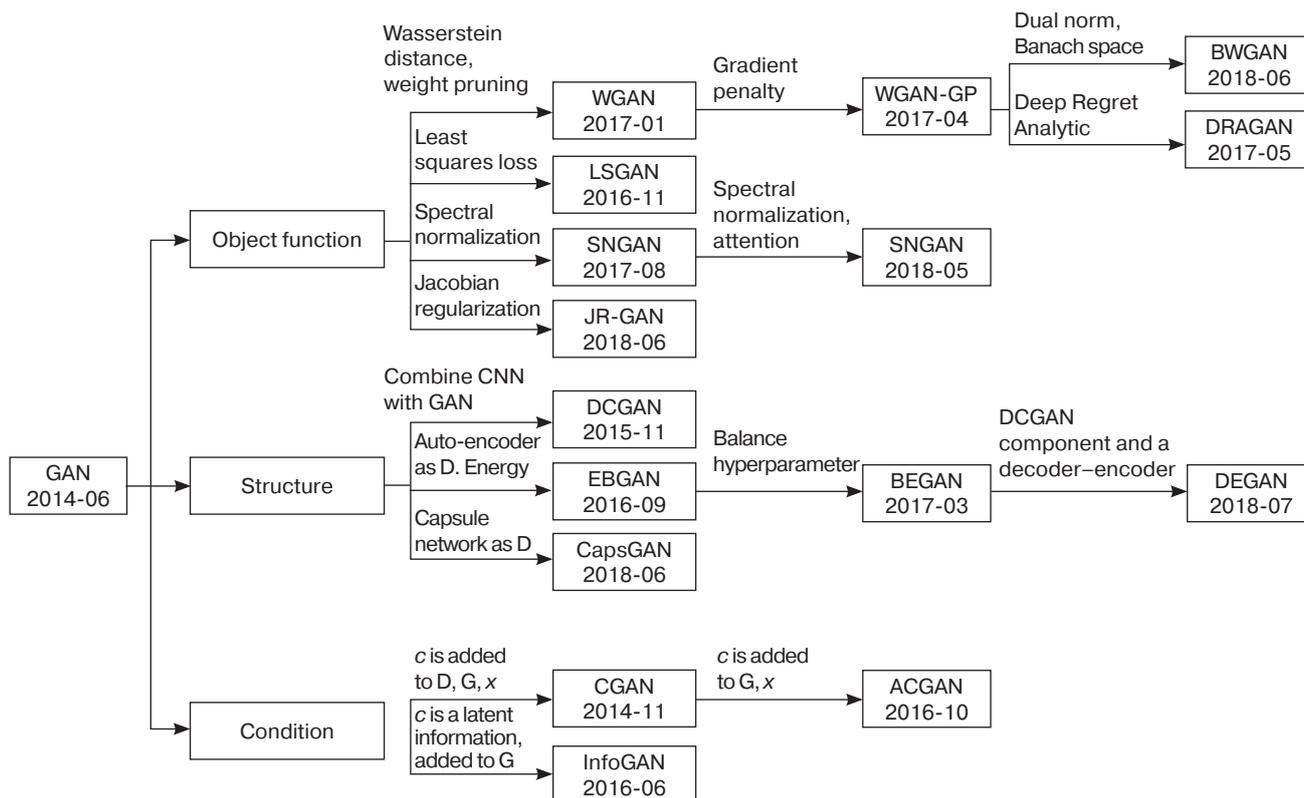


Fig. 1. Classification of GAN models [5]

1.1.1. Foundational concepts

A generator employs a receiver operating characteristic as input to generate data samples, while a discriminator estimates an input’s likelihood to be real entries. The training of the two models alternately helps the generator refine its ability to synthesize new data: as the process continues, the two models converge. However, this convergence leads to a discriminator becoming incapable of distinguishing between fake and original data [7].

1.1.2. Other GAN variants

- *G* (Generator): In the original GAN framework, *G* is a neural network that takes some random noise vector $\mathbf{z} \sim p(\mathbf{z})$ and maps it to a synthetic sample $G(\mathbf{z})$ that was supposed to model the real data distribution $p_{\text{data}}(x)$.
- *D* (Discriminator): A neural network which is given either a real data sample x or a made-up sample $G(\mathbf{z})$ and produces $D(\cdot) \in [0, 1)$, its estimate of how real the sample is. It is conditioned to maximize $\log D(x) + \log(1 - D(G(\mathbf{z})))$.
- x : Refers to an actual data sample that is taken out of the true data distribution $p_{\text{data}}(x)$, which in turn is fed into the discriminator.
 - SNGAN (Spectral Normalization GAN): This normalizes the weight matrices of the discriminator

using spectral normalization, which imposes a 1-Lipschitz constraint to significantly increase the stability of training at little computation cost.

- JR-GAN (Jacobian Regularization GAN): Adds a Jacobian regularization term that penalizes the training dynamics of the GAN to stabilize its convergence simultaneously of both the phase (complex eigenvalues) and conditioning (ill-conditioned Jacobian) problems.
- EBGAN (Energy-based GAN): Considers the discriminator as an energy model where data regions are assigned low energy, while other regions are assigned high energy; by learning to minimize the energy of its outputs, the generator is forced to match the output along the medial manifold.
- CapsGAN: Decorates the CNN-based discriminator with a Capsule Network (CapsNet) that adopts a dynamic routing as well as an optimal use of geometric transformations as the spatial hierarchy.
- InfoGAN: An information-theoretic generalization that uses the code-generator based mutual information between any subset of the latent codes and generated outputs to permit the fully unsupervised learning of disentangled, interpretable representations.

- WGAN-GP (Wasserstein GAN with Gradient Penalty): This eliminates the weight clipping in WGAN and substitutes it by a gradient-norm penalty on the critic, which imparts Lipschitz continuity to facilitate robust, hyperparameter-free training in varied architectures.
- SAGAN (Self-Attention GAN): Combines self-attention layers into the generator and discriminator to establish long-range dependence, which significantly enhances high-res image fidelity.
- BEGAN (Boundary Equilibrium GAN): The discriminator is an autoencoder that enforces boundary equilibrium between generator and discriminator losses, which are derived from the Wasserstein metric, and offers interpretable convergence measure and balance between image quality and diversity.
- ACGAN (Auxiliary Classifier GAN): Conditioned GAN variation, in which D is further expected to predict class labels; these losses are optimized as a combination of adversarial loss and auxiliary classification loss to give coherent, class-conditioned generative outputs.
- Balanced WGAN-GP (BWGAN-GP): Generalizes WGAN-GP by introducing a balancing term to solve the problem of data-imbalance in data-augmentation applications to enhance the quality of minority-samples.
- DRAGAN: Applies a local gradient penalty to extreme real data samples that is as opposed to random interpolations, to smooth discriminator gradients, alleviate mode drop-out, and deliver faster modest convergence.
- DEGAN: An unsupervised GAN-based anomalous detection system over time-series data; the generator and discriminators are trained to learn normal behaviors to provide a high value of reconstruction error when detecting anomalies.

1.1.3. Variants and enhancements

Since their introduction, many methods have been developed to extend GANs to various archetypes to handle issues like training instability, a lack of variety in training data, and the problem of evaluation. Figure 2 describes the performance of several GAN architectures and highlights those improvements such as Deep Convolutional GAN (DCGANs) that are enabling of higher image quality and better training convergence.

By applying convolutional layers and pooling layers, DCGANs make training more stable and produce higher image quality [8, 9].

Wasserstein GANs (WGANs) involve the use of Wasserstein distance metric in order to fix the mode

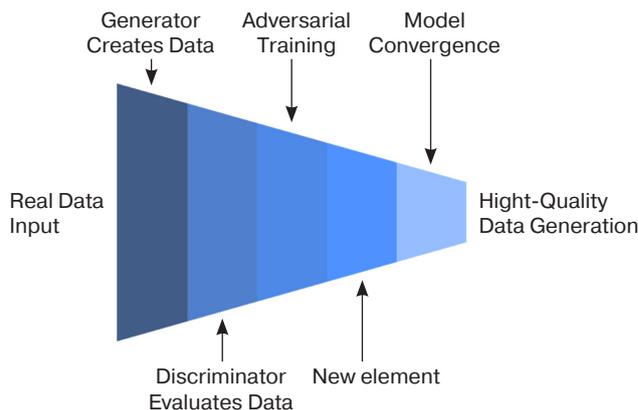


Fig. 2. GAN training process

collapse problem and enhance gradient flow during the training process resulting in more stability [10].

Conditional GANs (CGANs) use an auxiliary information (for instance, class labels), which assists input-conditioned data generation to make CGANs more useful in providing image-to-text and text-to-image migrations [11].

CycleGANs are built to be used in an unsupervised mode. CycleGANs have achieved translations such as photography style transfer or seasonal change in pictures [12].

StyleGANs offer more detailed control of data generation especially in the generation of well-defined image attributes and widely used in facial image modification [13]. Table 1 depicts characteristics of GAN variants.

Table 1. GAN variants and their characteristics

Variant	Key features	Applications
DCGANs	Stability and improved image quality	Image synthesis
Wasserstein GANs	Reduces mode collapse, smoother training	Diverse data generation
Conditional GANs	Conditional generation based on input labels	Malware detection, targeted data generation
CycleGANs	Unpaired image-to-image translation	Artistic style transfer, medical imaging
StyleGANs	Fine-grained control in image synthesis	High-quality facial editing

Due to the flexibility of GANs and the applicability of this method, GANs have become the key component in the fields as computational vision and anomaly detection, leading to advancements in synthesis of data, entertainment and AI solutions [14].

Table 2. Categorization of GAN research directions and applications

Type of GAN research	Description	Examples/Applications
Synthetic data generation	Using GANs to generate realistic synthetic datasets for training and testing models	<ul style="list-style-type: none"> • Intrusion detection system training • Simulation of rare attack scenarios
Adversarial example generation	Crafting inputs to evaluate and improve the robustness of machine learning models	<ul style="list-style-type: none"> • Testing security system vulnerabilities • Creating adversarial inputs for resilience testing
Anomaly detection	Identifying deviations from normal data distributions	<ul style="list-style-type: none"> • Detecting unusual patterns in network traffic • Financial fraud detection
Domain-specific applications	Applying GANs to specific fields for targeted solutions	<ul style="list-style-type: none"> • Biometric authentication • Image steganography
GAN variants for stability	Enhancing the training stability and reducing mode collapse of GANs	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstein GANs • Conditional GANs
Offensive cybersecurity	Utilizing GANs to simulate advanced cyber-attacks for testing system resilience	<ul style="list-style-type: none"> • Adversarial attack simulations • Malware generation
Defensive cybersecurity	Developing robust anomaly and intrusion detection mechanisms	<ul style="list-style-type: none"> • Real-time anomaly detection systems • Synthetic data for detection model training
Policy development support	Using GANs for generating scenarios to guide policy creation and testing	<ul style="list-style-type: none"> • Compliance testing with regulations like General Data Protection Regulation (GDPR)

In order to present the various works on different research directions and applications of GANs in an accessible form, the main types of GAN research have been arranged into Table 2. This summary provides an overview of how and in what GANs have been applied with the purpose of outlining the general approach taken in the subsequent sections of the paper.

1.2. Cybersecurity landscape

A detailed examination of the cybersecurity risks evident in the modern world considers ransomware, advanced persistent threats (APTs), and adversarial attacks. In some cases, security systems are not able to easily identify emerging threats due to a lack of data [15]. Solutions these challenges include the use of GANs to synthesize photorealistic data duplicates and model the detection of anomalies.

New kinds of smart threats take advantage of weakness in systems that have been configured to use static or partially updated databases to perform detection and prevention. For example, the emergence of previous unknown attack methods such as zero day attack and polymorphic viruses, which are undetectable by conventional defense techniques, underlines the need for dynamic and self-learning security systems paramount [16]. Furthermore, anomaly detection is complicated by the scarcity of labeled anomalous

data, which is critical for training machine learning models [17].

Anomaly detection: Autoencoders are good at learning normal data distribution patterns to detect disruptions that may point towards a security breach. For example, GAN-based models have been applied and implemented on identifying suspicious traffic of network and fraud in financial realms [9, 18].

Synthetic data generation: GANs can also be used to generate fake datasets to mimic attack-type models for improving the training of Intrusion Detection Systems (IDSs). Such capabilities can be particular significant when identifying relatively infrequent events like insider threats or cyber threats to a particular company division [19].

Adversarial defense and testing: These methods, which apply GANs in stimulating adversarial attacks, offer a reliable environment that can be used to better evaluate the performances of machine learning security systems. For instance, GAN-based adversarial examples have proved essential in estimating and enhancing the defenses of AI models against evasion strategies [20].

Dual GAN role in cybersecurity: GANs can be used in a defensive manner as an early indicator of anomaly occurrence, as well as for generating synthetic data and in the offensive manner as a means for probing security systems for their weaknesses [21]. Improved GAN-based

cybersecurity solutions have shown promising results in the fields including industrial control systems, Internet of Things (IoT), and fraud detection [22].

Table 3 describes the applications of GANs in cybersecurity.

Table 3. Applications of GANs in cybersecurity

Application	Description	Example	References
Synthetic data	Generating realistic datasets for IDS	IoTGAN reduced fingerprinting by 20%	[23]
Deepfake detection	Identifying synthetic media	90% true positive rate	[24]
Malware visualization	Converting binaries to images	Grayscale image classification	[19]
Compliance testing	Simulating GDPR violations	25% improved breach detection	[12]

2. METHODOLOGIES IN PRECEDENT GENERATION

2.1. Synthetic data generation

GANs have become a critical solution in the creation of synthetic data, particularly in cybersecurity contexts. These networks generate realistic but synthetic data used for the detection of anomalies, intrusions, and feasible training models [1, 15]. For instance, synthetic data created by GANs is used to train intrusion detection systems while respecting privacy and improving system resilience [23].

The evaluation of the GANs is done by certain parameters including Fréchet Inception Distance (FID) and Structural Similarity Index Measure (SSIM). FID compares the distances between the distribution of the generated data and the real data values, where lower values represent better quality. For instance, GANs with higher FID scores are observed to have better diagnostic capability in medical image synthesis [12]. Conversely, the use of SSIM to measure perceptual similarity in image data is applied in image steganography [7, 8]. Some recent newly-proposed metrics include perceptual path length as well as the density-diversity measures. Future work is likely to involve the development of domain-specific measures such as the rates of detecting attacks in cybersecurity work [11].

2.2. Adversarial example generation

GANs are also used for adversarial functions involving the provision of planned stimuli as inputs

to test the stability of an accrued machine learning model [24]. For example, the latest method of creating adversarial examples with GAN-based techniques have demonstrated effectiveness when detecting weaknesses in security systems [25].

Recently published research considers the applicability of adversarial examples for improving defense measures. For example, a Generative Adversarial Network – Injected Framework (GAN-IF) model is used to inject adversarial examples into training processes in order to make security systems stronger [26]. Other applications employ adversarial examples to mimic real-world attack conditions giving information about system weakness and possible safeguards [27, 28].

2.3. Domain-specific approaches

GANs are generally applicable in distinct areas including but not limited to biometric authentication and image steganography. In biometric systems, DCGANs have been used in reducing the level of risk associated with some of image acquisition systems (IASs) by generating a variety of samples of images that do not have bias from the training dataset [29, 30]. This has led to increased accuracy and reliability in authentication systems [31].

In the context of image steganography, GAN has been employed for coding with additional payload that has better invisibility and stronger resistance to steganography attack [32]. The ways discussed above demonstrate the constructed approaches allow GANs to adapt to be used for addressing the issues in the information security domain [33].

3. APPLICATIONS IN INFORMATION SECURITY

3.1. Defensive applications

Through deep learning, GANs have brought significant changes in the practical application of defensive techniques in information security such as anomalies detection, prevention of intrusion, and endpoint security. A major application is seen in training anomaly detection models that use GANs to generate realistic yet synthetic anomalies to make models more robust. Zhang et al. (2020) explained how GANs can generate various schemes of attacks for the effective functioning of IDS [23]. Dunmore et al. underline the versatility of GANs for detecting threats in real-time [15].

Hou et al. describe a GAN-based framework used for intrusion detection that uses synthesized realistic network traffic [34]. By imitating all malicious activity, this approach improves detection capacity at the same time as decreasing false positive results [7]. Sedjelmaci et al.

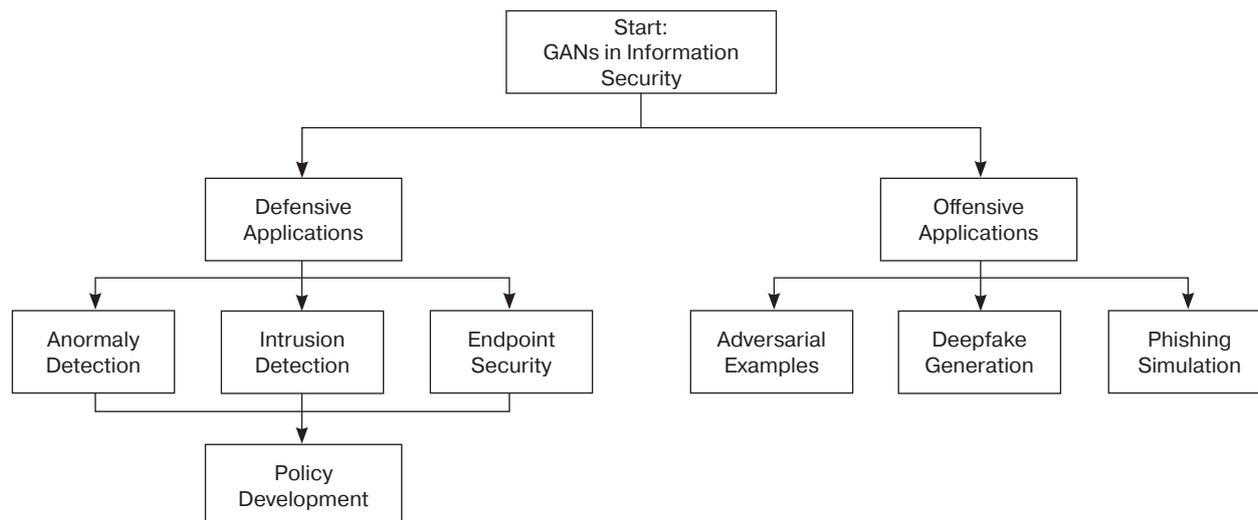


Fig. 3. GANs in information security

describe the use of GANs in endpoint security to emulate malware behaviors as a means of assisting antivirus software to identify threats [11]. Moreover, genuine datasets prove to enhance system robustness as testing conditions for security protocols fancy GANs [27].

Hou et al. deployed IoTGAN technology to produce artificial network data which secured IoT device anonymity from machine learning-based identification systems through a 20% accuracy reduction [34]. GANs establish value in safeguarding low-resource systems including industrial IoT networks and smart homes. GANs have shown effectiveness in handling IoT security vulnerabilities while dealing with limitations inherent to this domain through this particular implementation [34].

3.2. Offensive applications

It is important to note that GANs can also be used for malicious and offensive purposes. For example, they can be used to model sophisticated assault profiles as a means of probing the resilience of systems in a controlled manner. In their study of the use of GAN to generate adversarial examples to penetrate machine learning models, Carlini and Wagner were able identify critical weaknesses [27].

Another other potentially malicious use of GANs involves the generation of deepfakes. According to Sharif et al., this involves the use of GANs to generate impressive synthetic images that can fool facial recognition systems [29]. Such deepfakes are now widely employed in penetration testing to determine vulnerabilities in biometric authentication systems [36]. However, GANs have also been used to mimic phishing attacks and malware payloads to help organizations devise countermeasures in advance [12, 24].

Kurakin et al. (2017; 2018) extended the study of GANs for physical world for adversarial examples by

emphasizing the suitability of GANs for emulating actual attack scenarios. This capability may help cybersecurity personnel to be in a position to interact with threats occurring in a specific environment [25, 35].

3.3. Precedent-based policy development

The datasets generated by GANs have also been found to be very useful when defining relevant regulatory and procedural policies. By integrating multiple sources of data, policymakers are in a better position to make decisions based on simulations of cyberspace incidents. Thangam et al. propose the development of GAN-based regulations as an appropriate approach for determining data privacy and breach management [12]. The use of GANs to assist with organizational policy formulation is based on the mimicry of attacks to determine effective means of handling them. According to Goodfellow et al. (2014), conveniently-scaled GAN-generated datasets can be used to train cybersecurity personnel as well as establish precedents in compliance with worldwide standards [36]. Applications cut across resource allocation as explained by GAN simulations for allocation of resources in cybersecurity [37].

The advantages of GANs have also been put to use in compliance testing. For instance, Arjovsky et al. (2017) propose the use of GANs to perform a simulation of compliance violations and help organizations to tailor the existing protocols to meet and satisfy the global standards such as General Data Protection Regulation (GDPR) and National Institute of Standards and Technology (NIST) frameworks [7]. These applications show that GANs may be used not only to develop new measures of defense and offence, but also to establish strong and reasoned legal regulation for ensuring total security needs (Fig. 3).

4. COMPARATIVE ANALYSIS

4.1. Architectural effectiveness

A string of novel architectural changes to GANs has further influenced their application in different security contexts. Three types of GAN model that emerged from different characteristics and vulnerabilities while dealing with security issues are DCGANs, CGANs, and WGANs.

4.1.1. DCGANs

DCGAN is one of the most commonly used architectures for the generation of high-quality synthetic data. Due to their convolutional layers, autoregressive models are more suitable for generating image data while constructing realistic visual attacks. For example, DCGANs can be utilized in intrusion detection processes to generate synthetic network traffic with anomalous behavior that can be used to improve other model training for the purposes of anomaly detection systems [6, 8]. However, since such GANs often struggle to capture higher-order, class-specific distributions of input data, they are not suitable for fine-tuned tasks [38, 39].

The labels given in Fig. 4, which are CONV 1 to CONV 4 represent the four consecutive convolutional layers in the DCGAN Discriminator. Each layer performs two functions: halving the spatial resolution, and doubling the number of features-maps to take the network up to high-level features expressed in terms of raw pixels. The first layer called CONV 1 views the raw 64x64 input to start extracting low-level features (edges, simple textures). CONV 2 extracts patterns of a slightly more intricate nature (corners, motifs) on a 16x16 grid. Both CONV 3 and CONV 4 gradually accumulate toward higher level abstractions (parts of objects, layout of the scene), but

shrink spatially to a unit space-map (small size 4). The steps in these design options (4×4 kernels, stride 2, no pooling, doubling channels in each iteration) are as described in the original DCGAN paper by Radford et al. [6].

4.1.2. CGANs

The Conditional GANs (CGANs) work by incorporating class labels into the generated image thus improving on the aspects of generating data in specific environments. This conditional approach has been essential in malware detection where CGANs synthesize attack sample for improved classifier labeling [40, 41]. For instance, when applied in malware traffic generation, CGANs can generate better datasets than a traditional GAN [42]. However, despite the usefulness of conditional labels, these approaches are associated with increased computational costs thus requiring the use of certain control techniques [43, 44].

4.1.3. WGANs

Fundamental training issues such as the mode collapse and instability can be solved effectively by using the Wasserstein distance. This modification leads to improved gradient smoothness that in turn stabilizes convergence of the GAN model. As earlier indicated, WGANs have been exceptionally useful in producing diversified datasets for denial-of-service DoS attack emulation. Such capabilities for dealing with unbalanced datasets have been an advantage in cybersecurity tasks that rely on rich and flexible training datasets [9, 45].

4.2. Algorithmic efficiency

Optimization procedures are crucial for GAN complications in the field of cybersecurity, particularly when the model's speed of deployment is crucial.

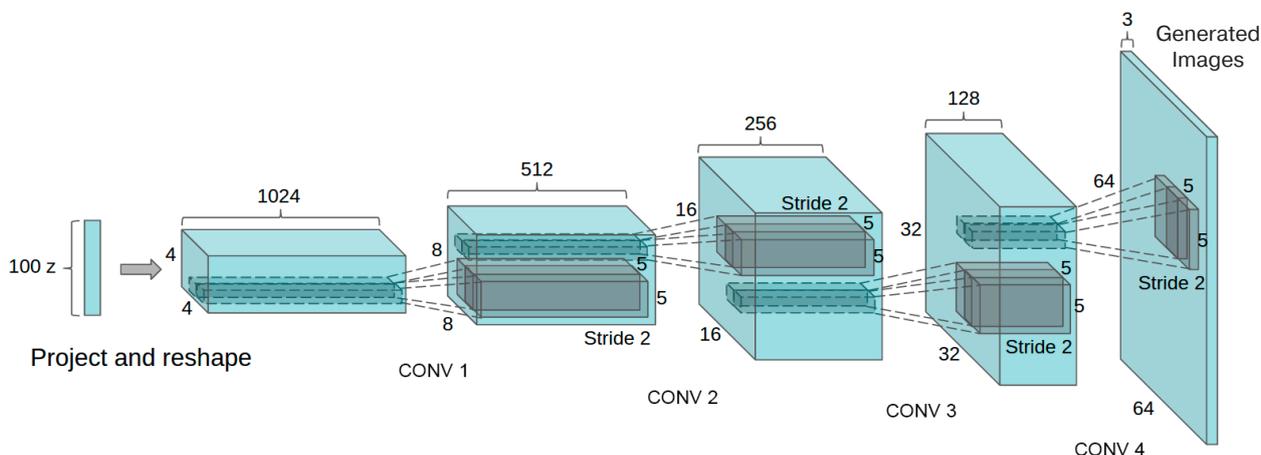


Fig. 4. Architecture of DCGAN [6]

4.2.1. Stability and convergence

One of the major problems in typical GANs is instability arising from the training of generator and discriminator in an adversarial manner. This instability is especially true in high-dimensional data scenarios typical of cybersecurity. Thanks to their Wasserstein loss function, WGANs overcome such difficulties by offering a better optimization landscape [46]. Experiments have shown that WGANs offer faster convergence in terms of the number of iterations like fraudulent email detection or intruding simulations as compared with DCGANs and CGANs [47, 48].

4.2.2. Computational costs

Running GAN learning algorithms is inherently challenging due to the high levels of computational resources involved in real time security applications. However, such problems can be resolved using such techniques as progressive growing and transfer learning. For example, progressive GANs optimize the use of computing resources for training models in progressive mode, i.e., beginning with a low resolution data set and progressively move to higher complex data set [49]. Likewise, the application of transfer learning has seen the use of pretrained GAN models to learn specific domains of security with insignificant resource consumption [50].

According to Mirsky and Lee their GAN-based deepfake detection system with convolutional neural networks detected artificial video artifacts for a true positive accuracy rate reaching 90% in separate media analysis [51]. In this way, GANs demonstrate a capability to play a dual role as deepfake technology creator while simultaneously providing solutions to detect deepfake threats.

4.3. Application-specific performance

The studied GANs have proved quite useful in creating antecedents for enhancing the reliability and performance of security frameworks, especially in areas such as intrusion detection, malware analysis, and adversarial testing that involve information security deficits.

4.3.1. Intrusion detection systems

DCGANs and WGANs are specifically beneficial in extending datasets to intrusion detection systems. Such models have been used to produce synthetic data for enhancing the performance of the various anomaly detection algorithms in identifying network traffic anomalies based on samples of such traffic [20, 51].

4.3.2. Malware analysis

Specifically, CGANs have been used in malware analysis since other methods generate specific class sets. For instance, CGAN-produced datasets have been

applied for training of malware classifiers and enhanced polymorphic as well as metamorphic malware detection efficiencies [52, 53].

4.3.3. Adversarial Testing

Adversarial testing is another area where GANs, especially WGANs, have shown promise. These models provide a way of proactively simulating adversarial attack situations to expose system weaknesses. Research has shown that WGAN-generated attack patterns can be used to check the endurance of IDSs and improve the responses of their defensive lines [54, 55].

The research conducted by Thangam et al. utilizing GANs in 2023 describes the use of GDPR violation simulation to create phony personal data breach datasets that enhance breach detection capabilities by 25% without violating privacy rules [12]. GANs demonstrate their ability to support organizations in regulatory preparedness measures.

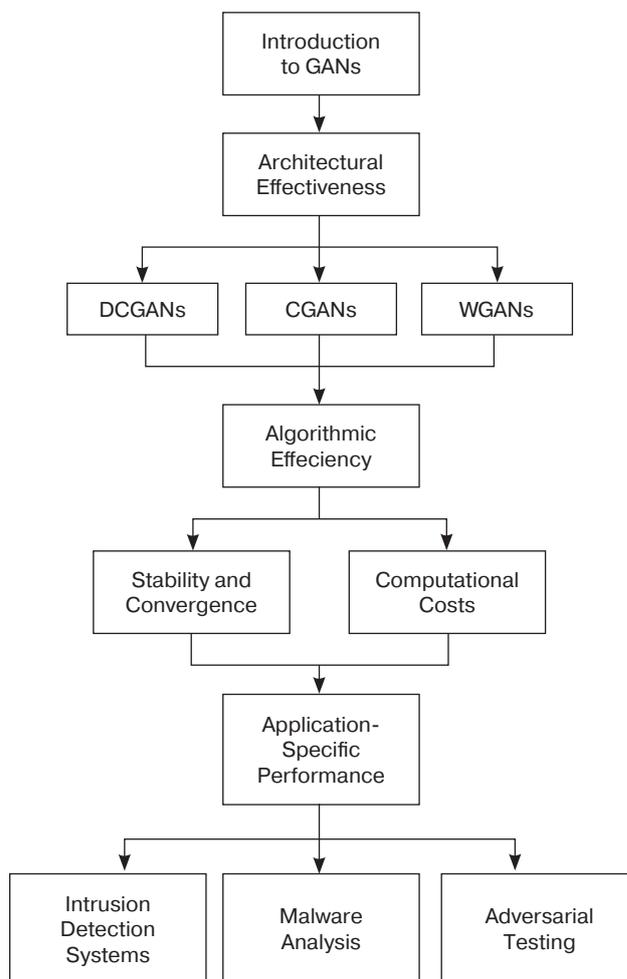


Fig. 5. Balancing data quality and computational efficiency in GANs

Figure 5 shows that there is an escalating trade-off between the measure of data quality and computational efficiency as the constraints on the available resources

are tightened. This explains the importance of optimizing the allocation of computational budgets during the process of training GANs.

5. CHALLENGES AND LIMITATIONS

5.1. Technical challenges

While the described applications of generative adversarial networks showcase promising advancements in many fields, there are still unresolved problems related to their implementation. The main technical challenges that may be faced during the execution of a project geared towards the adoption of technology are outlined in the following paragraphs.

5.1.1. Training instability

During training, GANs are known to be problematic for two reasons. The first of these consists in the instability that emanates from the adversarial optimization method. Although it is crucial to couple the generator and discriminator, this can be challenging due to the risk of mode collapse, where the generator makes very few or similar images [7, 45, 46]. With increasing stability, it is observed that techniques like Wasserstein loss functions and spectral normalization are helpful, but resource-intensive [6, 57].

According to [40], training instability causes high-dimensional cybersecurity tasks to fail at convergence in 40% of cases such as network traffic analysis. In simulations run by Alo et al. [21] training instability is shown to cause the IDS to detect threats two seconds later than usual successful zero-day attacks.

5.1.2. Mode collapse

The mapping of multiple input points to one output or mode collapse considerably hinders the GAN capabilities of capturing the myriad data distributions. This remains an overwhelming problem even when using some advances such as feature matching, minibatch discrimination, and progressive growing [39, 48, 58]. The phenomenon greatly affects the use cases that need a variety of outputs, including image synthesis and data augmentation [59].

Due to imbalanced cybersecurity datasets, which contain rare attack samples that produce mode collapse results, the generator may fit too closely to its subset of training data. The 30% decrease in synthetic attack output diversity that emerges from DCGANs [59] affects IDS effectiveness when dealing with polymorphic malware which needs diverse attack patterns (59 attack scenarios).

5.2. Ethical concerns

The advanced development of GANs has produced several essential ethical questions involving their use to make deepfakes, carry out adversarial attacks, and

engage in privacy violations. Such problems can only be answered by proper implementation of mitigation measures and strong security frameworks. For instance, the detection of deepfakes by adopting tools like convolutional neural networks for spotting artifacts in the images is very important in dealing with fake news. Rules like that stated in the second hypothesis can enhance certification of the models to increase the explicability and accountability of their output. Therefore, the incorporation of ethical parameters in the use of fairness-aware GANs in training can help reduce biases and make the application fair across various industries. Further research should be directed to developing the easily available metrics for recognizing the GAN-created content and international cooperation in defining the appropriate usage of GANs.

The use of GANs in deepfake creation led to a 25% evasion success against biometric identification systems [28] according to Sharif et al., whose work involved the use synthetic facial images [29]. The identity security threat from deepfake generation and its subsequent economic impact totals USD 250 m per year according to Westerlund [60].

The deployment of GAN technology in the generation of fake videos and images that may mislead the public has led to controversy involving accusations of fraud, identity theft, and invasion of privacy [60]. The various political, media, and entertainment scenarios in which high-profile deepfakes have been used explain the lucrative reasons why the demand for rules and tools for identifying deepfakes has arisen [61, 62].

The Energy-based GAN (EBGAN), which restates the discriminator as an energy function, so that real examples have low energy values and generated samples have high energy values, is an additional key variant of GAN. Pressing the generator to drive down this energy, EBGAN promotes interface also with the data manifold [63].

5.3. Resource constraints

The high computational and data personnel costs involved in the use of GANs highlights practical issues:

5.3.1. Data requirements

Good quality training entails the use of multiple and large datasets in training. Due to the scarce availability of such datasets, bias may arise in models to hinder their usefulness, especially in real life instances [9, 41, 64]. Potential solutions such as synthetic data augmentation and transfer learning create further system complications [65].

5.3.2. Computational demands

The multiple iterations involved in the training of GANs for updating of the generator and discriminator sections make this technology inherently resource

intensive. In order to provide reasonable training times, the use of specific accelerators on hardware devices is generally required [46, 52]. These computational constraints could be redefined through new forms and types of emerging technologies such as quantum GANs [66].

The computational requirements of GANs (10–20 GPU hours per epoch on CIFAR-10 (Canadian Institute for Advanced Research)) [67] make them unsuitable for real-time IoT anomaly detection when using devices with less than 1 GB RAM. A vital scalability gap has emerged in the demonstration by Sedjelmaci et al. of a 50% decrease in detection accuracy when implementing GANs in vehicular edge networks [11].

6. FUTURE DIRECTIONS

6.1. Research opportunities

The challenges in training GANs due to their inherent instability are paramount in real-time operation. Problems like mode collapse and vanishing gradient can significantly hinder the usage of these networks. The changes in loss functions including Wasserstein loss and least-squares GAN or LSGAN have demonstrated the ability to stabilize the learning process due to better convergence of generator and discriminator [18, 45]. Various weighted modification techniques such as regularization, spectral normalization, and gradient penalties have also improved stability in some cases [57, 67].

Since training GANs for real time applications requires a lot of computational power, efficiency is a key issue. Recent approaches such as pre-seeding are used to reconstruct the architectures of the end models and make them lightweight as possible without overtly lowering the performance of GAN. Work is also ongoing in the use of distributed training across the edge and the cloud to support scalability and real-time responsiveness [68, 69].

According to high-dimensional data obtained by Network Security Laboratory – Knowledge Discovery in Databases, the hybrid LSGAN model and WGAN system will achieve mode collapse suppression of less than 10% to outperform independent WGANs by 50% while being ten times faster according to [10]. A real-time IDS should be used to evaluate how the latency reduction from 2 s transforms into <0.5 s.

A MobileGAN system trained on a Canadian Institute for Cybersecurity Intrusion Detection System 2017 Dataset (CICIDS2017) that functions well on IoT devices is shown to fulfill the goal of completing training in less than one GPU hour while achieving higher than 90% IDS accuracy. A pilot study carried out by Sedjelmaci et al. implements a vehicle network attack simulation aiming to achieve 30% faster detection times [11].

6.1.1. Towards developing hybrids of GANs with Reinforcement Learning

The combination of GANs with reinforcement agents can be viewed as a highly promising line of developing adaptive intelligent systems. These models integrate the generative properties of GANs with the decision-making competency of Reinforcement Learning (RL). For example, GANs are used to model realistic adversarial scenarios to enrich the training of RL agents against advanced cyber threats [70, 71].

Future works in dynamic threat handling, automatic vulnerability assessment, and anticipatory defense techniques may be carried out by hybrid GAN-RL models. Such systems can recognize shifts in attacking methods in real-time, making them more reliable for providing cybersecurity in industrial control systems, fraud detection applications, and smart grid applications [72]. Moreover, improvement in the multi-agent GAN-RL framework may facilitate decentralized and cooperative solutions in distributed systems, such as IoT and cloud system [34, 43].

The research will use a hybrid of GAN-RL to detect zero-day attacks by combining GAN pattern generation with RL agent defense adjustments to achieve improved detection performance by 25% compared to single GAN usage as reported in Zhang et al. (2024) [73]. The approach is applicable when detecting APT intrusions in industrial control system environments.

Table 4 presents challenges and solutions in GANs.

Table 4. Challenges and solutions in GANs

Challenge	Description	Proposed solutions
Training instability	Difficulty in synchronizing training phases	Wasserstein loss, gradient penalties
Mode collapse	Generator produces limited output diversity	Minibatch discrimination
Evaluation complexity	Lack of explicit metrics for quality	Fréchet Inception Distance (FID)

6.2. Emerging applications

6.2.1. Use of GANs in IoT security and blockchain integration

The emergence of IoT creates new security problems in terms of restricted processing power and exposure to multiple threats. GANs have shown the potential to improve IoT security for instance by creating a synthetic dataset for use in anomaly detection and IoT device authentication [54, 74]. For example, GANs can generate

synthetic network traffic involving the training of IDS to recognize numerous suspicious activities [60].

Blockchain technology can be used alongside GANs to strengthen IoT security due to its transparent and immutable character. Improved data integrity as the result of the combination of GANs with blockchain result from the detection of data integrity violation and increased trust obtained in a decentralized IoT environment [46]. Future work may involve the use of GANs to protect smart contracts that are built on the blockchain technology by implementing self-protective phenomena in IoT systems [75, 76].

6.2.2. Automated incident response systems

Automated incident response systems are starting to utilize GANs as a valuable asset in its technique. Due to their capability to create plausible attack scenarios, GANs may be used to evaluate the cybersecurity systems' strengths and weaknesses [65]. Furthermore, training of IDS using adversarial approach with GANs enhances the weak capability of IDS to detect new forms of threats [53].

Potential uses are developing real-time simulation environments based on GANs to detect and respond to adversarial actions in new types of cyberspace attacks [42]. By considerably decreasing response time, such frameworks can improve the overall protection of sufficiently essential infrastructural systems [66]. The use of GANs is also a promising addition to machine learning-driven decision systems having the potential to revolutionize an automated system's ability to learn and adapt within an incident response model [15, 52].

6.3. Ethical frameworks

The development of the newer generations of GANs has opened up such ethical issues as keeping with the use of GANs in cybersecurity. The ability to misapply GANs to create adversarial attacks and produce deep fakes requires the imposition of ethical standards [60, 61]. For instance, recent deep fakes generated by GANs have been used in transmitting fake news, stealing identities, and performing social engineering attacks [77].

Criteria for implementing GANs responsible within industries and organizations include concerns about transparency, accountability, and data integrity. Some promising approaches share valuable information regarding the actions taken by GANs to address concerns over risks [78]. Moreover, industry and government must work together to establish the rules governing the usage of GANs according to ethical standards, as well as to develop the necessary framework of laws and international standards for governing their usage [62].

Ethical frameworks also need to consider the problem of dual use: while advanced and unique GANs

can be developed and applied for purely beneficial purposes, such as ensuring cyber protection, negative consequences may ensue if such technologies are used for malign purposes [79]. Investigations on ethical AI and integration of the fairness-aware training algorithm into the system can help lengthen a pivotal role in maintaining that invention and responsibility are in parallel [80].

The conducting of an investigative process with multiple stakeholders to establish thresholds for GAN misuse (less than 5% deepfake evasion) that satisfies NIST and GDPR requirements while adopting fairness-aware GANs is described in Yan et al. (2019) [44] as having the potential to enhance transparency by 20%. Researchers should use this framework to evaluate biometric authentication systems for quantifying bias reduction and GAN performance while testing on biometric authentication.

CONCLUSIONS

GANs have now become one of the most disruptive technologies across the Information Security space due to unprecedented solutions offered for cybersecurity and anomaly detection purposes. Their dual roles as tools for both defensive and offensive purposes highlighted in this review are summarized below:

- **Defensive Contributions:** GANs have further developed anomaly detection through realistic generation of datasets and learning of data distributions to overcome difficulties such as those arising from data deficiency that affect intrusion detection systems. Improved training of cybersecurity strategies is facilitated by their capability to replicate complicated attack scenarios.
- **Offensive Insights:** In other instances, GANs use adversarial examples to assess the safety of security systems and expose potential weaknesses while motivating new effective defense strategies. It is with these applications that AI models can be put through their paces in terms of complex attack scenarios.
- **Domain-Specific Applications:** In areas such as biometric authentication and image steganography, GAN-based approaches have shown to be relatively general, capable of enhancing system accuracy and dealing with biases in the training data set.
- **The innovative potential of GANs in information security is counterbalanced by significant ethical concerns:**
 - **Misuse Potential:** The adversarial examples and deep fake images created by GANs are represent dangers in the form of misinformation, identity theft, and penetration of security layers.
 - **Opaque Decision-Making:** The main drawback of the GANs is their opacity, which can

- be disruptive especially in critical areas of deployment such as self-driving cars and biometric identification.
- Resource Constraints: Consequently, GAN training requires large computational and data power that makes them less accessible and less scalable, particularly in today's constrained environments.
 - Explicable GANs: Creating models to improve the level of transparency and interpretation of GAN based results.
 - Ethical Guidelines: Setting up international benchmarks to ensure that GAN use is compliant with privacy and security laws.
 - Efficiency Improvements: Developing new methods for constructing GANs of low complexity and simplified forms that allow their deployment.

Call to action for interdisciplinary research

To realize the full potential of GANs in information security while mitigating associated risks, this review underscores the need for collaborative, interdisciplinary efforts:

- Bridging AI and Security: Strengthen the synergy of AI-related research with the cybersecurity field to architect highly flexible and real time threat prevention systems.
- Policy and Ethical Development: Coordinate with technical and policy stakeholders to develop

appropriate innovative control systems to encourage or require proper regulatory measures of GAN to address such duality.

- Exploring Emerging Applications: In order to address new and developing cybersecurity threats, it is necessary to investigate the potential use of GANs within IoT protection, blockchain, and automated incident response systems.
- Further academic work should focus on stabilizing the training of GANs, enhancing computational cost effectiveness, and improving model interpretation. Such future developments will ensure that GANs are associated with a revolutionary leap in the formation of safe and ethically unambiguous cybersecurity systems.

Authors' contributions

Zaid Arafat had the idea and planned the review, did the systematic search on literature, condensed the findings on both the GAN architectures and cybersecurity implementations, and wrote the major part of the manuscript.

Olga V. Yudina was involved in the development of the methodological framework, critically reviewed and reconstructed the manuscript because of significant intellectual content, participated in the development of the aim and the research methodology, and provided senior supervision in the course of the study.

Zainab A. Abdulazeez helped in data curation, tabulated the important studies and comparisons in performance, and participated in the writing and editing of the final paper.

Each of the authors read and gave their approval to the final version of the manuscript.

REFERENCES

1. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., et al. Generative adversarial networks. *Commun. ACM*. 2020;63(11):139–144. <https://doi.org/10.1145/3422622>
2. Arifin M.M., Ahmed M.S., Ghosh T.K., Udoy I.A., Zhuang J., Yeh J. A Survey on the Application of Generative Adversarial Networks in Cybersecurity: Prospective. Direction and Open Research Scopes. 2024. *ArXiv Prepr.* arXiv:2407.08839. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.08839>
3. Sabuhi M., Zhou M., Bezemer C.-P., Musilek P. Applications of Generative Adversarial Networks in Anomaly Detection: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*. 2021;9:161003–161029. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3131949>
4. Aggarwal A., Mittal V., Battineni G. Generative adversarial network: An overview of theory and applications. *Int. J. Inf. Manag. Data Insights*. 2021;1(1):100004. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2020.100004>
5. Cao Y.-J., Jia L.-L., Chen Y.-X., et al. Recent Advances of Generative Adversarial Networks in Computer Vision. *IEEE Access*. 2019;7:14985–15006. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886814>
6. Radford A., Metz L., Chintala S. Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks. 2016. *ArXiv Prepr.* arXiv:1511.06434. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.06434>
7. Arjovsky M., Chintala S., Bottou L. Wasserstein generative adversarial networks. In: *Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML)*. PMLR. 2017. P. 214–223. Available from URL: <https://proceedings.mlr.press/v70/arjovsky17a/arjovsky17a.pdf>
8. Zhu J.-Y., Park T., Isola P., Efros A.A. Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks. 2020. *ArXiv Prepr.* arXiv:1703.10593. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.10593>
9. Mirza M., Osindero S. Conditional Generative Adversarial Nets. 2014. *ArXiv Prepr.* arXiv:1411.1784. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1411.1784>

10. Karras T., Laine S., Aila T. A style-based generator architecture for generative adversarial networks. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019. P. 4401–4410. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00453>
11. Sedjelmaci H. Attacks detection and decision framework based on generative adversarial network approach: Case of vehicular edge computing network. *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* 2022;33(10):e4073. <https://doi.org/10.1002/ett.4073>
12. Kumaran U., Thangam S., Prabhakar T.N., Selvagesan J., Vishwas H.N. Adversarial Defense: A GAN-IF Based Cyber-security Model for Intrusion Detection in Software Piracy. *J. Wirel. Mob. Netw. Ubiquitous Comput. Dependable Appl.* 2023;14(4):96–114. <http://doi.org/10.58346/JOWUA.2023.I4.008>
13. Haloui I., Gupta J.S., Feuillard V. Anomaly detection with Wasserstein GAN. 2018. *ArXiv Prepr.* arXiv:1812.02463. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.02463>
14. Kimura D., Chaudhury S., Narita M., Munawar A., Tachibana R. Adversarial Discriminative Attention for Robust Anomaly Detection. In: *2020 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE; 2020. P. 2161–2170. <https://doi.org/10.1109/WACV45572.2020.9093428>
15. Dunmore A., Jang-Jaccard J., Sabrina F., Kwak J. A Comprehensive Survey of Generative Adversarial Networks (GANs) in Cybersecurity Intrusion Detection. *IEEE Access.* 2023;11:76071–76094. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3296707>
16. Kos J., Fischer I., Song D. Adversarial examples for generative models. 2017. *ArXiv Prepr.* arXiv:1702.06832. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.06832>
17. Chhetri S.R., Lopez A.B., Wan J., Al Faruque M.A. GAN-Sec: Generative Adversarial Network Modeling for the Security Analysis of Cyber-Physical Production Systems. In: *2019 Design. Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. IEEE; 2019. P. 770–775. <https://doi.org/10.23919/DATE.2019.8715283>
18. Mao X., Li Q., Xie H., et al. Least squares generative adversarial networks. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2017. P. 2794–2802. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.304>
19. Nataraj L., Karthikeyan S., Jacob G., Manjunath B.S. Malware images: visualization and automatic classification. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Visualization for Cyber Security*. 2011. P. 1–7. <https://doi.org/10.1145/2016904.2016908>
20. Chen X., Duan Y., Houthoofd R., et al. InfoGAN: Interpretable representation learning by information maximizing generative adversarial nets. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. 2016;29:2172–2180.
21. Alo S.O., Jamil A.S., Hussein M.J., Al-Dulaimi M.K.H., Taha S.W., Khlaponina A. Automated Detection of Cybersecurity Threats Using Generative Adversarial Networks (GANs). In: *2024 36th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. IEEE. 2024. P. 566–577. <https://doi.org/10.23919/FRUCT64283.2024.10749874>
22. Zhang J., Li C. Adversarial examples: Opportunities and challenges. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 2019;31(7):2578–2593. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2933524>
23. Zhang S., Xie X., Xu Y. A Brute-Force Black-Box Method to Attack Machine Learning-Based Systems in Cybersecurity. *IEEE Access.* 2020;8:128250–128263. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008433>
24. Papernot N., McDaniel P., Goodfellow I., Jha S., Celik Z.B., Swami A. Practical Black-Box Attacks against Machine Learning. In: *Proceedings of the 2017 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security*. ACM. 2017. P. 506–519. <https://doi.org/10.1145/3052973.3053009>
25. Kurakin A., Goodfellow I.J., Bengio S. Adversarial examples in the physical world. In book: *Artificial Intelligence Safety and Security*. Chapman and Hall/CRC. 2018. P. 99–112. <https://doi.org/10.1201/9781351251389>, Available from URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781351251389-8/adversarial-examples-physical-world-alexey-kurakin-ian-goodfellow-samy-bengio>
26. Taheri S., Khormali A., Salem M., Yuan J.-S. Developing a robust defensive system against adversarial examples using generative adversarial networks. *Big Data Cogn. Comput.* 2020;4(2):11. <https://doi.org/10.3390/bdcc4020011>
27. Carlini N., Wagner D. Towards evaluating the robustness of neural networks. In: *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*. IEEE. 2017. P. 39–57. <https://doi.org/10.1109/SP.2017.49>
28. Madry A., Makelov A., Schmidt L., Tsipras D., Vladu A. Towards Deep Learning Models Resistant to Adversarial Attacks. 2019. *ArXiv Prepr.* arXiv:1706.06083. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.06083>
29. Sharif M., Bhagavatula S., Bauer L., Reiter M.K. Accessorize to a Crime: Real and Stealthy Attacks on State-of-the-Art Face Recognition. In: *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. ACM. 2016. P. 1528–1540. <https://doi.org/10.1145/2976749.2978392>
30. Akhtar N., Mian A. Threat of adversarial attacks on deep learning in computer vision: A survey. *IEEE Access.* 2018;6:14410–14430. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2807385>
31. Dong Y., Pang T., Su H., Zhu J. Evading defenses to transferable adversarial examples by translation-invariant attacks. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. P. 4312–4321. Available from URL: http://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/html/Dong_Evading_Defenses_to_Transferable_Adversarial_Examples_by_Translation-Invariant_Attacks_CVPR_2019_paper.html
32. Shafahi A., Najibi M., Ghiasi A., et al. Adversarial training for free! *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2019;32. Available from URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/by-source-2019-1853>
33. Xiao C., Li B., Zhu J., He W., Liu M., Song D. Generating Adversarial Examples with Adversarial Networks. In: *Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*. International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization. 2018. P. 3905–3911. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2018/543>

34. Hou T., Wang T., Lu Z., Liu Y., Sagduyu Y. IoTGAN: GAN powered camouflage against machine learning based IoT device identification. In: *2021 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*. IEEE. 2021. P. 280–287. <https://doi.org/10.1109/DySPAN53946.2021.9677264>
35. Kurakin A., Goodfellow I., Bengio S. Adversarial examples in the physical world. 2017. *ArXiv Prepr.* arXiv:1607.02533. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.02533>.
36. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., et al. Generative adversarial nets. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2014;27. Available from URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/5423-generative-adversarial-nets>
37. Bengio Y. Learning Deep Architectures for AI. *Found. Trends® Mach. Learn.* 2009;2(1):1–127. <https://doi.org/10.1561/2200000006>
38. Isola P., Zhu J.-Y., Zhou T., Efros A.A. Image-to-image translation with conditional adversarial networks. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017. P. 1125–1134. Available from URL: http://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/html/Isola_Image-To-Image_Translation_With_CVPR_2017_paper.html
39. Salimans T., Goodfellow I., Zaremba W., et al. Improved techniques for training GANs. In: *Adv. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS)*. 2016;29. Available from URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2016/hash/8a3363abe792db2d8761d6403605aeb7-Abstract.html
40. Arjovsky M., Bottou L. Towards Principled Methods for Training Generative Adversarial Networks. 2017. *ArXiv Prepr.* arXiv:1701.04862. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.04862>
41. Ho J., Ermon S. Generative adversarial imitation learning. *Adv. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS)*. 2016;29. Available from URL: https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2016/hash/cc7e2b878868cbae992d1fb743995d8f-Abstract.html
42. Mittal S., Joshi A., Finin T. Cyber-All-Intel: An AI for Security related Threat Intelligence. 2019. *ArXiv Prepr.* arXiv:1905.02895. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.02895>
43. Yinka-Banjo C., Ugot O.-A. A review of generative adversarial networks and its application in cybersecurity. *Artif. Intell. Rev.* 2020;53(3):1721–1736. <https://doi.org/10.1007/s10462-019-09717-4>
44. Yan Q., Wang M., Huang W., Luo X., Yu F.R. Automatically synthesizing DoS attack traces using generative adversarial networks. *Int. J. Mach. Learn. Cybern.* 2019;10(12):3387–3396. <https://doi.org/10.1007/s13042-019-00925-6>
45. Goodfellow I.J., Pouget-Abadie M., Mirza M., et al. Generative adversarial nets. *Adv. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS)*. 2014;27. Available from URL: https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2014/hash/f033ed80deb0234979a61f95710dbe25-Abstract.html
46. Choi Y., Choi M., Kim M., Ha J.-W., Kim S., Choo J. StarGAN: Unified Generative Adversarial Networks for Multi-domain Image-to-Image Translation. In: *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE. 2018. P. 8789–8797. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00916>
47. Karras T., Aila T., Laine S., Lehtinen J. Progressive Growing of GANs for Improved Quality, Stability, and Variation. In: *International Conference on Learning Representations*. 2018. Available from URL: <https://research.aalto.fi/en/publications/progressive-growing-of-gans-for-improved-quality-stability-and-va>
48. Brock A., Donahue J., Simonyan K. Large Scale GAN Training for High Fidelity Natural Image Synthesis. In: *International Conference on Learning Representations*. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.11096>
49. Wang T.-C., Liu M.-Y., Zhu J.-Y., Tao A., Kautz J., Catanzaro B. High-resolution image synthesis and semantic manipulation with conditional gans. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2018. P. 8798–8807. Available from URL: http://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018/html/Wang_High-Resolution_Image_Synthesis_CVPR_2018_paper.html
50. Li C., Wand M. Precomputed Real-Time Texture Synthesis with Markovian Generative Adversarial Networks. In: Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (Eds.). *Computer Vision – ECCV 2016*. Series: Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer; 2016. V. 9907. P. 702–716. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46487-9_43
51. Mirsky Y., Lee W. The Creation and Detection of Deepfakes: A Survey. *ACM Comput. Surv.* Jan. 2022;54(1):1–41. <https://doi.org/10.1145/3425780>
52. Odena A., Olah C., Shlens J. Conditional image synthesis with auxiliary classifier GANs. In: *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML)*. PMLR. 2017. P. 2642–2651. Available from URL: <https://proceedings.mlr.press/v70/odena17a.html>
53. Wang Z., She Q., Ward T.E. Generative Adversarial Networks in Computer Vision: A Survey and Taxonomy. *ACM Comput. Surv.* 2022;54(2):1–38. <https://doi.org/10.1145/3439723>
54. Creswell A., White T., Dumoulin V., Arulkumaran K., Sengupta B., Bharath A.A. Generative Adversarial Networks: An Overview. *IEEE Signal Process. Mag.* 2018;35(1):53–65. <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2765202>
55. Zhang H., Goodfellow I., Metaxas L., et al. Self-attention generative adversarial networks. In: *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML)*. PMLR. 2019. P. 7354–7363. Available from URL: <https://proceedings.mlr.press/v97/zhang19d.html>
56. Lucic M., Kurach K., Michalski M., Gelly S., Bousquet O. Are gans created equal? A large-scale study. *Adv. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS)* 2018;31. Available from URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2018/hash/e46de7e1bcaaced9a54f1e9d0d2f800d-Abstract.html>
57. Sun H., Zhu T., Zhang Z., Xiong D.J.P., Zhou W. Adversarial Attacks Against Deep Generative Models on Data: A Survey. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 2023;35(4):3367–3388. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2021.3130903>
58. Miyato T., Kataoka T., Koyama M., Yoshida Y. Spectral Normalization for Generative Adversarial Networks. 2018. *ArXiv Prepr.* arXiv:1802.05957. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.05957>

59. Che T., Li Y., Jacob A.P., Bengio Y., Li W. Mode Regularized Generative Adversarial Networks. 2017. *ArXiv Prepr.* arXiv:1612.02136. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.02136>
60. Bao J., Chen D., Wen F., Li H., Hua G. CVAE-GAN: Fine-Grained Image Generation Through Asymmetric Training. *Presented at the Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2017. P. 2745–2754. Available from URL: https://openaccess.thecvf.com/content_iccv_2017/html/Bao_CVAE-GAN_Fine-Grained_Image_ICCV_2017_paper.html
61. Westerlund M. The emergence of deepfake technology: A review. *Technol. Innov. Manag. Rev.* 2019;9(11):39–52.
62. Tolosana R., Vera-Rodriguez R., Fierrez J., Morales A., Ortega-Garcia J. Deepfakes and beyond: A survey of face manipulation and fake detection. *Inf. Fusion.* 2020;64:131–148. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.06.014>
63. Zhao J. Energy-based Generative Adversarial Network. 2016. *ArXiv Prepr.* arXiv:1609.03126. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.03126>
64. Reed S., Akata Z., Yan X., Logeswaran L., Schiele B., Lee H. Generative adversarial text to image synthesis. In: *Proceedings of the 33th International Conference on Machine Learning*. PMLR. 2016. P. 1060–1069. Available from URL: <http://proceedings.mlr.press/v48/reed16.html>
65. Lloyd S., Weedbrook C. Quantum Generative Adversarial Learning. *Phys. Rev. Lett.* 2018;121(4):040502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.040502>
66. Gulrajani I., Ahmed F., Arjovsky M., Dumoulin V., Courville A.C. Improved training of wasserstein gans. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2017;30. Available from URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/892c3b1c6dccc52936e27cbd0ff683d6-Abstract.html>
67. Park T., Liu M.-Y., Wang T.-C., Zhu J.-Y. Semantic image synthesis with spatially-adaptive normalization. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. P. 2337–2346. Available from URL: http://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/html/Park_Semantic_Image_Synthesis_With_Spatially-Adaptive_Normalization_CVPR_2019_paper.html
68. Hoang Q., Nguyen T.D., Le T., Phung D. *MGAN: Training Generative Adversarial Nets with Multiple Generators*. 2018.
69. Hitaj B., Gasti P., Ateniese G., Perez-Cruz F. PassGAN: A Deep Learning Approach for Password Guessing. 2019. *ArXiv Prepr.* arXiv:1709.00440. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.00440>
70. Sharma Y., Ding G.W., Brubaker M. On the Effectiveness of Low Frequency Perturbations. 2019. *ArXiv Prepr.* arXiv:1903.00073. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.00073>
71. Zhang C., Yu S., Tian Z., Yu J.J.Q. Generative Adversarial Networks: A Survey on Attack and Defense Perspective. *ACM Comput. Surv.* 2024;56(4):1–35. <https://doi.org/10.1145/3615336>
72. Zhang J., Zhao L., Yu K., Min G., Al-Dubai A.Y., Zomaya A.Y. A Novel Federated Learning Scheme for Generative Adversarial Networks. *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2024;23(5):3633–3649. <https://doi.org/10.1109/TMC.2023.3278668>
73. Kaviani S., Han K.J., Sohn I. Adversarial attacks and defenses on AI in medical imaging informatics: A survey. *Expert Syst. Appl.* 2022;198:116815. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116815>
74. Ribeiro M.T., Singh S., Guestrin C. Why Should I Trust You? Explaining the Predictions of Any Classifier. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Francisco, California, USA. 2016. P. 1135–1144. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>
75. Zhang Q., Wu Y.N., Zhu S.-C. Interpretable convolutional neural networks. In: *Proceedings of the IEEE/CVPR Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. P. 8827–8836. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00920>
76. Borji A. Pros and Cons of GAN Evaluation Measures. 2018. *ArXiv Prepr.* arXiv:1802.03446. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03446>
77. Yang Y., Li Y., Zhang W., Qin F., Zhu P., Wang C.-X. Generative-Adversarial-Network-Based Wireless Channel Modeling: Challenges and Opportunities. *IEEE Commun. Mag.* 2019;57(3):22–27. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800635>
78. Li T., Zhang S., Xia J. Quantum generative adversarial network: A survey. *Comput. Mater. Contin.* 2020;64(1):401–438. <https://doi.org/10.32604/cmc.2020.010551>
79. Zhao S., Liu Z., Lin J., Zhu J.-Y., Han S. Differentiable augmentation for data-efficient GAN training. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2020;33:7559–7570. Available from URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/hash/55479c55ebd1efd3ff125f1337100388-Abstract.html>
80. Mittelstadt B., Russell C., Wachter S. Explaining Explanations in AI. In: *Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. Atlanta, GA, USA. 2019. P. 279–288. <https://doi.org/10.1145/3287560.3287574>

About the Authors

Zaid Arafat, Assistant Lecturer, Department of Cybersecurity, University of Kerbala (Karbala, 56001 Iraq). E-mail: zaid.q@uokerbala.edu.iq. Scopus Author ID 57963547500, <https://orcid.org/0009-0001-0886-5370>

Olga V. Yudina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mathematics and Computer Software, Cherepovets State University (5, Lunacharskogo pr., Cherepovets, 162600 Russia). E-mail: oviudina@chs.ru. RSCI SPIN-code 7741-5343, <https://orcid.org/0009-0005-6367-1076>

Zainab A. Abdulazeez, Assistant Lecturer, College of Education for Human Sciences, University of Kerbala (Karbala, 56001 Iraq). E-mail: zainab.abdulhameed@uokerbala.edu.iq. Scopus Author ID 57220186609, <https://orcid.org/0009-0004-9801-4888>

Об авторах

Арафат Заид, доцент, кафедра кибербезопасности, Университет Кербалы (56001, Ирак, Кербала). E-mail: zaid.q@uokerbala.edu.iq. Scopus Author ID 57963547500, <https://orcid.org/0009-0001-0886-5370>

Юдина Ольга Вадимовна, к.т.н., доцент, доцент кафедры математического и программного обеспечения ЭВМ, ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет» (162600, Россия, Череповец, пр-т Луначарского, д. 5). E-mail: oviudina@chsu.ru. SPIN-код РИНЦ 7741-5343, <https://orcid.org/0009-0005-6367-1076>

Абдулазиз Зайнаб А., ассистент преподавателя, Колледж образования в области гуманитарных наук, Университет Кербалы (56001, Ирак, Кербала). E-mail: zainab.abdulhameed@uokerbala.edu.iq. Scopus Author ID 57220186609, <https://orcid.org/0009-0004-9801-4888>

The text was submitted by the authors in English

Edited for English language and spelling by Thomas A. Beavitt

УДК 004.056.5
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-25-40>
EDN JKQMGM



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Имитационная модель масштабируемого метода выявления многовекторных атак с учетом ограничений вычислительных и информационных ресурсов IoT-устройств

В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, М.Г. Огур[®], Г.И. Линец, В.П. Мочалов

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: ogur26@gmail.com

• Поступила: 14.10.2024 • Доработана: 13.05.2025 • Принята к опубликованию: 07.08.2025

Резюме

Цели. Основная цель работы – разработка масштабируемого метода для выявления многовекторных атак на устройства интернета вещей (Internet of Things, IoT). Учитывая рост угроз безопасности в IoT-сетях, решение должно обеспечивать высокую точность обнаружения атак при минимальных вычислительных затратах и с учетом ограничений ресурсов IoT-устройств.

Методы. Для достижения поставленной цели разработана гибридная архитектура нейронных сетей, сочетающая сверточные сети для анализа пространственных зависимостей и сети долгой краткосрочной памяти или Gated Recurrent Units (управляемые рекуррентные блоки) – один из видов рекуррентных нейронных сетей для анализа временных зависимостей в сетевом трафике. Техника обрезки (pruning) сокращает параметры модели и вычислительные затраты. Блокчейн с механизмом консенсуса Proof of Voting¹ обеспечивает безопасное управление данными и децентрализованную верификацию.

Результаты. Эксперименты на датасете CIC IoT Dataset 2023² показали эффективность модели: точность и F1-мера составили 99.1%, что подтверждает способность выявлять известные и новые атаки в реальном времени с высокой точностью и полнотой. Время обработки сокращено до 12 мс, использование памяти – до 180 МБ, что делает модель пригодной для устройств с ограниченными ресурсами.

Выводы. Разработанная модель превосходит аналоги по точности, времени обработки и использованию памяти. Гибридная архитектура, обрезка и децентрализованная верификация обеспечивают эффективность против многовекторных угроз IoT. Работа открывает перспективы для исследований в кибербезопасности, предлагая решения для защиты IoT-сетей от сложных атак.

¹ Proof of Voting (алгоритм консенсуса) – это консенсусный алгоритм в блокчейн-сетях, при котором участники подтверждают транзакции и обеспечивают безопасность сети путем голосования за блоки или транзакции. [Proof of Voting is a consensus algorithm in blockchain networks, in which participants confirm transactions and ensure network security by voting for blocks or transactions.]

² CIC IoT Dataset 2023. http://cicresearch.ca/IOTDataset/CIC_IOT_Dataset2023/Dataset/. Дата обращения 30.06.2025. / Accessed June 30, 2025.

Ключевые слова: многовекторные атаки, интернет вещей, выявление угроз, нейронные сети, блокчейн, обрезка нейронов, кибербезопасность, компрометация узлов, консенсус, федеративное обучение

Для цитирования: Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Огур М.Г., Линец Г.И., Мочалов В.П. Имитационная модель масштабируемого метода выявления многовекторных атак с учетом ограничений вычислительных и информационных ресурсов IoT-устройств. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):25–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-25-40>, <https://www.elibrary.ru/JKQMQM>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Simulation model of a scalable method for detecting multi-vector attacks taking into account the limitations of computing and information resources of IoT devices

Vyacheslav I. Petrenko, Fariza B. Tebueva, Maxim G. Ogur[®], Gennady I. Linets, Valery P. Mochalov

North Caucasus Federal University, Stavropol, 355017 Russia

[®] *Corresponding author, e-mail: ogur26@gmail.com*

• Submitted: 14.10.2024 • Revised: 13.05.2025 • Accepted: 07.08.2025

Abstract

Objectives. The study sets out to develop a scalable method for detecting multi-vector attacks on Internet of Things (IoT) devices. Given the growth of security threats in IoT networks, such a solution must provide high accuracy in detecting attacks with minimal computing costs while taking into account the resource constraints of IoT devices.

Methods. The developed hybrid neural network architecture combines convolutional networks for spatial dependence analysis and long short-term memory networks or gated recurrent units representing types of recurrent neural networks for analyzing time dependencies in network traffic. Model parameters and computational costs are reduced by pruning. A blockchain with a proof of voting³ consensus mechanism provides secure data management and decentralized verification.

Results. Experiments on the CIC IoT Dataset 2023⁴ showed the effectiveness of the model: the accuracy and F1 measure were 99.1%. This confirms the ability to detect known and new attacks in real time with high accuracy and completeness. Processing time is reduced to 12 ms, while memory usage is reduced to 180 MB, which makes the model suitable for devices with limited resources.

Conclusions. The developed model is superior to analogues in terms of accuracy, processing time, and memory usage. Hybrid architecture, pruning, and decentralized verification provide effectiveness against multi-vector IoT threats.

³ Proof of Voting is a consensus algorithm in blockchain networks, in which participants confirm transactions and ensure network security by voting for blocks or transactions.

⁴ CIC IoT Dataset 2023. http://cicresearch.ca/IOTDataset/CIC_IOT_Dataset2023/Dataset/. Accessed June 30, 2025.

Keywords: multi-vector attacks, Internet of Things, threat detection, neural networks, blockchain, neuronal pruning, cybersecurity, node compromise, consensus, federated learning

For citation: Petrenko V.I., Tebueva F.B., Ogur M.G., Linets G.I., Mochalov V.P. Simulation model of a scalable method for detecting multi-vector attacks taking into account the limitations of computing and information resources of IoT devices. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):25–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-25-40>, <https://www.elibrary.ru/JKQMQM>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологий интернета вещей (Internet of Things, IoT) сети IoT-устройств становятся неотъемлемой частью современной информационной инфраструктуры. Эти устройства обеспечивают взаимодействие множества систем и платформ в реальном времени, что повышает эффективность, удобство и гибкость различных отраслей – от умных домов и городов до промышленных и медицинских систем. Однако широкое распространение IoT приводит к увеличению числа потенциальных угроз информационной безопасности, т.к. IoT-устройства часто ограничены в вычислительных и энергетических ресурсах, что делает их уязвимыми для многовекторных кибератак. Среди наиболее опасных атак можно выделить DDoS⁵, атаки на маршрутизацию, SQL⁶-инъекции и другие формы многовекторных угроз.

Современные методы выявления атак часто требуют значительных вычислительных ресурсов и недостаточно эффективны в условиях ограниченных возможностей IoT-устройств. Это приводит к необходимости разработки новых подходов, которые бы учитывали ограничения вычислительных и информационных ресурсов IoT и одновременно обеспечивали высокий уровень безопасности.

В данной статье предложена масштабируемая модель выявления многовекторных атак, которая сочетает гибридную архитектуру нейронных сетей CNN + LSTM/GRU⁷ (сверточная нейронная сеть Convolutional Neural Network (CNN) и сеть долгой краткосрочной памяти Long Short-Term Memory (LSTM)) для анализа пространственно-временных зависимостей сетевого трафика, децентрализованную верификацию данных с использованием блокчейн-технологий

⁵ Distributed Denial of Service (распределенный отказ от обслуживания) – форма кибератаки на веб-системы с целью вывести их из строя или затруднить доступ к ним для обычных пользователей. [Distributed Denial of Service is a form of cyberattack on web systems in order to disable them or make it difficult for ordinary users to access them.]

⁶ Structured Query Language – язык структурированных запросов.

⁷ Gated Recurrent Unit – управляемый рекуррентный блок.

и технику обрезки нейронов (pruning) для снижения вычислительных затрат. Предложенная модель ориентирована на работу в реальном времени и на ограниченных ресурсах, что делает ее применимой для современных IoT-сетей. В статье проводится экспериментальная оценка эффективности разработанной модели на основе датасета CIC IoT Dataset 2023, что позволяет продемонстрировать ее преимущество по сравнению с существующими решениями.

1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

В [1] предложен математический аппарат для моделирования кибератак на энергосети с использованием подходов теории игр и построения графов атак. В основе модели лежит динамическое взаимодействие между атакующим и защитником (attacker-defender dynamics), где атакующий пытается нарушить работу энергосети, а защитник стремится предотвратить атаки, используя предиктивные и реактивные меры защиты. Основным достоинством модели является учет в ней динамического взаимодействия между атакующим и защитником, что делает модель более реалистичной для применения в сложных системах. Модель использует графы атак, что позволяет моделировать многослойные и многошаговые атаки, учитывая их сложность и разнообразие. К недостаткам модели можно отнести требование наличия исходных данных о системе и уязвимостях, а также точных оценок вероятностей успешной атаки и затрат на вывод системы из строя. Это может усложнять ее применение на практике для систем с ограниченными данными.

В [2] предложен метод обнаружения многовекторных кибератак в инфраструктуре IoT на основе анализа сетевого трафика и машинного обучения. Авторы выделяют 4 ключевых типа признаков для анализа трафика: основанные на потоках данных, MQTT⁸, DNS⁹ и HTTP¹⁰, которые помогают

⁸ Message queuing telemetry transport – протокол обмена данными для IoT.

⁹ Domain name system – система доменных имен.

¹⁰ HyperText transfer protocol – протокол для передачи данных.

в ускоренном выявлении атак. Метод позволяет повысить эффективность обнаружения атак за счет ранней диагностики вредоносного трафика на основе анализа потоков и глубокого анализа пакетов для точного выявления многовекторных атак. Это делает метод подходящим для сетей IoT с высоким объемом данных и сложной структурой атак. Однако сложность метода заключается в необходимости точного определения набора признаков и их обработки, что требует больших вычислительных ресурсов для реального времени в крупных IoT-сетях.

В [3] предложена методика защиты децентрализованных IoT-сетей от многовекторных DDoS-атак на основе применения блокчейн-технологий и методов глубокого обучения. Предлагается двухэтапный подход «Prevent-then-Detect», где на 1-м этапе система предотвращения атак (intrusion prevention system, IPS) работает через блокчейн-консорциум валидаторов, а на 2-м этапе система обнаружения атак (intrusion detection system, IDS) использует модели глубокого обучения для анализа сетевого трафика и выявления угроз. Блокчейн обеспечивает безопасность передачи данных между узлами сети и управляет доступом к ресурсам IoT-сети с использованием интеллектуальных контрактов, которые фиксируют действия по обнаружению атак и предотвращению угроз. Система предотвращения атак в блокчейн-консорциуме использует алгоритм консенсуса для проверки подозрительного трафика. Однако модель требует значительных вычислительных ресурсов для работы блокчейн-системы и глубоких нейронных сетей, что может ограничить ее применение на устройствах с ограниченными вычислительными возможностями в IoT-сетях.

В [4] предложен метод для обнаружения многовекторных атак (multi-vector attacks, MVA) на основе использования многослойной перцептронной сети (multilayer perceptron, MLP). Авторы используют подход, основанный на анализе сетевого трафика с применением машинного обучения для выявления различных векторов атак. В частности, сетевые данные из пакетных захватов (packet capturing, PCAP) анализируются для определения аномальных паттернов в поведении сетевых соединений. Цель метода – повысить точность обнаружения атак за счет использования нейронных сетей для классификации данных и их последующего анализа. Основной компонент предложенной системы – MLP, состоящая из входного слоя, скрытого слоя и выходного слоя. Метод MLP подходит для задач, где важна высокая точность обнаружения, однако для сетей с ограниченными вычислительными ресурсами могут потребоваться более быстрые модели.

В [5] предложен анализ различных методов выявления DDoS-атак в IoT-сетях с акцентом

на особенности и вызовы, возникающие при применении этих методов к сетям Интернета вещей. Авторы проводят обзор нескольких категорий методов обнаружения атак, включая сигнатурные, аномалийные и гибридные подходы. Математический аппарат включает алгоритмы, основанные на машинном обучении, такие как метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM), деревья решений (Decision Trees), метод K-ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN) и метод случайного леса (Random Forest). Эти алгоритмы используются для классификации сетевого трафика и выделения аномальных паттернов, характерных для DDoS-атак. Предложенные подходы позволяют более эффективно справляться с высокообъемными и разнообразными атаками на IoT-устройства, однако их эффективность ограничена сложностью настройки моделей и необходимостью больших вычислительных ресурсов.

В [6] предложен математический аппарат для оценки методов обнаружения вторжений в условиях многовекторных атак 5-го поколения (Gen V Multi-Vector Attacks). Основу методики составляет комбинация 2 методов принятия решений: нечеткой аналитической иерархии процессов (Fuzzy Analytic Hierarchy Process, Fuzzy AHP) и техники выбора на основе сходства с идеальным решением (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS). Эти методы позволяют оценить различные критерии эффективности систем обнаружения атак: точность обнаружения, адаптивность, масштабируемость, влияние на ресурсы, время отклика и автоматизация. Особое внимание уделяется таким аспектам, как адаптация к новым угрозам, возможность работы в масштабируемых сетях и минимизация нагрузки на ресурсы при обеспечении высокого уровня автоматизации и быстрого реагирования.

В [7] предложен подход для обнаружения многовекторных DDoS-атак в сетях интернета вещей с использованием глубокого ансамблевого обучения и метода обрезки нейронных сетей. Авторы представляют систему Deep Ensemble learning with Pruning (DEEPSHIELD), которая объединяет сети CNN и LSTM для анализа сетевого трафика и обнаружения как высокообъемных, так и малообъемных DDoS-атак. Основой математического аппарата является использование ансамблевого подхода, где CNN отвечает за извлечение пространственных признаков из сетевого трафика, а LSTM используется для анализа временных зависимостей. Система DEEPSHIELD демонстрирует высокую точность в обнаружении атак, превышающую 90%, и сокращает время на предсказание по сравнению с аналогичными моделями.

В [8] предложена гибридная модель для анализа угроз и классификации атак в сетях Интернета вещей с использованием глубинного обучения и адаптивного алгоритма оптимизации Мауфлу (LAMOА¹¹). Модель направлена на выявление маршрутизирующих атак в IoT-сетях, таких как атаки типа sinkhole, wormhole, black hole и Sybil, которые значительно снижают производительность сетей и их безопасность. Основой модели является использование рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью для обработки временных рядов сетевого трафика и классификации атак, дополненной адаптивным алгоритмом Мауфлу для оптимизации гиперпараметров модели. Модель демонстрирует высокую способность к точной классификации различных типов атак и является эффективным решением для обеспечения безопасности IoT-сетей, однако ее сложность и вычислительные затраты могут ограничивать ее применение в сетях с ограниченными ресурсами, что требует дальнейшей оптимизации.

В [9] предлагается легковесная структура для обнаружения многовекторных DDoS-атак в системах мобильной медицины на базе IoT с использованием глубокого обучения. Подход акцентирует внимание на важности точности и эффективности, что перекликается с целями предлагаемой модели. Подчеркивает необходимость адаптации методов обнаружения к специфике мобильных IoT-устройств, что делает их работу актуальной для дальнейших исследований в данной области.

В [10] предложена методология для обнаружения и противодействия многовекторным угрозам в децентрализованных IoT-системах. Авторы акцентируют внимание на необходимости комплексных стратегий безопасности. Это подчеркивает важность интеграции различных методов защиты, включая машинное обучение и блокчейн-технологии.

Статьи [11–15] рассматриваются для сравнения подходов к совместному смягчению атак в облачных и туманных вычислениях, что может улучшить масштабируемость разработанной в статье модели. В [11] предлагаются методы, которые могут улучшить масштабируемость и эффективность защиты IoT-сетей, что является важным аспектом обеспечения безопасности в условиях растущего числа устройств и объемов трафика. В [12] представлена методика защиты децентрализованных IoT-сетей от многовекторных DDoS-атак с использованием блокчейн-технологий и методов глубокого обучения. Предлагается двухэтапный подход, который сочетает предотвращение и обнаружение атак, что

позволяет эффективно управлять сетевыми угрозами и повышать уровень безопасности. В [13] предложен метод для обнаружения многовекторных атак на основе использования MLP. Акцентируется внимание на важности анализа сетевого трафика для выявления аномальных паттернов, что является ключевым моментом для повышения точности обнаружения атак. В [14] проведен обзор различных методов выявления DDoS-атак в IoT-сетях. Рассматриваются сигнатурные, аномалийные и гибридные подходы, перечислены их преимущества и недостатки в контексте IoT. В [15] предложен математический аппарат для оценки методов обнаружения вторжений в условиях многовекторных атак 5-го поколения. Используется комбинация методов принятия решений, что позволяет оценить различные критерии эффективности систем обнаружения атак, включая точность и адаптивность.

Для построения имитационной модели масштабируемого метода выявления многовекторных атак с учетом ограничений вычислительных и информационных ресурсов IoT-устройств были выбраны 3 наиболее подходящих аналога:

1. Метод Deep Ensemble Learning with Pruning [7], использующий комбинацию CNN и LSTM для анализа сетевого трафика и техники обрезки нейронов для снижения вычислительных затрат.
2. Модель Threat Analysis [8], использующая LSTM для анализа маршрутизирующих атак в IoT-сетях с адаптивной оптимизацией гиперпараметров с помощью алгоритма Мауфлу.
3. Методика Blockchain-based Threat Intelligence Framework [3], комбинирующая технологию блокчейн с глубоким обучением для защиты IoT-сетей от многовекторных DDoS-атак.

2. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАСШТАБИРУЕМОГО МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ МНОВЕКТОРНЫХ АТАК С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ IoT-УСТРОЙСТВ

Разрабатываемая модель, минимизируя вычислительные затраты и учитывая ограничения, приходящие к ресурсам IoT-устройств, должна выявлять многовекторные атаки с высокой точностью и быть пригодной для масштабирования в больших децентрализованных IoT-сетях.

Для построения имитационной модели использованы следующие основные компоненты:

1. Модуль анализа сетевого трафика (CNN + LSTM/GRU).
2. Алгоритм Мауфлу для адаптивной оптимизации гиперпараметров.

¹¹ LAMOА (Learning-based Adaptive Mayfly Optimization Algorithm) – глубинное обучение с использованием адаптивного алгоритма оптимизации Мауфлу.

3. Блокчейн-ориентированный механизм консенсуса Proof of Voting (PoV) для децентрализованной верификации.
 4. Техника обрезки нейронов для уменьшения вычислительных затрат.
- Рассмотрим более подробно эти компоненты.

2.1. Модуль анализа сетевого трафика (CNN + LSTM/GRU)

Модуль анализа сетевого трафика и выявления аномалий в последовательности данных использует гибридную архитектуру CNN и LSTM (или GRU для уменьшения вычислительных затрат), где:

- Convolutional Neural Network обрабатывает пространственные признаки сетевого трафика. Входные данные представляются в виде многомерного тензора, где каждый элемент представляет характеристики сетевых пакетов (например, время, размер, тип протокола). Сверточные слои выделяют пространственные закономерности в трафике;
- Long Short-Term Memory (или GRU) применяется для анализа временных зависимостей. Это помогает выявлять сложные многовекторные атаки, которые проявляются на разных временных интервалах. Long Short-Term Memory сохраняет информацию о предыдущих состояниях трафика и помогает прогнозировать будущие события, что важно для обнаружения долговременных атак, таких как DDoS.

Модуль анализа сетевого трафика в имитационной модели основывается на гибридной архитектуре, сочетающей сверточные нейронные сети для анализа пространственных зависимостей сетевого трафика и рекуррентные нейронные сети (LSTM или GRU) для анализа временных зависимостей. Такая структура позволяет эффективно анализировать многовекторные атаки, которые могут проявляться через сложные аномалии в пространственных и временных характеристиках сетевого трафика.

Сверточная нейронная сеть используется для извлечения пространственных признаков из сетевого трафика, представленного в виде многомерных данных (тензора). Входной трафик, который включает такие параметры, как временные шаги, размер пакета, тип протокола, IP-адреса и другие метрики, преобразуется в тензор размерности $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{h \times w \times c}$, где h – высота тензора (число пакетов или временных шагов); w – ширина тензора (число признаков или характеристик на 1 пакет); c – количество каналов (например, это может быть разбиение по протоколам или типам данных).

Основное уравнение для операции свертки записывается как

$$\mathbf{Y}_{i,j,k} = \sum_{m=1}^{h_k} \sum_{n=1}^{w_k} \mathbf{X}_{i+m,j+n,c} \mathbf{W}_{m,n,k} + b_k, \quad (1)$$

где $\mathbf{X}_{i,j,c}$ – входной тензор данных для позиции (i, j) на канале c ; $\mathbf{W}_{m,n,k}$ – фильтр свертки с размерами $h_k \times w_k$ для канала k ; b_k – смещение (bias) для канала k ; $\mathbf{Y}_{i,j,k}$ – результат свертки для канала k .

После выполнения операции свертки (1) для повышения нелинейности применяется функция активации:

$$\mathbf{Z}_{i,j,k} = \text{ReLU}(\mathbf{Y}_{i,j,k}) = \max(0, \mathbf{Y}_{i,j,k}),$$

где ReLU (Rectified Linear Unit) является одной из самых распространенных функций активации, которая оставляет только положительные значения.

Сверточная сеть выделяет пространственные паттерны в данных сетевого трафика, такие как частота пакетов и корреляция различных параметров трафика. После того, как пространственные признаки выделены с помощью CNN, они передаются в LSTM для анализа временных зависимостей. Long Short-Term Memory учитывает динамику изменения трафика во времени и помогает выявлять многовекторные атаки, которые могут проявляться через последовательные изменения в поведении сети.

Рассмотрим основные компоненты LSTM.

1. Входные ворота, управляющие выбором нового входного состояния для обновления состояния памяти. Активация входных ворот в момент времени t осуществляется в соответствии со следующим выражением:

$$i_t = \sigma(\mathbf{W}_{in} \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_{in}), \quad (2)$$

где \mathbf{x}_t – входной вектор в момент времени t (пространственные признаки, извлеченные из CNN); h_{t-1} – скрытое состояние на предыдущем шаге времени; \mathbf{W}_{in} – матрица весов для входных ворот; \mathbf{b}_{in} – вектор смещений для входных ворот; in – индекс, обозначающий входные ворота; σ – сигмоида, нормализующая значения в интервале $[0, 1]$.

2. Забывающие ворота определяют, какая часть предыдущего состояния должна быть сохранена. Функция f_t – активация забывающих ворот может быть записана как:

$$f_t = \sigma(\mathbf{W}_f \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_f), \quad (3)$$

где \mathbf{W}_f – матрица весов для забывающих ворот; \mathbf{b}_f – вектор смещений для забывающих ворот; f – индекс, обозначающий забывающие ворота (англ. forget – забывать).

3. Состояние памяти C_t обновляется на каждом временном шаге с учетом новой информации следующим образом:

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \tanh(\mathbf{W}_c \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_c), \quad (4)$$

где C_{t-1} – предыдущее состояние памяти; C_t – новое состояние памяти; f_t – забывающие ворота; i_t – входные ворота; \tanh – гиперболический тангенс, являющийся функцией активации, используемой для обновления состояния памяти; \mathbf{W}_c – матрица весов для состояния памяти; $[h_{t-1}, \mathbf{x}_t]$ – конкатенация скрытого состояния на предыдущем шаге и текущего входного вектора; \mathbf{b}_c – вектор смещения для обновления состояния памяти; c – индекс, обозначающий сбор данных в память (англ. collect – собирать).

4. Выходные ворота контролируют, какая часть состояния памяти используется для обновления скрытого состояния. Активация выходных ворот осуществляется следующим образом:

$$o_t = \sigma(\mathbf{W}_o \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_o), \quad (5)$$

где o_t – активация выходных ворот; σ – сигмовидная функция активации; \mathbf{W}_o – матрица весов для выходных ворот; \mathbf{b}_o – вектор смещения выходных ворот; o – индекс, обозначающий выходные ворота (англ. output – выход).

Новое скрытое состояние h_t вычисляется по следующему выражению:

$$h_t = o_t \tanh(C_t), \quad (6)$$

где h_t – скрытое состояние в момент времени t , которое используется для окончательной классификации сетевого трафика; C_t – текущее состояние памяти.

Вместо LSTM можно использовать GRU, которая является более легкой по вычислительным затратам модификацией. GRU объединяет забывающие и входные ворота в единое обновляющее ворота, что снижает вычислительные затраты и улучшает работу модели в условиях ограниченных ресурсов.

Рассмотрим основные компоненты GRU.

1. Обновляющие ворота

$$z_t = \sigma(\mathbf{W}_z \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_z), \quad (7)$$

где z_t – активация обновляющих ворот, которая контролирует, как сильно текущее состояние влияет на предыдущее; z – индекс, отображающий обновляющие ворота (англ. zero – ноль, обнуление).

2. Ворота сброса

$$r_t = \sigma(\mathbf{W}_r \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_r), \quad (8)$$

где r_t – активация сбросных ворот, которые контролируют, как сильно предыдущее состояние должно быть забыто; r – индекс, отображающий ворота сброса (англ. reset – сброс).

3. Обновление скрытого состояния

$$h_t = (1 - z_t) h_{t-1} + z_t \tanh(\mathbf{W}_h [r_t h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_h), \quad (9)$$

где h_t – обновленное скрытое состояние в момент времени t ; \mathbf{W}_h – матрица весов для обновления скрытого состояния; h – индекс, отображающий ворота скрытого состояния (англ. hidden – скрытый).

Рекуррентные нейронные сети GRU используют меньше параметров, чем LSTM, что делает их более подходящими для задач, требующих меньших вычислительных затрат, таких как работа в условиях ограниченных ресурсов IoT-устройств.

После обработки данных CNN и LSTM/GRU модель использует полносвязный слой для окончательной классификации трафика. Этот слой вычисляет вероятности принадлежности данных к одному из классов, например, нормальному трафику или атаке:

$$P_{\text{attack}} = \text{Softmax}(\mathbf{W}_{\text{out}} h_T + \mathbf{b}_{\text{out}}), \quad (10)$$

где P_{attack} – вероятность того, что входной трафик является атакой; \mathbf{W}_{out} – веса выходного слоя; h_T – скрытое состояние на последнем временном шаге; \mathbf{b}_{out} – смещение выходного слоя; Softmax нормализует выходные значения в вероятности.

Основными переменными модели являются: $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{h \times w \times c}$ – входной тензор сетевого трафика; \mathbf{W} – весовые матрицы слоев (CNN, LSTM/GRU); \mathbf{b} – смещения слоев (CNN, LSTM/GRU); i, f, o – входные, забывающие и выходные ворота в LSTM; z, r – обновляющие и сбросные ворота в GRU; h_t – скрытое состояние на шаге времени t ; C_t – состояние памяти в LSTM; P_{attack} – вероятность того, что трафик является атакующим.

Модуль анализа сетевого трафика, основанный на гибридной архитектуре CNN+LSTM (или GRU), сочетает пространственные и временные зависимости сетевых данных. Такая архитектура позволяет эффективно выявлять многовекторные атаки в IoT-сетях, что особенно важно для систем с ограниченными вычислительными ресурсами.

Модель работает следующим образом:

1. Входной трафик преобразуется в многомерный тензор, который поступает на сверточные слои для выделения признаков.
2. Выделенные признаки поступают в LSTM/GRU для анализа временных зависимостей.
3. Модель классифицирует трафик как нормальный или атакующий.

2.2. Адаптивная оптимизация гиперпараметров с использованием адаптированного алгоритма Maufly

Для улучшения эффективности и настройки модели в зависимости от конкретных условий

сети (например, объема данных, типа атак) применим адаптивный алгоритм Мауфлу [8]. Алгоритм Мауфлу помогает автоматически находить оптимальные гиперпараметры модели, такие как:

- количество слоев CNN и LSTM;
- число фильтров и нейронов на каждом слое;
- скорость обучения модели.

Адаптированный алгоритм Мауфлу позволяет ускорить процесс настройки модели и обеспечить ее оптимальную производительность без необходимости ручной настройки. Алгоритм использует эволюционные методы для поиска оптимальных параметров и адаптируется в процессе обучения модели.

Основными шагами адаптированного алгоритма Мауфлу являются:

1. Инициализация популяции.
2. Мужские и женские особи: разделение на 2 группы с разными поисковыми стратегиями.
3. Глобальный и локальный поиск: поиск лучших решений мужскими и женскими особями.
4. Эволюция и обновление скоростей и позиций.
5. Сближение и размножение.

Основными переменными и параметрами алгоритма являются:

N – количество особей в популяции;

x_i^m – положение мужской особи i в пространстве решений (значение гиперпараметров);

x_i^f – положение женской особи i ;

v_i^m – скорость движения мужской особи;

v_i^f – скорость движения женской особи;

α, β, γ – коэффициенты управления движением особей (коэффициенты инерции, ускорения и взаимодействия);

g_{best} – глобально лучшее решение, найденное всеми особями;

p_{best} – личное лучшее решение для каждой особи;

λ – коэффициент притяжения для сближения мужских и женских особей;

ϵ – параметр случайного отклонения, влияющий на мутацию в поиске.

2.2.1. Инициализация популяции

Алгоритм Мауфлу начинается с инициализации начальной популяции особей (гиперпараметров) случайным образом в поисковом пространстве. Каждая особь представляет собой вектор гиперпараметров модели:

$$\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}],$$

где d – размерность пространства гиперпараметров (например, количество слоев, нейронов, скорость обучения и т.д.).

Положение каждой особи x_i в пространстве гиперпараметров инициализируется случайным образом:

$$\mathbf{x}_i^m(0), \mathbf{x}_i^f(0) \sim \text{Uniform}(\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max}),$$

где \mathbf{x}_{\min} и \mathbf{x}_{\max} – границы пространства гиперпараметров; $\text{Uniform}(\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max})$ – функция выбора случайных значений из интервала $[\mathbf{x}_{\min}; \mathbf{x}_{\max}]$.

2.2.2. Обновление скорости и положения мужских особей

Мужские особи ищут решения в глобальном пространстве, обновляя свое положение на основе личного лучшего решения p_{best} и глобального лучшего решения g_{best} . Скорость обновления положения особи вычисляется по правилу:

$$\mathbf{v}_i^m(t+1) = \alpha \mathbf{v}_i^m(t) + \beta_1 r_1 (p_{best,i} - \mathbf{x}_i^m(t)) + \beta_2 r_2 (g_{best,i} - \mathbf{x}_i^m(t)),$$

где α – коэффициент инерции (контролирует, насколько сильно скорость предыдущего шага влияет на текущее положение); β_1, β_2 – коэффициенты ускорения, которые управляют влиянием личного и глобального лучшего решения на обновление скорости; $r_1, r_2 \sim \text{Uniform}(0, 1)$ – случайные значения, которые обеспечивают случайное отклонение в поиске.

Положение каждой мужской особи обновляется с учетом его новой скорости:

$$\mathbf{x}_i^m(t+1) = \mathbf{x}_i^m(t) + \mathbf{v}_i^m(t+1).$$

2.2.3. Обновление скорости и положения женских особей

Женские особи выполняют локальный поиск, обновляя свое положение, опираясь на расстояние до мужских особей. Скорость обновления положения женской особи вычисляется с учетом взаимодействия с мужскими особями:

$$\mathbf{v}_i^f(t+1) = \lambda(x_i^m(t) - x_i^f(t)) + \epsilon,$$

где λ – коэффициент притяжения между мужскими и женскими особями; ϵ – случайное отклонение для обеспечения разнообразия решений.

Положение женских особей обновляется следующим образом:

$$\mathbf{x}_i^f(t+1) = \mathbf{x}_i^f(t) + \mathbf{v}_i^f(t+1).$$

2.2.4. Оценка решений

Каждая особь оценивается с помощью целевой функции (fitness function), которая может быть

связана с точностью модели, временем обучения, сложностью модели и другими параметрами. Функция оценки $F(\mathbf{x}_i)$ для каждой особи рассчитывается как:

$$F(\mathbf{x}_i) = \text{Evaluation Model}(\mathbf{x}_i),$$

где \mathbf{x}_i – гиперпараметры, которые особь представляет, а *Evaluation Model* – это функция, оценивающая производительность модели для данных гиперпараметров.

2.2.5. Сближение и размножение

После обновления скоростей и позиций мужские и женские особи сближаются, что моделирует этап размножения в алгоритме. Когда мужские и женские особи достигают определенной близости, происходит кроссинговер и мутация:

- кроссинговер передает часть генетической информации (гиперпараметров) от мужских особей к женским особям

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \lambda \mathbf{x}_i^m + (1 - \lambda) \mathbf{x}_i^f,$$

где \mathbf{x}_{new} – новое значение (положение) особи, полученное в результате кроссинговера; \mathbf{x}_i^m – текущее положение мужской особи i ; \mathbf{x}_i^f – текущее положение женской особи i ; λ – коэффициент, определяющий вес влияния мужской особи в новом значении (обычно λ находится в диапазоне от 0 до 1).

- мутация выполняет случайное изменение некоторых параметров с вероятностью p_{mut} .

2.2.6. Критерий завершения

Алгоритм Мауфлу выполняется до тех пор, пока не будет выполнено одно из следующих условий: достигнуто максимальное количество итераций T_{max} или не наблюдается улучшение функции оценки в течение нескольких последовательных итераций.

2.3. Механизм децентрализованной верификации на основе блокчейн-технологии

Для обеспечения безопасности и надежности системы в условиях децентрализованных IoT-сетей применяется блокчейн-ориентированный механизм консенсуса PoV [3]. Основными функциями этого компонента являются

- децентрализованная верификация данных об атаках, при которой несколько узлов сети анализируют сетевой трафик и передают информацию о возможных атаках в распределенный реестр;
- валидация блоков происходит через голосование узлов-валидаторов, если больше 50% узлов

подтверждают атаку, информация о ней записывается в распределенный реестр, а вредоносные IP-адреса блокируются с помощью смарт-контрактов.

Модуль децентрализованной верификации использует блокчейн-технологии для обеспечения безопасности данных и предотвращения атак в IoT-сетях. Этот модуль работает на основе механизма консенсуса PoV, который позволяет узлам сети (валидаторам) голосовать за блоки данных о трафике, атаках или состоянии сети. Блокчейн обеспечивает защиту от подделки данных, децентрализованное хранение и автоматическое выполнение действий, таких как блокировка вредоносных IP-адресов, через смарт-контракты.

Основными элементами и переменными являются:

B – блок данных, содержащий информацию о сетевом трафике, выявленных атаках или обновлениях состояния сети;

N – количество узлов (валидаторов) в блокчейн-сети;

V_i – голос валидатора i за принятие или отклонение блока;

P_{valid} – вероятность того, что блок будет признан действительным;

T_B – время валидации блока;

AM – смарт-контракт (Action Module), который содержит данные об атаках и блокировках IP-адресов.

В данном подразделе представлены ключевые шаги процесса обработки сетевого трафика и обеспечения безопасности в блокчейн-системе. Эти шаги описывают, как узлы сети взаимодействуют для выявления аномалий, верификации данных и автоматической блокировки подозрительных IP-адресов. Каждый шаг играет важную роль в создании надежной и эффективной системы защиты от кибератак, обеспечивая целостность данных и быструю реакцию на угрозы.

Шаги процесса обработки сетевого трафика и обеспечения безопасности в блокчейн-системе состоят в следующем:

Шаг 1. Формирование блока данных.

Каждый узел блокчейн-сети обрабатывает поступающий сетевой трафик и, если обнаружена аномалия или подозрительная активность (например, многовекторная атака), узел формирует блок данных B . Этот блок включает следующие элементы:

$$B = \{\text{Block ID, Data, Previous Hash, Timestamp, Signature}\},$$

где Block ID – уникальный идентификатор блока; Data – информация о трафике и возможных атаках (например, IP-адреса, тип атаки, временные

метки); Previous Hash – хеш предыдущего блока в блокчейне для поддержания непрерывной цепочки; Timestamp – время создания блока; Signature – цифровая подпись узла, который сформировал блок.

Шаг 2. Механизм консенсуса PoV.

После создания блока он передается другим узлам сети для верификации с использованием механизма консенсуса PoV.

Валидация блока осуществляется путем голосования узлов сети в следующем порядке:

- каждый узел анализирует блок данных B , проверяет его целостность и достоверность, а затем отправляет свой голос V_i (голосование может быть бинарным: $V_i = 1$ – за принятие блока, $V_i = 0$ – за отклонение блока);
- вероятность того, что блок будет признан действительным, рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{valid}} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N}.$$

Если $P_{\text{valid}} \geq 0.5$ (большинство узлов поддерживают блок), то блок считается действительным и добавляется в распределенный реестр, если $P_{\text{valid}} < 0.5$, то блок отклоняется.

Шаг 3. Обновление распределенного реестра.

После достижения консенсуса и подтверждения блока B он добавляется в распределенный реестр. Каждая запись в распределенном реестре связана с предыдущим блоком через хеш Previous Hash, что обеспечивает непрерывную и неизменяемую цепочку данных. Новый блок добавляется к распределенный реестр:

$$B_{\text{new}} = \{\text{Hash}(B_{\text{prev}}), \text{Data}_{\text{new}}, \text{Timestamp}_{\text{new}}, \text{Signature}_{\text{new}}\},$$

где $\text{Hash}(B_{\text{prev}})$ – хеш предыдущего блока, который гарантирует целостность всей цепочки.

Шаг 4. Использование смарт-контрактов для автоматической блокировки IP-адресов.

Блокчейн-система использует смарт-контракты для автоматического выполнения действий при обнаружении атаки. Смарт-контракты позволяют автоматически блокировать IP-адреса, отправлять уведомления и обновлять черные списки в сети. Структура смарт-контракта может выглядеть следующим образом:

$$\text{AM} = \{\text{Source IP (SIP), Destination IP (DIP), Signature, Blacklisted IP, Attack Label}\},$$

где Source IP (SIP) – IP-адрес, от которого поступает трафик; Destination IP (DIP) – IP-адрес

целевого устройства; Signature – цифровая подпись данных для подтверждения подлинности информации; Blacklisted IP – список IP-адресов, которые были заблокированы после обнаружения атаки; Attack Label – метка атаки, которая содержит тип атаки (например, DDoS, SQL-инъекция, многовекторная атака).

Шаг 5. Процесс блокировки IP-адресов.

Как только блок с данными об атаке подтвержден и добавлен в блокчейн, смарт-контракт автоматически выполняет блокировку вредоносных IP-адресов в сети. Например, если обнаружен DDoS-трафик, IP-адрес атакующего устройства SIP добавляется в черный список Blacklisted IP через выполнение смарт-контракта

$$\text{AM}(\text{SIP}) = \text{Blacklisted IP}.$$

Эти данные обновляются на всех узлах сети через распределенную блокчейн-структуру, что гарантирует согласованность действий всех участников.

Шаг 6. Время валидации блока.

Для каждого блока B вычисляется время валидации T_B , которое зависит от времени голосования всех узлов t_{vote} , времени выполнения смарт-контрактов t_{contract} и времени передачи блока между узлами t_{transmit} :

$$T_B = t_{\text{vote}} + t_{\text{contract}} + t_{\text{transmit}}.$$

Оптимизация времени валидации блока критична для работы IoT-сетей с ограниченными ресурсами и высокой скоростью обмена данными.

2.4. Техника обрезки нейронов (pruning)

Для уменьшения вычислительных затрат и оптимизации работы модели на маломощных IoT-устройствах используется техника обрезки нейронов. После обучения модели малозначимые нейроны и их связи удаляются, что сокращает объем модели без значительного ухудшения ее точности.

Применение техники обрезки нейронов включает следующие этапы:

- после обучения нейронной сети анализируются веса ее связей. Если веса находятся ниже заданного порога, связи удаляются;
- модель перезапускается с уменьшенным количеством нейронов и параметров, что уменьшает ее вычислительную сложность и требования к памяти.

Основная идея состоит в том, чтобы удалить ненужные или малозначимые нейроны или изменить веса после обучения модели, незначительно снижая ее производительность.

Основными элементами и переменными являются:

- \mathbf{W} – матрица весов нейронной сети;
- \mathbf{b} – вектор смещений (bias) нейронов;
- $f(\mathbf{W})$ – функция активации для весов сети;
- θ – пороговое значение для удаления весов;
- \mathbf{M} – матрица маски (Masking matrix) для обрезки весов;
- n_{total} – общее количество параметров (весов) в нейронной сети;
- n_{pruned} – количество удаленных (обрезанных) весов;
- p – доля удаленных весов или нейронов.

2.4.1. Определение значимости весов и нейронов

После того как нейронная сеть обучена, необходимо определить, какие веса \mathbf{W} в нейронной сети оказывают наименьшее влияние на выходные значения и могут быть удалены. Это делается путем вычисления значимости каждого веса $W_{i,j}$. В качестве меры значимости можно использовать метрику абсолютного значения веса, в которой чем меньше значение веса, тем менее значим этот вес для активации нейрона

$$\text{Significance}(W_{i,j}) = |W_{i,j}|. \quad (11)$$

Если вес близок к нулю, то его влияние на выход сети минимально, и такой вес может быть удален.

2.4.2. Применение порога обрезки

Для того чтобы решить, какие веса удалить, вводится пороговое значение θ . Веса, абсолютное значение которых меньше θ , считаются малозначимыми и удаляются (приравниваются к 0):

$$W_{i,j} = 0, \text{ если } |W_{i,j}| < \theta. \quad (12)$$

Порог обрезки выбирается эмпирически или оптимизируется в ходе экспериментов. Этот порог может быть статическим или динамическим, адаптируемым на основе анализа структуры модели.

2.4.3. Матрица маски

Для того чтобы обрезка весов не затронула нейроны, которые оказывают значительное влияние на выходные значения модели и ее производительность, используется матрица маски \mathbf{M} , обозначающая, какие веса должны быть сохранены, а какие – обнулены:

$$M_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } |W_{i,j}| \geq \theta, \\ 0, & \text{если } |W_{i,j}| < \theta. \end{cases} \quad (13)$$

Обрезанная матрица весов:

$$\mathbf{W}_{\text{pruned}} = \mathbf{W} \odot \mathbf{M}, \quad (14)$$

где \odot – поэлементное произведение матрицы весов \mathbf{W} и маски \mathbf{M} . Это гарантирует, что только значимые веса будут участвовать в вычислениях, а малозначимые веса будут исключены.

2.4.4. Оценка доли обрезанных весов

Доля обрезанных весов или нейронов вычисляется следующим образом:

$$p = \frac{n_{\text{pruned}}}{n_{\text{total}}}, \quad (15)$$

где n_{pruned} – количество обрезанных весов, т.е. весов, для которых $|W_{i,j}| < \theta$; n_{total} – общее количество весов в модели.

2.4.5. Адаптивная обрезка (iterative pruning)

Простой порог обрезки может быть недостаточно эффективным для всех слоев сети, особенно для глубоких моделей с множеством слоев. Поэтому может применяться итеративная обрезка: веса обрезаются не за один шаг, а поэтапно, с постепенным увеличением порога θ .

На каждой итерации значения весов пересчитываются с учетом маски:

$$\mathbf{W}_{\text{new}} = \mathbf{W}_{\text{old}} \odot \mathbf{M}. \quad (16)$$

Затем сеть переобучается на новых данных, чтобы восстановить ее точность после обрезки. Этот процесс повторяется несколько раз до тех пор, пока доля обрезанных весов не достигнет желаемого уровня p .

2.4.6. Основные шаги разработанной имитационной модели и метрики для оценки качества модели после обрезки весов

Основными шагами работы модели являются:

- 1) анализ трафика с помощью CNN + LSTM для выделения пространственно-временных признаков и выявления аномалий;
- 2) оптимизация модели: алгоритм Maufly автоматически настраивает гиперпараметры модели в зависимости от условий сети и данных, что обеспечивает ее адаптивность;
- 3) верификация и блокировка подозрительных IP-адресов и трафика осуществляются через блокчейн-консорциум. В случае подтверждения атаки на IP-адреса блокируются с помощью смарт-контрактов;

4) применение техники обрезки нейронов: после начального обучения и верификации модели применяется обрезка нейронов для уменьшения вычислительной сложности и адаптации модели к ресурсам IoT-устройств.

После обрезки важно оценить, как изменились производительность и ресурсоемкость модели. Основными метриками качества модели после обрезки весов являются:

1) доля правильных предсказаний среди всех общего количества предсказаний (точность правильных предсказаний):

$$E_1 = \text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (17)$$

где TP – количество истинно-положительных предсказаний (правильные предсказания атак), TN – количество истинно-отрицательных предсказаний (правильные предсказания нормального трафика), FP – количество ложноположительных предсказаний (ложные срабатывания), FN – количество ложноотрицательных предсказаний (пропущенные атаки);

2) полнота обучения:

$$E_2 = \text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (18)$$

определяющая способность модели обнаруживать все атаки в выборке;

3) доля истинно-положительных предсказаний среди всех положительных предсказаний (точность истинно-положительных предсказаний):

$$E_3 = \text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (19)$$

определяющая насколько предсказания модели о положительных классах являются корректными;

4) F1-мера:

$$E_4 = 2 \frac{E_2 E_3}{E_2 + E_3}, \quad (20)$$

являющаяся гармоническим средним между полнотой обучения и долей истинно-положительных предсказаний;

5) время обработки данных и выполнения предсказаний моделью:

$$E_5 = T_{\text{pruned}} = T_{\text{original}}(1 - p), \quad (21)$$

где T_{pruned} – время вычислений после обрезки, T_{original} – время вычислений исходной модели, p – доля обрезанных нейронов;

6) использование памяти (уменьшение использования памяти после удаления весов):

$$E_6 = M_{\text{pruned}} = M_{\text{original}}(1 - p), \quad (22)$$

где M_{pruned} – объем памяти, необходимый для хранения обрезанной модели, а M_{original} – память, необходимая для исходной модели.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

3.1. Методология эксперимента

В данном разделе проводится экспериментальная проверка разработанной имитационной модели выявления многовекторных атак с учетом ограничений вычислительных и информационных ресурсов IoT-устройств.

В эксперименте используется CIC IoT Dataset 2023, который содержит данные сетевого трафика, как нормального, так и атакующего, с разнообразными характеристиками и признаками, такими как:

- IP-адреса (Source/Destination);
- порты (Source/Destination);
- время соединения;
- размер пакета;
- протоколы (TCP¹², UDP¹³, HTTP, DNS);
- метки атак (например, DDoS, SQL-инъекция, Brute Force).

Датасет разбит на несколько классов:

- нормальный трафик;
- атакующий трафик (разные типы атак).

Эксперимент сравнивает результаты работы разработанной имитационной модели с несколькими аналогичными методами, применяющимися для обнаружения атак в IoT-сетях.

Данные CIC IoT Dataset 2023 были нормализованы с использованием Min-Max Scaling для приведения всех признаков к диапазону [0; 1]. Выбросы удалялись с применением метода межквартильного размаха (Interquartile Range, IQR), а новые признаки генерировались на основе агрегации временных характеристик трафика (например, среднее количество пакетов за 10 секунд).

Для тестирования использовалась рабочая станция на основе ноутбука Macbook Pro (Apple Inc., США) с процессором M2 Pro (включает в себя 12 процессорных ядер (8 производительных и 4 энергоэффективных), 19 графических ядер и 16-ядерный нейронный сопроцессор), 16 ГБ оперативное запоминающее устройство с пропускной способностью порядка 200 ГБ/с.

¹² Transmission Control Protocol – протокол управления передачей.

¹³ User Datagram Protocol – протокол пользовательских датаграмм.

3.2. Структура эксперимента

Эксперимент проводился в несколько этапов:

1. Подготовка данных, на котором данные CIC IoT Dataset 2023 разбиваются на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70/30. Далее проводится предварительная обработка данных: нормализация признаков, удаление выбросов, генерация новых признаков (если необходимо).
2. Обучение моделей, на котором обучение предложенной модели проводится на основе гибридной архитектуры CNN + LSTM/GRU с применением техники обрезки нейронов для сокращения вычислительных затрат.

Оптимизация гиперпараметров модели осуществляется с использованием алгоритма Maufly.

Для сравнения обучаются и другие модели, такие как Random Forest, SVM, Deep Learning (MLP).

Время обработки одного пакета данных определяется как сумма времени свертки (1), времени обработки LSTM/GRU (2)–(9) и времени классификации (10). Благодаря применению техники обрезки нейронов (11)–(16) модель значительно уменьшает количество параметров, что приводит к снижению вычислительных затрат и улучшению производительности на устройствах с ограниченными ресурсами. Это позволяет эффективно использовать модель в реальных условиях, таких как системы мониторинга в реальном времени, где важна быстрая реакция и минимальное потребление памяти. Для оценки качества имитационной модели используются метрики (17)–(22).

3.3. Анализ полученных результатов

Для оценки эффективности предложенной модели проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в таблице. Таблица содержит результаты работы оценки эффективности по метрикам качества (17)–(22) различных моделей, включая предложенную модель на основе гибридной архитектуры CNN + LSTM/GRU с применением техники обрезки нейронов.

Таблица. Результаты эксперимента

Модель	Метрики качества					
	$E_1, \%$	$E_2, \%$	$E_3, \%$	$E_4, \%$	$E_5, \text{мс}$	$E_6, \text{МБ}$
Random Forest	96.5	95.7	97.1	96.4	35	220
SVM	94.3	92.6	94.5	93.5	50	250
Deep Learning (MLP)	97.8	97.2	98.0	97.6	20	210
Имитационная модель CNN + LSTM/GRU	99.1	99.3	98.9	99.1	12	180

Рисунок 1 иллюстрирует сравнение результатов работы предложенной имитационной модели и ее аналогов по метрикам качества (17)–(20). На графике можно увидеть, что модель CNN + LSTM/GRU значительно превосходит другие модели по всем указанным метрикам, что подтверждает ее высокую эффективность в обнаружении многовекторных атак.

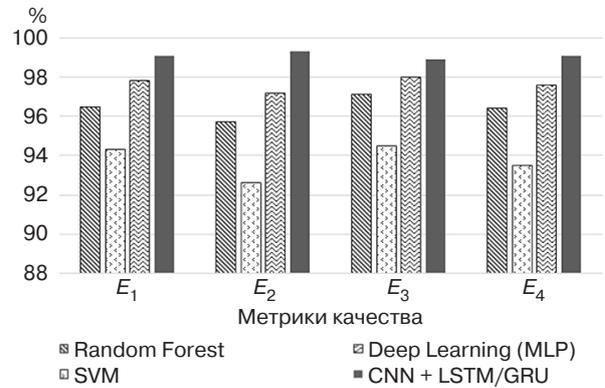


Рис. 1. Сравнение результатов работы разработанной имитационной модели CNN + LSTM/GRU и аналогов по метрикам E_1 (17) – E_4 (20)

На рис. 2 демонстрируются сравнительные результаты работы предлагаемой имитационной модели и ее аналогов по метрике E_5 (21). График показывает, что модель CNN + LSTM/GRU имеет наименьшее время обработки данных и наименьшее время выполнения предсказания (12 мс), что делает ее особенно подходящей для применения в реальном времени, в то время как другие модели требуют значительно больше времени.

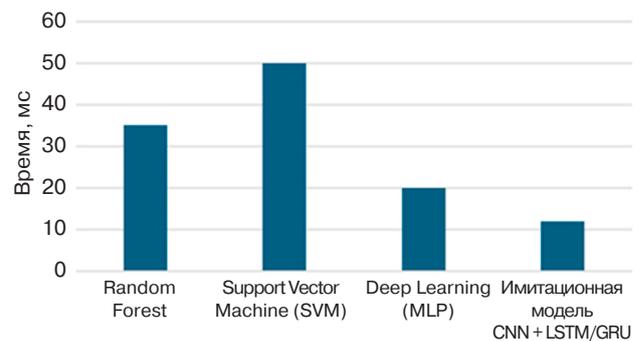


Рис. 2. Сравнение результатов работы разработанной имитационной модели CNN + LSTM/GRU и аналогов по метрике E_5 (21)

На рис. 3 представлены сравнительные результаты работы предложенной имитационной модели и ее аналогов по метрике E_6 (22). На графике видно, что модель CNN + LSTM/GRU требует наименьшего объема памяти (180 МБ) при обработке входных данных объемом 1 млн примеров с 10 признаками, что делает ее более эффективной для использования

на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами по сравнению с другими моделями, такими как Random Forest и SVM.

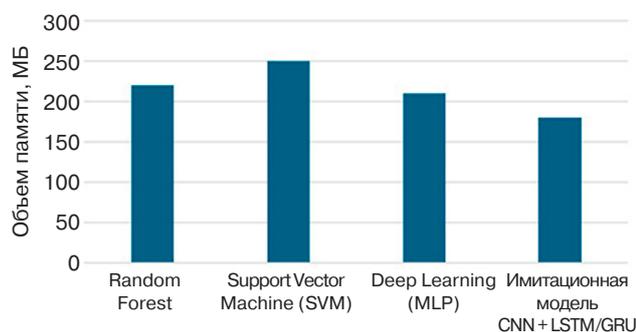


Рис. 3. Сравнение результатов работы разработанной имитационной модели CNN + LSTM/GRU и аналогов по метрике E_6 (22)

Проведенный эксперимент позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработанная имитационная модель достигает высокой точности обнаружения атак на уровне 99.1%, что свидетельствует о ее способности эффективно идентифицировать как известные, так и новые типы атак в реальном времени. Это подтверждает тот факт, что предложенная архитектура, основанная на гибридной модели CNN + LSTM/GRU, является успешной в контексте анализа сетевого трафика.
2. F1-мера разработанной имитационной модели равна 99.1%, что указывает на высокую сбалансированность между точностью истинно-положительных предсказаний (19) и полнотой обучения (18). Это означает, что модель не только точно идентифицирует атаки, но и минимизирует количество ложных срабатываний и пропусков.
3. Время обработки запросов в предложенной имитационной модели при аппаратных ресурсах, указанных в п. 3.1 настоящей статьи, снижено до 12 мс, что делает модель особенно подходящей для систем, требующих быстрой реакции, таких как мониторинг в реальном времени. Это является значительным преимуществом по сравнению с другими моделями, которые требуют больше времени для обработки.
4. Разработанная имитационная модель использует всего 180 МБ памяти, что делает ее подходящей для внедрения на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. Это особенно важно для IoT-устройств, которые часто имеют ограничения по памяти и вычислительной мощности.
5. Использование техники обрезки нейронов позволило значительно сократить количество параметров модели с 1.5 млн до 300 тысяч, что, в свою очередь, снизило вычислительные затраты на 80% и улучшило производительность. Это

подтверждает, что подходы к оптимизации модели имеют решающее значение для ее успешного применения в условиях ограниченных ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена имитационная модель масштабируемого метода выявления многовекторных атак на устройства IoT, которая учитывает ограничения вычислительных и информационных ресурсов. Учитывая растущие угрозы безопасности в IoT-сетях, создание эффективного решения, способного обнаруживать атаки с высокой точностью, стало одной из ключевых задач исследования.

Предложенная модель основана на гибридной архитектуре нейронных сетей, которая сочетает сверточные нейронные сети CNN для анализа пространственных зависимостей и сети долгой краткосрочной памяти LSTM для анализа временных зависимостей сетевого трафика. Важным аспектом является применение техники обрезки нейронов, что позволяет значительно сократить количество параметров модели и снизить вычислительные затраты. Кроме того, использование блокчейн-технологий с механизмом консенсуса PoV обеспечивает безопасность данных и децентрализованную верификацию, что критически важно для защиты IoT-сетей от многовекторных атак.

Экспериментальная оценка, проведенная на датасете CIC IoT Dataset 2023, продемонстрировала высокую эффективность предложенной модели. Модель достигла точности обнаружения атак на уровне 99.1%, что подтверждает ее способность точно идентифицировать как известные, так и новые типы атак в реальном времени. F1-мера, равная 99.1%, указывает на сбалансированность между точностью и полнотой, что является критически важным для систем кибербезопасности, где необходимо минимизировать как ложные срабатывания, так и пропуски атак. В дополнение к высокой точности, время обработки запросов было снижено до 12 мс, что позволяет модели эффективно функционировать в условиях, требующих быстрой реакции, таких как системы мониторинга в реальном времени. Оптимизация использования памяти также была достигнута, и модель продемонстрировала потребление всего 180 МБ, что делает ее подходящей для внедрения на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Таким образом, разработанная имитационная модель превосходит существующие решения по ключевым метрикам, таким как точность, время обработки и использование памяти. Применение гибридной архитектуры, техники обрезки нейронов и децентрализованной верификации обеспечивает высокую эффективность модели в условиях многовекторных угроз IoT.

Данная работа открывает новые горизонты для дальнейших исследований в области кибербезопасности, предлагая эффективные решения для защиты IoT-сетей от сложных киберугроз. В будущем целесообразно продолжить исследование в направлении интеграции дополнительных методов машинного обучения и глубокого обучения для повышения точности и устойчивости модели к новым типам атак. Также стоит рассмотреть возможности оптимизации алгоритмов для уменьшения вычислительных затрат и повышения скорости обработки данных. Важно продолжать изучение вопросов масштабируемости и устойчивости блокчейн-ориентированных решений в условиях увеличения числа устройств и объемов трафика.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование выполнено при поддержке гранта ИБ МТУСИ по теме «Разработка метода обнаружения вторжений с использованием сценариев многовекторных атак в децентрализованной IoT среде», соглашение № 40469/17-23-К.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Information Security grant from the Moscow Technical University

of Communications and Informatics (MTUSI) (agreement No. 40469/17-23-K, “Development of an intrusion detection method using multi-vector attack scenarios in a decentralized IoT environment.”)

Вклад авторов

В.И. Петренко – идея исследования, планирование исследования и научное редактирование статьи.

Ф.Б. Тебуева – идея исследования, планирование исследования, научное редактирование статьи.

М.Г. Огур – проведение исследования, написание текста статьи, выполнение экспериментальной части работы, анализ полученных данных и формулирование результатов.

Г.И. Линец – консультации по проведению исследования и научному редактированию статьи.

В.П. Мочалов – консультации по проведению исследования и научному редактированию статьи.

Authors' contributions

V.I. Petrenko – research idea, planning the study, and scientific editing the article.

F.B. Tebueva – research idea, planning the study, and scientific editing the article.

M.G. Ogur – conducting the research, performing the experimental part of the work, analysis of the obtained data, formulating the results, and writing the text of the article.

G.I. Linets – consultations on conducting the research and scientific editing the article.

V.P. Mochalov – consultations on conducting the research and scientific editing the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Sen Ö., Ivanov B., Henze M., Ulbig A. Investigation of Multi-stage Attacks and Defense Modeling for Data Synthesis. In: *Proceedings of the International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. IEEE; 2023. P. 1–12. <https://doi.org/10.1109/SEST57387.2023.10257329>
2. Lysenko S., Bobrovnikova K., Kharchenko V., Savenko O. IoT Multi-Vector Cyberattack Detection Based on Machine Learning Algorithms: Traffic Features Analysis, Experiments, and Efficiency. *Algorithms*. 2022;15(7):239. <https://doi.org/10.3390/a15070239>
3. Aguru A., Erukala S. OTI-IoT: A Blockchain-based Operational Threat Intelligence Framework for Multi-vector DDoS Attacks. *ACM Trans. Internet Technol.* 2024;24(3):15.1–15.31. <https://doi.org/10.1145/3664287>
4. Ipole-Adelaiye N., Tatama F.B., Egena O., Jenom M., Ibrahim L. Detecting Multi-Vector Attack Threats Using Multilayer Perceptron Network. *IRE Journals*. 2024;8(1):119–123.
5. Pakmehr A., Abmuth A., Taheri N., Ghaffari A. DDoS attack detection techniques in IoT networks: a survey. *Cluster Comput.* 2024;27(4):14637–14668. <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04662-6>
6. Alhakami W. Evaluating modern intrusion detection methods in the face of Gen V multi-vector attacks with fuzzy AHP-TOPSIS. *PLoS One*. 2024;19(5):e0302559. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302559>
7. Saiyed M.F., Al-Anbagi I. Deep Ensemble Learning With Pruning for DDoS Attack Detection in IoT Networks. *IEEE Trans. Machine Learning Commun. Networks*. 2024;2:596–616. <https://doi.org/10.1109/TMLCN.2024.3395419>
8. Liebl S. *Threat Modelling for Internet of Things Devices*. Research Report 2023 of the Technical University OTH Amberg-Weiden. 2023. URL: <https://www.researchgate.net/publication/369488078>. Дата обращения 25.02.2025. / Accessed February 25, 2025.
9. Aguru A.D., Erukala S.B. A lightweight multi-vector DDoS detection framework for IoT-enabled mobile health informatics systems using deep learning. *Inf. Sci.* 2024;662:120209. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.120209>
10. Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Огур М.Г., Линец Г.И., Мочалов В.П. Методика обнаружения и противодействия многовекторным угрозам нарушения информационной безопасности, децентрализованной IoT системы. *Int. J. Open Inf. Technol.* 2025;13(1):14–24. [Petrenko V.I., Tebueva F.B., Ogur M.G., Linets G.I., Mochalov V.P. Methodology for detecting and countering multi-vector threats to information security of a decentralized IoT system. *Int. J. Open Inf. Technol.* 2025;13(1):13–24 (in Russ.).]

11. Leng S., Guo Y., Zhang L., Hao F., Cao X., Li F., Kou W. Online and Collaboratively Mitigating Multi-Vector DDoS Attacks for Cloud-Edge Computing. In: *ICC 2024 – International Conference on Communications*. 2024. P. 1394–1399. <https://doi.org/10.1109/ICC51166.2024.10623052>
12. Ali M., Saleem Y., Hina S., Shah G.A. DDoSViT: IoT DDoS attack detection for fortifying firmware Over-The-Air (OTA) updates using vision transformer. *Internet of Things*. 2025;30:101527. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101527>
13. Dalal S., Lilhore U.K., Faujdar N., Simaiya S., et al. Next-generation cyberattack prediction for IoT systems: leveraging multi-class SVM and optimized CHAID decision tree. *J. Cloud Comput.* 2023;12:137. <https://doi.org/10.1186/s13677-023-00517-4>
14. Zahid F., Funchal G., Melo V., Kuo M.M.Y., et al. DDoS attacks on smart manufacturing systems: A cross-domain taxonomy and attack vectors. In: *2022 20th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 2022. P. 214–219. <https://doi.org/10.1109/INDIN51773.2022.9976172>
15. Lungu N., Dash B.B., De U.C., Dash B.B., et al. Multi-vector Monitoring, Detecting and Classifying GPU Side-Channel Attack Vectors on a Secure GPU Execution Framework. In: *2024 8th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)*. 2024. P. 500–505. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC61858.2024.10714895>

Об авторах

Петренко Вячеслав Иванович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой организации и технологии защиты информации, факультет математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1). E-mail: vipetrenko@ncfu.ru. Scopus Author ID 57189512011, ResearcherID A-3196-2017, SPIN-код РИНЦ 3923-4295, <https://orcid.org/0000-0003-4293-7013>

Тебueva Фариза Биляловна, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры вычислительной математики и кибернетики, факультет математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1). E-mail: ftebueva@ncfu.ru. Scopus Author ID 57189512319, ResearcherID H-4548-2017, SPIN-код РИНЦ 9343-7504, <https://orcid.org/0000-0002-7373-4692>

Огур Максим Геннадьевич, старший преподаватель, кафедра вычислительной математики и кибернетики, факультет математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1). E-mail: ogur26@gmail.com. ResearcherID B-1332-2017, SPIN-код РИНЦ 7180-6971, <https://orcid.org/0000-0002-2387-0901>

Линец Геннадий Иванович, д.т.н., профессор, профессор департамента цифровых, робототехнических систем и электроники, институт перспективной инженерии, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1). E-mail: kbytw@mail.ru. Scopus Author ID 6506372022, SPIN-код РИНЦ 1452-6823, <https://orcid.org/0000-0002-2279-3887>

Мочалов Валерий Петрович, д.т.н., профессор, профессор департамента цифровых, робототехнических систем и электроники, институт перспективной инженерии, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1). E-mail: mochalov.valery2015@yandex.ru. Scopus Author ID 57202300745, SPIN-код РИНЦ 8695-1648, <https://orcid.org/0000-0002-5131-5649>

About the Authors

Vyacheslav I. Petrenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Organization and Technology of Information Security, Prof. Nikolay Chervyakov Faculty of Mathematics and Computer Sciences, North-Caucasus Federal University (1, Pushkina ul., Stavropol, 355017 Russia). E-mail: vipetrenko@ncfu.ru. Scopus Author ID 57189512011, ResearcherID A-3196-2017, RSCI SPIN-code 3923-4295, <https://orcid.org/0000-0003-4293-7013>

Fariza B. Tebueva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor, Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Prof. Nikolay Chervyakov Faculty of Mathematics and Computer Sciences, North-Caucasus Federal University (1, Pushkina ul., Stavropol, 355017 Russia). E-mail: ftebueva@ncfu.ru. Scopus Author ID 57189512319, ResearcherID H-4548-2017, RSCI SPIN-code 9343-7504, <https://orcid.org/0000-0002-7373-4692>

Maxim G. Ogur, Senior Lecturer, Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Prof. Nikolay Chervyakov Faculty of Mathematics and Computer Sciences, North-Caucasus Federal University (1, Pushkina ul., Stavropol, 355017 Russia). E-mail: ogur26@gmail.com. ResearcherID B-1332-2017, RSCI SPIN-code 7180-6971, <https://orcid.org/0000-0002-2387-0901>

Gennady I. Linets, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, Institute of Advanced Engineering, North-Caucasus Federal University (1, Pushkina ul., Stavropol, 355017 Russia). E-mail: kbytw@mail.ru. Scopus Author ID 6506372022, RSCI SPIN-code 1452-6823, <https://orcid.org/0000-0002-2279-3887>

Valery P. Mochalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, Institute of Advanced Engineering, North-Caucasus Federal University (1, Pushkina ul., Stavropol, 355017 Russia). E-mail: mochalov.valery2015@yandex.ru. Scopus Author ID 57202300745, RSCI SPIN-code 8695-1648, <https://orcid.org/0000-0002-5131-5649>

УДК 519.95:621.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-41-50>

EDN KVUAJF



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ процессов передачи информации в многомодовых оптоволоконных сетях с маркерным методом доступа

Д.В. Жматов[@], А.С. Леонтьев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: zmatov@mirea.ru

• Поступила: 10.02.2025 • Доработана: 17.03.2025 • Принята к опубликованию: 22.07.2025

Резюме

Цели. Целью работы являются разработка и анализ математической модели передачи информации в многомодовых оптоволоконных кольцевых сетях с маркерным методом доступа для обеспечения эффективного взаимодействия устройств интернета вещей (Internet of Things, IoT). Работа направлена на оценку вероятностно-временных характеристик, надежности и производительности сетевой инфраструктуры, а также оптимизацию параметров передачи данных с учетом специфики IoT и особенностей оптоволоконной среды.

Методы. В ходе исследования применены методы теории надежности для оценки устойчивости сети к отказам и увеличения ее эксплуатационной эффективности, методы теории случайных процессов для моделирования динамики передачи данных в условиях изменяющейся нагрузки, а также методы теории массового обслуживания для анализа распределения трафика и управления очередями пакетов. Дополнительно использовано преобразование Лапласа – Стильтьеса, позволяющее вывести функциональные уравнения, описывающие вероятностно-временные характеристики передачи данных и обеспечивающие точное математическое моделирование сетевых процессов.

Результаты. Исследованы процессы передачи информации в многомодовых оптоволоконных сетях с маркерным доступом в контексте IoT-систем. Проведен анализ временных характеристик передачи пакетов различных классов, включая критически важные данные IoT-устройств.

Выводы. Результаты исследования подтверждают, что многомодовая оптоволоконная среда является эффективной основой для IoT-инфраструктуры, обеспечивая высокую пропускную способность и устойчивость к отказам. Включение характеристик надежности в модель позволило учесть влияние отказов оптоволоконной среды и узлов сети на производительность. Оптимизация параметров маркерного метода доступа, включая временные интервалы и политику передачи маркеров, существенно повышает общую производительность сети, снижая вероятность коллизий, и увеличивает пропускную способность. Разработанная математическая модель предоставляет эффективный инструмент для анализа и проектирования локальных сетей на основе многомодовых оптоволоконных технологий. Это особенно важно для сетей, обслуживающих критически важные инфраструктуры.

Ключевые слова: FDDI-сети, маркерный метод доступа, модели, временные характеристики, отказы, производительность

Для цитирования: Жматов Д.В., Леонтьев А.С. Анализ процессов передачи информации в многомодовых оптоволоконных сетях с маркерным методом доступа. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-41-50>, <https://www.elibrary.ru/KVUAJF>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analysis of information transmission processes in multimode fiber-optic networks with a token-based access method

Dmitry V. Zhmatov[®], Alexander S. Leontyev

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: zhmatov@mirea.ru

• Submitted: 10.02.2025 • Revised: 17.03.2025 • Accepted: 22.07.2025

Abstract

Objectives. The study sets out to develop and analyze a mathematical model for information transmission in multimode fiber-optic ring networks using a token-based access method to ensure efficient interaction between Internet of Things (IoT) devices. The work aims to evaluate the probabilistic and time-related characteristics, as well as the reliability and performance of the network infrastructure to optimize data transmission parameters, taking into account the specifics of IoT and the peculiarities of the fiber-optic medium.

Methods. Reliability theory methods are used to assess the network's resilience to failures and increase its operational efficiency, along with techniques from the theory of stochastic processes to model the dynamics of data transmission under varying loads and approaches from queueing theory to analyze traffic distribution and packet queue management. The Laplace–Stieltjes transform is applied to derive functional equations that describe the probabilistic and time-related data transmission characteristics, enabling precise mathematical modeling of network processes.

Results. The information transmission processes occurring in multimode fiber-optic networks with token access in the context of IoT systems were studied. The temporal characteristics of packet transmission for different classes, including critical IoT device data, were analyzed.

Conclusions. The results confirm that multimode fiber-optic media provide an efficient foundation for IoT infrastructure that offers both high throughput and fault tolerance. By incorporating reliability characteristics into the model, it was possible to account for the impact of fiber-optic medium and network node failures on performance. Optimizing the parameters of the token-based access method, including time intervals and token transmission policies, significantly improves overall network performance by reducing collision probability and increasing throughput. The developed mathematical model provides an effective tool for analyzing and designing local networks based on multimode fiber-optic technologies. This fact is especially important for networks serving critical infrastructure.

Keywords: FDDI networks, token-based access method, models, temporal characteristics, failures, performance

Forcitation: Zhmatov D.V., Leontyev A.S. Analysis of information transmission processes in multimode fiber-optic networks with a token-based access method. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-41-50>, <https://www.elibrary.ru/KVUAJF>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Многомодовые методы доступа относятся к технике передачи данных в оптоволоконных системах, которые широко применяются для увеличения пропускной способности и эффективности передачи информации. Основная идея заключается в том, что световые сигналы передаются одновременно через несколько независимых мод – различных траекторий распространения света внутри волоконного сердечника. Это позволяет организовать параллельную передачу данных, при этом каждая мода выступает в роли независимого канала связи.

Многомодовые методы доступа, особенно в системах с высокой пропускной способностью, позволяют эффективно масштабировать объемы передаваемых данных. При увеличении числа мод или пропускной способности каждой моды такие системы находят применение в высокоскоростных оптических сетях, включая магистральные каналы связи и локальные сети.

Характеристики систем обработки и передачи данных в сетевых структурах во многом определяются надежностью передающей среды, включая возможные отказы и сбои [1–3]. Однако во многих исследованиях временные параметры передачи рассматриваются изолированно, без учета факторов надежности, тогда как анализ отказоустойчивости зачастую не включает в себя влияние технологий обработки и передачи информации. Поэтому при исследовании многомодовых оптоволоконных передающих систем для оценки временных характеристик используются разработанные авторами математические методы, учитывающие отказы передающей среды. В [1, 2] авторами разработаны математические методы для анализа вероятностно-временных характеристик передачи данных в сетях с маркерным методом доступа, учитывающие влияние отказов, а также методы оценки загрузки ресурсов и производительности таких сетевых структур. Благодаря своей универсальности и потенциалу, многомодовые методы доступа становятся важным инструментом для построения высокоскоростных оптических сетей, включая магистральные каналы связи, дата-центры и локальные вычислительные сети [4–6]. Эти технологии обеспечивают гибкость масштабирования путем увеличения числа мод, улучшения качества передачи и повышения пропускной способности каждой модуляционной траектории.

1. СТРУКТУРА МНОГОМОДОВОГО ВОЛОКНА

В многомодовом оптоволоконном кабеле диаметр сердечника больше по сравнению с одномодовыми волокнами. Это позволяет свету распространяться через разные моды. Каждая мода представляет собой определенную траекторию распространения света внутри волокна, определяемую законами физики (углом ввода света, свойствами сердечника и оболочки).

При многомодовом методе данные распределяются между доступными модами. Каждая мода действует как отдельный канал связи, обеспечивая независимую передачу данных [7, 8]. Такие методы передачи используют особенности разделения каналов, включая:

- WDM (Wavelength-Division Multiplexing) – мультиплексирование с разделением по длине волны, когда каждой моде выделяется определенная длина волны;
- TDM (Time Division Multiplexing) – мультиплексирование с временным разделением, когда каждая мода передает данные в отведенный временной интервал;
- увеличение пропускной способности без значительного увеличения стоимости оборудования;
- возможность масштабирования системы за счет увеличения числа мод;
- параллельная обработка данных, что особенно важно для высоконагруженных сетей [9–11].

Разные моды проходят через волокно с разной скоростью, что может привести к временному размытию сигнала. Многомодовые волокна обычно используются на коротких расстояниях (например, в локальных сетях) из-за высокой потери сигнала и дисперсии.

Усложнение обработки сигнала заключается в необходимости применения специализированного оборудования, предназначенного для разделения мод, устранения взаимных помех между ними и обеспечения стабильности передачи данных, что требует дополнительной настройки и калибровки системы для достижения оптимального качества сигнала.

В промышленном интернете многомодовые оптоволоконные системы обеспечивают высокоскоростной обмен данными в условиях большого количества подключенных устройств¹ [12–17].

¹ Kleinrock L. To Mario Gerla, the Maestro of Networks. *Ad Hoc Networks*. 2019;88:178–179. <https://www.lk.cs.ucla.edu/data/files/Mario%20Gerla%20tribute%20by%20Len.pdf>. Дата обращения 24.06.2025. / Accessed June 24, 2025.

Многомодовые системы легко интегрируются с различными протоколами передачи данных, включая Ethernet, Fiber Channel². Увеличение числа мод или модернизация системы позволяет без значительных затрат повысить производительность сети.

2. ОГРАНИЧЕНИЯ МНОГОМОДОВОГО МЕТОДА

Передача данных в сети осуществляется с учетом требований к длине пакетов, интенсивности потока данных от каждого узла, а также временных ограничений, задаваемых заказчиком.

Для исследования процесса передачи данных в сети использовался маркерный метод доступа. При этом моделировались различные параметры сети. Варьировались число узлов $N_{уз}$; интенсивность поступления пакетов в узлы сети для каждой моды λ_k , $k = \overline{1, N}$; пропускная способность передающей среды C ; интенсивность отказов передающей среды $\lambda_{от}$; длина передаваемого пакета $L_{пак}$; ограничение на время передачи пакетов каждой моды в сети $T_{дир}^{(1)}$ (директивное время). Определялись следующие параметры для каждой моды: цикл опроса узлов $Z^{(1)}$; загрузки узлов ρ_k , $k = \overline{1, N}$ и передающей среды $R_{сред}$; время доставки пакетов $T_k^{(1)}$; вероятность своевременной доставки пакетов с учетом надежности передающей среды Q_k , $k = \overline{1, N}$; производительность сети $\lambda_{сум}$

В качестве оценки производительности сети выбирается суммарная интенсивность своевременно обслуженного потока для каждой моды:

$$\lambda_{сум} = \sum_{k=1}^N \lambda_k Q_k.$$

Пусть заданы пропускная способность C , архитектура сети с $N_{уз}$ узлами, N потоков пакетов для каждой моды с интенсивностями λ_k , $k = \overline{1, N}$, и ограничения по времени передачи данных.

Потоки пакетов λ_k для каждой моды и отказы передающей среды $\lambda_{от}$ имеют пуассоновскую природу, а буферные устройства узлов обладают неограниченной емкостью. Количество узлов сети и количество потоков пакетов для каждой моды одинаково.

² Fiber Channel (волоконный канал) – семейство протоколов для высокоскоростной передачи данных. Стандартизацией протоколов занимается Технический комитет T11, входящий в состав Международного комитета по стандартам информационных технологий. [Fiber Channel is a family of protocols for high-speed data transmission. The protocols are standardized by the T11 Technical Committee, part of the International Committee for Information Technology Standards.]

3. ТЕОРЕМА ОБ ОЦЕНКЕ ЦИКЛА ОПРОСА В МАРКЕРНЫХ СЕТЯХ

Цикл опроса узлов сети для каждой моды прямо пропорционален количеству узлов, длине маркера и обратно пропорционален пропускной способности передающей среды и вероятности того, что среда свободна от передачи пакетов данной моды.

При выполнении данных условий теоремы цикл опроса узлов в режиме надежного функционирования описывается следующим соотношением:

$$Z^{(1)} = \frac{N_{уз} \frac{L_M}{C}}{1 - \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{L_{пак}}{C}}, \quad (1)$$

где L_M – длина маркера, а с учетом отказов передающей среды – формулой:

$$Z_{от}^{(1)} = \frac{Z^{(1)}}{1 - \lambda_{от} F_{от}^{(1)}}, \quad (2)$$

где $F_{от}^{(1)}$ – среднее время восстановления работоспособности среды после отказа.

Доказательство. Пусть $T_{пак} = \frac{L_{пак}}{C}$ – время передачи пакета от одного узла к другому. Очевидно, что цикл опроса узлов сети (средний интервал между двумя последовательными опросами узла) равен:

$$Z^{(1)} = \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \left(\frac{L_{пак}}{C} + \frac{L_M}{C} \right) + (1 - \rho_k) \frac{L_M}{C} \right\} = \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \frac{L_{пак}}{C} + \frac{L_M}{C} \right\}. \quad (3)$$

В стационарном режиме $\lambda_k Z^{(1)} = \rho_k$. Умножая соотношение (3) на λ_n , $n = \overline{1, N}$, получим систему N линейных неоднородных уравнений относительно ρ_n :

$$\lambda_n \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \left(\frac{L_{пак}}{C} \right) + \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_n. \quad (4)$$

Выберем любые два уравнения для ρ_i и ρ_j :

$$\lambda_i \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \frac{L_{пак}}{C} + \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_i, \quad (5)$$

$$\lambda_j \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_k \frac{L_{пак}}{C} + \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_j. \quad (6)$$

Умножим уравнение (5) на λ_j , а уравнение (6) на λ_i и вычтем одно уравнение из другого, получим $\rho_i \lambda_j = \rho_j \lambda_i$, следовательно: $\rho_i = \rho_j \frac{\lambda_i}{\lambda_j}$.

Аналогичным образом можно выразить все ρ_k , $k = \overline{1, N}$ через ρ_1 : $\rho_k = \rho_1 \frac{\lambda_k}{\lambda_1}$. Подставляя данные соотношения в первое уравнение системы уравнений (4), получим:

$$\lambda_1 \sum_{k=1}^N \left\{ \rho_1 \frac{\lambda_k}{\lambda_1} \frac{L_{\text{пак}}}{C} + \frac{L_M}{C} \right\} = \rho_1, \quad (7)$$

$$\rho_1 \sum_{k=1}^N \left\{ \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C} \right\} + \frac{NL_M}{C} \lambda_1 = \rho_1,$$

$$\rho_1 = \frac{N_{\text{уз}} L_M}{C \left(1 - \sum_{k=1}^N \left\{ \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C} \right\} \right)} \lambda_1, \quad (8)$$

$$Z^{(1)} = \frac{\rho_1}{\lambda_1} = \frac{N_{\text{уз}} L_M}{C \left(1 - \sum_{k=1}^N \left\{ \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C} \right\} \right)}. \quad (9)$$

Загрузка передающей среды равна:

$$R_{\text{сред}} = \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C}.$$

В стационарном режиме нагрузка среды равна вероятности того, что в среде передаются пакеты.

Соответственно, величина $1 - \sum_{k=1}^N \lambda_k \frac{L_{\text{пак}}}{C}$ – вероятность того, что среда свободна от передачи пакетов.

Как видно, формула (9) полностью совпадает с формулой (1), что и доказывает первую часть теоремы о цикле опроса маркерных сетей.

Функциональные уравнения для определения цикла локальных вычислительных систем с маркерным методом доступа с учетом возникающих отказов имеют вид [1]:

$$\begin{cases} Z_{\text{от}}^*(s) = Z^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)), \\ \Gamma_{\text{от}}^*(s) = F_{\text{от}}^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)), \\ \left\{ \begin{aligned} Z_{\text{от}}^*(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} dZ_{\text{от}}(t), \\ \Gamma_{\text{от}}^*(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} d\Gamma_{\text{от}}(t), \end{aligned} \right. \quad (10) \\ \left\{ \begin{aligned} Z^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)) &= \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t} dZ(t), \\ F_{\text{от}}^*(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s)) &= \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t} dF(t), \end{aligned} \right.$$

где $Z_{\text{от}}(t)$ – функция распределения (ФР) цикла локальной вычислительной сети с учетом отказов, $Z(t)$ – ФР цикла локальной вычислительной сети в условиях надежного функционирования, $F_{\text{от}}(t)$ – ФР времени восстановления передающей среды после отказов, $\Gamma_{\text{от}}(t)$ – ФР периода занятости передающей среды после отказов, s – комплексный параметр преобразования Лапласа.

Продифференцируем первое функциональное уравнение (10) по s :

$$\begin{aligned} (Z_{\text{от}}^*(s))' &= \left(\int_0^{\infty} e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t} dZ(t) \right)' = \\ &= - \int_0^{\infty} t e^{-(\lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t} \left(1 - \lambda_{\text{от}} (\Gamma_{\text{от}}^*(s))' \right) dZ(t), \\ \text{при } s \rightarrow 0 \quad (Z_{\text{от}}^*(s))' |_{s=0} &= -Z_{\text{от}}^{(1)}, \\ \lambda_{\text{от}} + s - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s) |_{s=0} &= 0, \quad (\Gamma_{\text{от}}^*(s))' |_{s=0} = -\Gamma_{\text{от}}^{(1)}, \\ - \int_0^{\infty} t e^{\{-(s + \lambda_{\text{от}} - \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^*(s))t\}} (1 - \lambda_{\text{от}} (\Gamma_{\text{от}}^*(s))') dZ(t) |_{s=0} &= \\ &= -Z^{(1)} (1 + \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^{(1)}). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$Z_{\text{от}}^{(1)} = Z^{(1)} (1 + \lambda_{\text{от}} \Gamma_{\text{от}}^{(1)}). \quad (11)$$

Продифференцировав по s второе функциональное уравнение (10) и найдя предел при $s \rightarrow 0$, получим следующее соотношение для определения среднего значения периода занятости передающей среды после отказа:

$$\Gamma_{\text{от}}^{(1)} = \frac{F_{\text{от}}^{(1)}}{1 - \lambda_{\text{от}} F_{\text{от}}^{(1)}}. \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в соотношение (11), получим:

$$Z_{\text{от}}^{(1)} = \frac{Z^{(1)}}{1 - \lambda_{\text{от}} F_{\text{от}}^{(1)}}. \quad (13)$$

Формула (13) полностью совпадает с формулой (2), что и доказывает вторую часть теоремы о цикле опроса маркерных сетей с учетом отказов.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ЦИКЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАКЕТОВ ОТ КОЛИЧЕСТВА УЗЛОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПАКЕТОВ

В настоящей работе исследуются процессы передачи информации в многомодовых оптоволоконных передающих средах с помощью разработанных

ранее авторами математических методов расчета сетевых структур с маркерным методом доступа [1]. При расчетах анализировалась четырехмодовая оптоволоконная передающая среда с пропускной способностью 280 Мбит/с для каждой моды. Длина оптоволоконного канала может достигать также, как и в FDDI (Fiber Distributed Data Interface, сети с маркерным методом доступа) сетей, 100 км.

- Длина пакетов, передаваемых с помощью первой моды $L_{\text{пак } 1} = 1024$ бит, ограничение на время передачи пакетов $T_{\text{дир } 1} = 0.00025$ с, интенсивность пакетов, поступающих в сеть от каждого узла $\lambda_{1i} = 2000$ пак/с.
- Длина пакетов, передаваемых с помощью второй моды $L_{\text{пак } 2} = 2048$ бит, ограничение на время передачи пакетов $T_{\text{дир } 2} = 0.0005$ с, интенсивность пакетов, поступающих в сеть от каждого узла $\lambda_{2i} = 1100$ пак/с.
- Длина пакетов, передаваемых с помощью третьей моды $L_{\text{пак } 3} = 4096$ бит, ограничение на время передачи пакетов $T_{\text{дир } 3} = 0.00075$ с, интенсивность пакетов, поступающих в сеть от каждого узла $\lambda_{3i} = 590$ пак/с.
- Длина пакетов, передаваемых с помощью четвертой моды $L_{\text{пак } 4} = 8192$ бит, ограничение на время передачи пакетов $T_{\text{дир } 4} = 0.001$ с, интенсивность пакетов, поступающих в сеть от каждого узла $\lambda_{4i} = 300$ пак/с.

Для управления процессом передачи пакетов различных классов с помощью четырехмодового оптоволоконного кольца использовался маркерный метод доступа. Длина маркера $L_M = 96$ бит, пропускная способность каждой моды 280 Мбит/с. При расчетах предполагалось, что время наработки на отказ передающей среды может принимать значение 10^4 с, 10^5 с, 10^6 с, 10^7 с и ∞ , время восстановления после отказа составляет $T_{\text{вос}} = 60$ с.

При расчетах исследовалась зависимость цикла обслуживания пакетов, загрузки узлов и передающей среды, времени обслуживания пакетов, вероятности своевременного обслуживания пакетов, передаваемых с помощью различных мод, а также производительности многомодовой оптоволоконной сети от количества узлов, подсоединенных

к передающей среде. Соответствующие графики представлены на рис. 1–6.

Зависимость времени обслуживания пакетов в многомодовой кольцевой сети в критической области функционирования (при $N_{\text{уз}} = 110$) от интенсивности отказов представлена в таблице.

Как видно из графиков (рис. 1–6), с увеличением количества узлов (при масштабировании сети) в многомодовой оптоволоконной сети с маркерным методом доступа увеличивается загрузка передающей среды и узлов сети, цикл опроса узлов и время передачи пакетов, передаваемых различными модами, а производительность сети достигает максимального значения и начинает резко падать.

С увеличением интенсивности отказов в критической области функционирования при больших нагрузках передающей среды и узлов резко изменяются все характеристики сети, в частности, время обслуживания пакетов.

Отметим, что максимальная производительность для всех 4 типов передаваемых пакетов достигается при количестве узлов $N_{\text{уз}} = 100$. Количество своевременно переданной информации $V_{\text{пак}}$ максимально при длине пакета $L_{\text{пак}} = 8192$:

$$V_{\text{пак}} = \lambda_{\text{сум}} L_{\text{пак}}$$

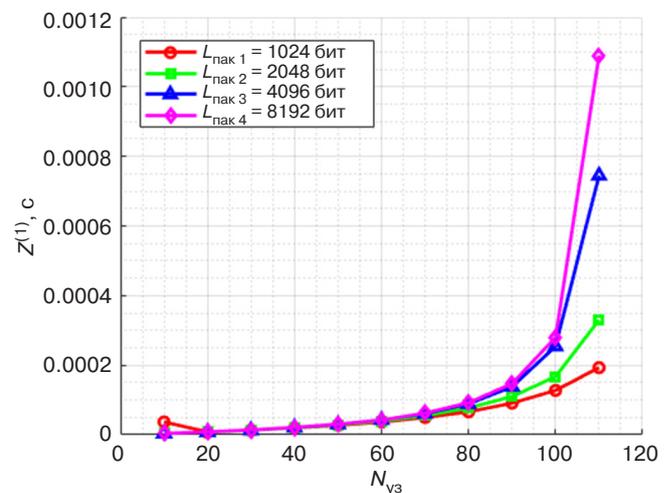


Рис. 1. Зависимость цикла обслуживания $Z^{(1)}$ от количества узлов сети $N_{\text{уз}}$

Таблица. Зависимость времени обслуживания пакетов в многомодовой кольцевой сети от интенсивности отказов

$\lambda_{\text{от}}$	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	Без отказа
$T(L_{\text{пак}} = 1024 \text{ бит}), \text{ с}$	0.003408	0.0004444	0.0001485	0.0001189	0.0001156
$T(L_{\text{пак}} = 2048 \text{ бит}), \text{ с}$	0.003765	0.000552	0.0002312	0.0001991	0.0001955
$T(L_{\text{пак}} = 4096 \text{ бит}), \text{ с}$	0.004485	0.0008598	0.0004978	0.0004617	0.0004576
$T(L_{\text{пак}} = 8192 \text{ бит}), \text{ с}$	0.004669	0.001029	0.0006856	0.0006513	0.0006475

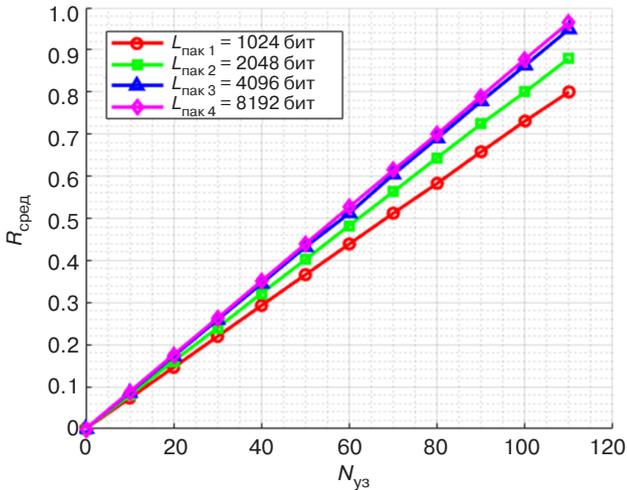


Рис. 2. Зависимость загрузки передающей среды $R_{\text{сред}}$ для каждой моды от количества узлов $N_{\text{уз}}$

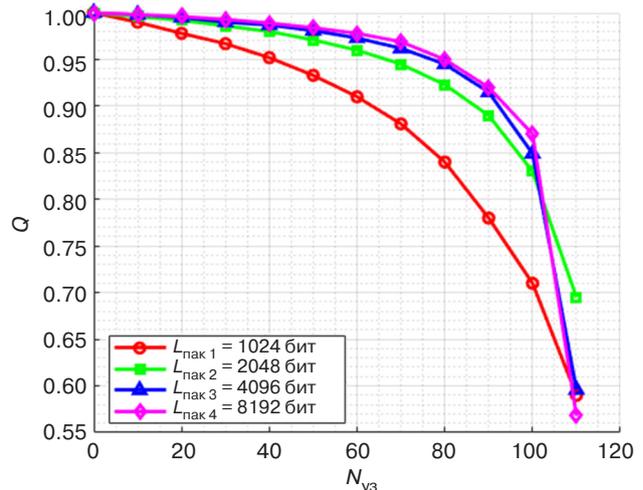


Рис. 5. Зависимость вероятности своевременной передачи пакетов Q в многомодовой кольцевой сети от количества узлов $N_{\text{уз}}$

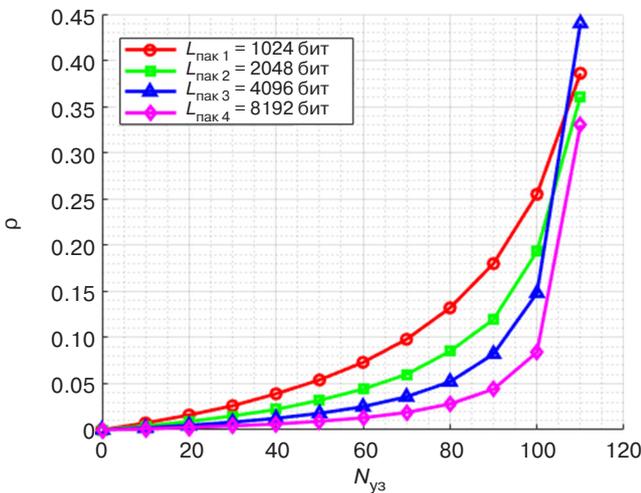


Рис. 3. Зависимость загрузки узлов для каждой моды ρ от общего количества узлов $N_{\text{уз}}$

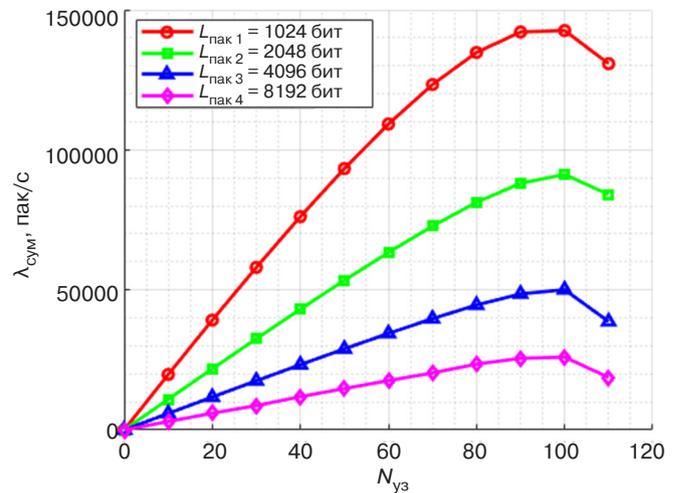


Рис. 6. Зависимость производительности $\lambda_{\text{сум}}$ для каждой моды от количества узлов сети $N_{\text{уз}}$

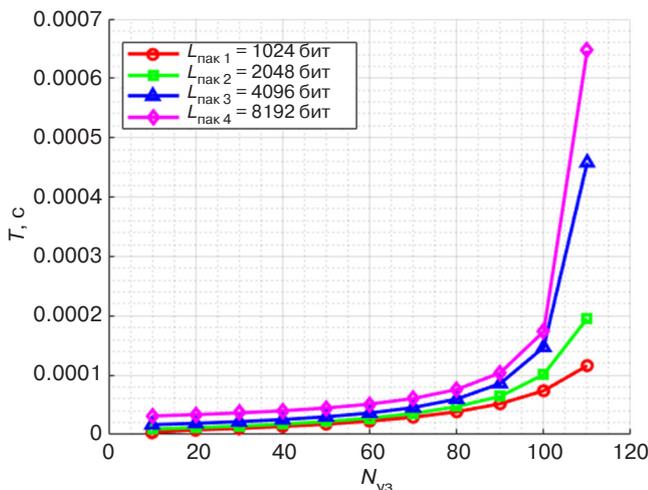


Рис. 4. Зависимость среднего времени обслуживания пакетов 4 типов T в многомодовой оптоволоконной сети с маркерным методом доступа от количества узлов $N_{\text{уз}}$

При высокой интенсивности отказов 10^{-4} время обслуживания пакетов наиболее велико и увеличивается с ростом размера пакета. Для пакета размером 1024 бит среднее время обслуживания составляет 0.003408 с, а для пакета 8192 бит – уже 0.004669 с.

При уменьшении интенсивности отказов до 10^{-5} время обслуживания пакетов значительно сокращается. Для пакета 1024 бит оно уменьшается почти в 8 раз (до 0.0004444 с), а для пакета 8192 бит – более чем в 4 раза (до 0.001029 с).

При интенсивностях отказов 10^{-6} и 10^{-7} время обработки продолжает сокращаться, но не так резко, как при переходе от 10^{-4} к 10^{-5} . Например, для пакета 1024 бит время падает с 0.0001485 с до 0.0001189 с. Это уже менее выраженное уменьшение.

В случае отсутствия отказов время обслуживания оказывается стабильным и значительно ниже, чем при наличии отказов. Например, для всех

пакетов от 1024 до 8192 бит оно меняется в диапазоне 0.0001156–0.0006475 с.

Интенсивность отказов существенно влияет на время обработки пакетов в многомодовой кольцевой сети. При высоких интенсивностях оно значительно увеличивается, особенно для больших пакетов. Однако при снижении интенсивности отказов до 10^{-6} и ниже время обработки приближается к значениям, характерным для сети без отказов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подчеркнуло ключевую роль разработки и анализа математической модели для оптимизации процессов передачи данных в кольцевых сетях, основанных на многомодовой оптоволоконной технологии с маркерным методом доступа. Использование методов теории надежности, случайных процессов и массового обслуживания, а также применение преобразования Лапласа – Стильтеса позволило сформировать точные математические уравнения, обеспечивающие глубокий анализ характеристик сети и выявление ключевых закономерностей ее функционирования.

Разработанная математическая модель учитывает критически важные параметры многомодовой оптоволоконной среды, включая пропускную способность, временные задержки, уровень потерь данных.

В ходе исследования был проведен всесторонний анализ работы многомодовой оптоволоконной сети с маркерным методом доступа, в рамках которого были изучены вероятностные и временные характеристики передачи информации для различных классов пакетов. В частности, были рассмотрены зависимости времени обслуживания пакетов от количества узлов, подсоединенных к передающей среде, а также влияния пропускной способности каждой моды и интенсивности поступления пакетов в сеть. Анализ показал, что с увеличением количества узлов в сети происходит возрастание загрузки передающей среды и узлов, что, в свою очередь, увеличивает цикл обслуживания и время передачи пакетов, а также снижает производительность сети. Кроме того, в критической области функционирования установлено, что повышение интенсивности отказов резко ухудшает характеристики сети, в частности, увеличивается время обслуживания пакетов и снижается вероятность их своевременной передачи.

Особое внимание уделено вопросам надежности сети, а именно влиянию отказов отдельных элементов на ее производительность. Этот аспект имеет

особую значимость для критически важных приложений, где надежность передачи данных определяет успешность работы всей системы. Внедрение характеристик надежности в модель позволило разработать механизмы учета отказов и предложить способы их минимизации, что повышает устойчивость сети к внешним воздействиям и потенциальным сбоям.

Результаты показали, что за счет правильной настройки параметров можно существенно повысить общую производительность сети, снизить вероятность возникновения коллизий и увеличить пропускную способность. Данные выводы подтверждают высокую эффективность предложенных решений и их значимость для повышения качества работы сетей.

Проведенные расчеты и моделирование продемонстрировали, что многомодовая оптоволоконная среда является перспективным решением для организации высокопроизводительных локальных сетей, особенно в условиях повышенных требований к надежности и минимизации потерь информации. Разработанная математическая модель может служить универсальным инструментом для анализа, построения и оптимизации сетей, обеспечивая научно обоснованные рекомендации для их эффективного использования.

Вклад авторов

Д.В. Жматов разработал теоретическую основу исследования, доказав ключевую теорему о цикле опроса в маркерных сетях (формулы 1–13), провел аналитический расчет временных характеристик сети и построил графики зависимостей (рис. 1–6), проанализировал результаты оптимизации маркерного метода доступа и предложил рекомендации для повышения эффективности сети.

А.С. Леонтьев сформулировал постановку задачи, включая требования к передаче данных в сетях, провел численное моделирование параметров сети (загрузки узлов, пропускной способности, вероятности своевременной доставки), определил влияние отказов передающей среды на производительность сети (таблица).

Authors' contributions

D.V. Zhmatov has developed the theoretical framework for the study by proving a key theorem on polling cycles in token-passing networks (Eqs. 1–13), calculated the network timing characteristics analytically and plotted the resulting dependencies (Figs. 1–6), analyzed the optimization results for the token-based access method and proposed recommendations to enhance network efficiency.

A.S. Leontiev has defined the problem statement, including data transmission requirements for networks, performed numerical simulations of network parameters (node load, throughput, and probability of on-time delivery), assessed the impact of transmission medium failures on network performance (Table).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев А.С., Жматов Д.В. Аналитический метод анализа процессов передачи сообщений в оптоволоконных сетях с маркерным доступом для цифровых подстанций. *Russ. Technol. J.* 2024;12(6):26–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-26-38>
2. Леонтьев А.С. Разработка аналитических методов, моделей и методик анализа локальных вычислительных сетей. *Теоретические вопросы программного обеспечения: Межвузовский сборник научных трудов*. М.: МИРЭА; 2001. С. 70–94.
3. Леонтьев А.С. Многоуровневые аналитические и аналитико-имитационные модели оценки вероятностно-временных характеристик многомашинных вычислительных комплексов с учетом надежности. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023;5(131). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.8>
4. Sapna, Sharma M. Performance evaluation of a wired network with & without Load Balancer and Firewall. In: *2010 International Conference on Electronics and Information Engineering*. Kyoto, Japan. 2010. P. V2-515–V2-519. <https://doi.org/10.1109/ICEIE.2010.5559755>
5. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010.
6. Звонарева Г.А., Бузунов Д.С. Использование имитационного моделирования для оценки временных характеристик распределенной вычислительной системы. *Открытое образование*. 2022;26(5):32–39. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2022-5-32-39>
7. Кульба В.В., Мамиконов А.Г., Шелков А.Б. Резервирование программных модулей и информационных массивов в АСУ. *Автоматика и телемеханика*. 1980;8:133–141.
8. Талалаев А.А., Фроленко В.П. Отказоустойчивая система организации высокопроизводительных вычислений для решения задач обработки потоков данных. *Программные системы: Теория и приложения*. 2018;9(1–36):85–108. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-1-85-108>
9. Акимова Г.П., Соловьев А.В., Тарханов И.А. Моделирование надежности распределенных вычислительных систем. *Информационные технологии и вычислительные системы (ИТuBC)*. 2019;3:70–86. <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
10. Павский В.А., Павский К.В. Математическая модель для расчета показателей надежности масштабируемых вычислительных систем с учетом времени переключения. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2020;2(212):134–145. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-134-145>
11. Waseem A., Wu Y.W. A survey on reliability in distributed systems. *J. Comput. Syst. Sci.* 2013;79(8):1243–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2013.02.006>
12. Иваничкина Л.В., Непорада А.Л. Модель надежности распределенной системы хранения данных в условиях явных и скрытых дисковых сбоев. *Труды Института системного программирования РАН*. 2015;27(6):253–274. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27\(6\)-16](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-16)
13. Rothe S., Besser K.L., Krause D., Kuschmierz R., Koukourakis N., Jorswieck E., Czarske J.W. Securing Data in Multimode Fibers by Exploiting Mode-Dependent Light Propagation Effects. *Research*. 2023;6:Article 0065. <https://doi.org/10.34133/research.0065>
14. Ferguson K., Kleinrock L. Optimal update timing of stale information metrics, including age of information. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*. 2023;4:734–746. <https://doi.org/10.1109/JSAIT.2023.3344760>
15. He Z., Kleinrock L. Optimization of Assisted Search Over Server-Mediated Peer-to-peer Networks. In: *2022 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2022)*. IEEE. 2022. P. 4928–4934. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000846>
16. Jain R. Error characteristics of fiber distributed data interface (FDDI). *IEEE Trans. Commun.* 1990;38(8):1244–1252. <https://doi.org/10.1109/26.58757>
17. Kleinrock L. Internet congestion control using power metric: *Keep the just full, but no fuller*. *Ad Hoc Networks*. 2018;80:142–157. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.05.015>

REFERENCES

1. Leontyev A.S., Zhmatov D.V. Analytical method for analyzing message transmission processes in FDDI networks for digital substations. *Russ. Technol. J.* 2024;12(6):26–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-26-38>
2. Leontyev A.S. Development of Analytical Methods, Models, and Techniques for Local Area Networks Analysis. In: *Theoretical Issues of Software Engineering: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Moscow: MIREA; 2001. P. 70–94 (in Russ.).
3. Leontyev A.S. Multilevel Analytical and Analytical-Simulation Models for Evaluating the Probabilistic and Temporal Characteristics of Multimachine Computing Complexes with Regard to Reliability. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2023;5(131) (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.8>
4. Sapna, Sharma M. Performance evaluation of a wired network with & without Load Balancer and Firewall. In: *2010 International Conference on Electronics and Information Engineering*. Kyoto, Japan. 2010. P. V2-515–V2-519. <https://doi.org/10.1109/ICEIE.2010.5559755>

5. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010.
6. Zvonareva G.A., Buzunov D.S. Using Simulation Modeling to Estimate Time Characteristics of a Distributed Computing System. *Otkrytoe obrazovanie = Open Education*. 2022;26(5):32–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2022-5-32-39>
7. Kul'ba V.V., Mamikonov A.G., Shelkov A.B. Redundancy of program modules and data arrays in a MIS. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*. 1980;8:133–141 (in Russ.).
8. Talalaev A.A., Frolenko V.P. Fault-tolerant system for organizing high-performance computing for solving data stream processing problems. *Programmnye sistemy: Teoriya i prilozheniya = Program Systems: Theory and Applications*. 2018;9(1–36):85–108 (in Russ.). <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-1-85-108>
9. Akimova G.P., Solovyev A.V., Tarkhanov I.A. Modeling the reliability of distributed information systems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2019;3:70–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
10. Pavsky V.A., Pavsky K.V. Mathematical Model for Calculating Reliability Indicators of Scalable Computer Systems Considering Switching Time. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2020;2(212): 134–145 (in Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-134-145>
11. Waseem A., Wu Y.W. A survey on reliability in distributed systems. *J. Comput. Syst. Sci.* 2013;79(8):1243–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2013.02.006>
12. Ivanichkina L.V., Neporada A.L. The Reliability model of a distributed data storage in case of explicit and latent disk faults. *Trudy Instituta sistemnogo programirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2015;27(6):253–274 (in Russ.). [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27\(6\)-16](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-16)
13. Rothe S., Besser K.L., Krause D., Kuschmierz R., Koukourakis N., Jorswieck E., Czarske J.W. Securing Data in Multimode Fibers by Exploiting Mode-Dependent Light Propagation Effects. *Research*. 2023;6:Article 0065. <https://doi.org/10.34133/research.0065>
14. Ferguson K., Kleinrock L. Optimal update timing of stale information metrics, including age of information. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*. 2023;4:734–746. <https://doi.org/10.1109/JSAIT.2023.3344760>
15. He Z., Kleinrock L. Optimization of Assisted Search Over Server-Mediated Peer-to-peer Networks. In: *2022 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2022)*. IEEE. 2022. P. 4928–4934. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000846>
16. Jain R. Error characteristics of fiber distributed data interface (FDDI). *IEEE Trans. Commun.* 1990;38(8):1244–1252. <https://doi.org/10.1109/26.58757>
17. Kleinrock L. Internet congestion control using power metric: *Keep the just full, but no fuller*. *Ad Hoc Networks*. 2018;80: 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.05.015>

Об авторах

Жматов Дмитрий Владимирович, к.т.н., доцент, доцент кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zhmatov@mirea.ru. Scopus Author ID 56825948100, SPIN-код РИНЦ 2641-6783, <https://orcid.org/0000-0002-7192-2446>

Леонтьев Александр Савельевич, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: leontev@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5798-9721, <https://orcid.org/0000-0003-3673-2468>

About the Authors

Dmitry V. Zhmatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mathematical Support and Standardization, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zhmatov@mirea.ru. Scopus Author ID 56825948100, RSCI SPIN-code 2641-6783, <https://orcid.org/0000-0002-7192-2446>

Alexander S. Leontyev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor, Department of Mathematical Support and Standardization, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: leontev@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5798-9721, <https://orcid.org/0000-0003-3673-2468>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.65
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-51-62>
EDN NOGIBI



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ временных программно-аппаратных задержек в схемах аудиомодулей с киберфизической SPICE-эмуляцией

Н.Р. Левченко[@], М.С. Костин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: Levchenko_n@mirea.ru

• Поступила: 04.03.2025 • Доработана: 05.05.2025 • Принята к опубликованию: 26.07.2025

Резюме

Цели. Цель статьи – параметрический анализ влияния временных задержек в схемах киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей, вносимых аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями программно-аппаратного интерфейса, центральным процессором и программной средой визуально-графической эмуляции (ВГЭ) в зависимости от выбранного протокола «ввода-вывода» данных и установленных параметров программного блока ВГЭ, таких как частота дискретизации, размер и время буфера, число каналов.

Методы. Применяются методы архитектурного SPICE¹-моделирования электрических схем на программных платформах ВГЭ *Simulink*, в т.ч. с использованием ресурсов библиотеки *Simscape*, и *LiveSPICE*; методы интегрирования дифференциальных уравнений при численном анализе SPICE-моделей аналоговых схем; методы обработки экспериментальных данных киберфизической эмуляции с помощью встроенных средств среды *Simulink* и лабораторного радиоизмерительного оборудования.

Результаты. Предложен метод киберфизической SPICE-эмуляции аналоговых аудиоустройств. Получены результаты анализа формирования временных задержек в схемах сигнальных аудиомодулей с киберфизической эмуляцией при вариации преднастраиваемых параметров, влияющих на задержки сигналов, с применением двойников. Разработаны технические рекомендации выбора корректирующих параметров временных задержек от 20 до 120 мс для обеспечения постобработки аудиосигнала.

Выводы. Показано, что для часто используемого в аудиоинтерфейсной технике протокола «ввода-вывода» данных ASIO² при тождественно установленных параметрах программного блока ВГЭ (частота дискретизации 44.1 кГц, размер буфера 8) типовые функциональные узлы схем аудиомодулей с киберфизической эмуляцией, построенные в среде ВГЭ *LiveSPICE*, имеют наименьшие временные задержки 5 мс – для схемы прямого прохождения сигнала и 7 мс – в случае с киберфизической эмуляцией SPICE-схемы в отношении

¹ SPICE (англ. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – программа-симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. [SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) is an open source simulator of general-purpose electronic circuits.]

² Audio Stream Input/Output, «ввод-вывод потоковых аудиоданных» – протокол передачи данных с малой задержкой, предоставляющий приложениям унифицированный интерфейс к аппаратным ресурсам. [Audio Stream Input/Output is a low-latency data transmission technology providing applications with a uniform interface to hardware resources.]

к их реализации в среде ВГЭ *Simulink*. Установлено, что обоснованно выбранными настройками при практической реализации метода киберфизической эмуляции SPICE-моделей являются: частота дискретизации 44.1 кГц, размер буфера от 512 до 1024 семплов и протокол «ввода-вывода» данных ASIO.

Ключевые слова: временные задержки, киберфизическая SPICE-эмуляция, *Simulink*, *LiveSPICE*, *Simscape*, аудиointерфейс, ASIO, сигнальный аудиомодуль

Для цитирования: Левченко Н.Р., Костин М.С. Анализ временных программно-аппаратных задержек в схемах аудиомодулей с киберфизической SPICE-эмуляцией. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):51–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-51-62>, <https://www.elibrary.ru/NOGIBI>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analysis of time software and hardware delays in audio module circuits with cyber-physical SPICE emulation

Nikita R. Levchenko[@], Mihail S. Kostin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: Levchenko_n@mirea.ru

• Submitted: 04.03.2025 • Revised: 05.05.2025 • Accepted: 26.07.2025

Abstract

Objectives. The study sets out to parametrically investigate the impact of time delays within cyber-physical emulation circuits for signal audio modules. Specifically, it examines how delays introduced by analog-to-digital and digital-to-analog converters of the hardware/software interface, the central processor, and the visual graphical emulation (VGE) software environment are influenced by factors like the selected data input-output protocol and the VGE block preset configurations such as sampling rate, buffer size and time, and the number of channels.

Methods. Used methods of architectural SPICE³ modeling of electrical circuits on the VGE *Simulink* software platforms leverage the resources of the *Simscape* library and *LiveSPICE*. Additional methods include those for incorporating differential equations in the numerical analysis of SPICE models designed for analog circuits and techniques for processing experimental data generated from cyber-physical emulation using the built-in *Simulink* environment and associated laboratory radio measurement tools.

Results. The study introduces a novel approach to emulate analog audio devices using cyber-physical SPICE modeling. Through the use of digital twins, the study investigates the impact of modifiable parameters on signal delays within audio module circuits during cyber-physical emulation. Based on these findings, technical guidelines are provided for selecting appropriate delay correction settings between 20 and 120 ms to ensure efficient high-speed audio signal post-processing.

Conclusions. By configuring the VGE software block's settings identically to the ASIO⁴ data input/output protocol prevalent in audio interface technology (44.1 kHz sampling frequency, 8 buffer size) substantially decreased

³ SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) is an open-source simulator for general-purpose electronic circuits.

⁴ Audio Stream Input/Output is a low-latency data transmission technology providing applications with a uniform interface to hardware resources.

latency in typical audio module circuit nodes is achieved with cyber-physical emulation built into the VGE *LiveSPICE* environment. The achieved time delays of 5 ms direct transmission circuit contrast with the 7 ms latency observed in the cyber-physical emulation of the SPICE circuit when both are benchmarked within the VGE *Simulink* environment. The successful implementation of cyber-physical emulation for SPICE models is achieved through the use of particular settings, such as a 44.1 kHz sampling frequency, buffer sizes ranging from 512 to 1024 samples, and the use of the ASIO data input/output protocol.

Keywords: time delay, correction, cyber-physical SPICE emulation, Simulink, LiveSPICE, Simscape, audio interface, ASIO, signal audio module

For citation: Levchenko N.R., Kostin M.S. Analysis of time software and hardware delays in audio module circuits with cyber-physical SPICE emulation. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):51–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-51-62>, <https://www.elibrary.ru/NOGIBI>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при автоматизированной разработке и программно-численном анализе схемно-архитектурных решений функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры применима следующая классификация цифрового описания электрических схем: кодовое, визуально-графическое и смешанное [1]. Так, например, интерпретация аппаратной архитектуры функциональных схем сигнальных радиомодулей при помощи программного кода предполагает использование специализированных языков описания SPICE⁵, VHDL⁶ или языков объектно-ориентированного программирования C/C++, Java, Python, Ruby и т.д. Визуально-графическое описание является реализацией кодовой интерпретации схемотехнической и функциональной архитектуры с помощью функциональных блоков, соединенных в ориентированный граф. При этом смешанная эмуляция предполагает вариативную комбинацию кодового, блочного и специального языкового аппаратного описания элементов схем, а также их электрических и логических связей.

Типичным примером интерпретации аналоговых схемотехнических решений является SPICE-эмулятор [2], построенный на численных методах интегрирования дифференциальных систем уравнений для нахождения токов и напряжений в заданной электрической цепи.

Как известно, компании по производству электронной компонентной базы (ЭКБ), такие

как Texas Instruments⁷, Linear Technology⁸, KYOCERA AVX⁹, STMicroelectronics¹⁰ и др., предоставляют инженерам-разработчикам параметрические SPICE-модели, а также векторные S-модели библиотек ЭКБ с эмпирически выверенными характеристиками. При этом использование оригинальных библиотек ЭКБ с полной параметризацией, ориентированной под конкретные эквивалентные модели, построенные на базе широко применяемого движка SPICE-эмулятора для различных групп радиокомпонентов и аналоговых интегральных схем, позволяет в сжатые временные сроки добиться надежной воспроизводимости радиотехнических характеристик электронного печатного узла по отношению к результатам его схемотехнической эмуляции.

Примерами визуально-графического описания являются среды визуального проектирования *SigmaStudio*¹¹, *LTSPICE*¹², *QSPICE*¹³, *Tina-TI*¹⁴, *NI Multisim*¹⁵ и др. С помощью таких

⁷ Сайт производителя Texas Instruments. <https://www.ti.com/>. Дата обращения 20.02.2025. [Texas Instruments official website. <https://www.ti.com/>. Accessed February 20, 2025.]

⁸ <https://lineartech.com/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

⁹ <https://www.kyocera-avx.com/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁰ <https://www.st.com/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹¹ <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/sigmastudio>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹² <https://www.quadcept.com/en/service/simulation/ltpspice/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹³ <https://www.qorvo.com/design-hub/design-tools/interactive/qs spice>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁴ <https://designsoftware.com/home/English/>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁵ https://www.ni.com/en/support/downloads/software-products/download.multisim.html?srsId=AfmBOopwVYxFcVbXG5r0bM3lm203f24w4RwAIIITsF3NAp9On-4a8eb_F#452133. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

автоматизированных платформ визуального проектирования со скрытым кодом представляется возможным разработать схмотехническую архитектуру электронного изделия любой конфигурации с помощью библиотечных блоков и модулей. Недостаток таких автоматизированных платформ – отсутствие возможности внесения в реальном времени изменений в описания блоков при помощи пользовательского программного кода. Данного недостатка лишены среды визуально-графической эмуляции (ВГЭ), такие как *LabView*¹⁶, *Simulink Proteus Design Suite*¹⁷ и др. Платформы ВГЭ относятся к классу смешанного описания, т.е. имеют возможность изменения блоков с помощью кода высокоуровневого или командного языка программирования.

Киберфизическим решением в области специальной SPICE-эмуляции аудиомодулей является программная среда ВГЭ *LiveSPICE*¹⁸, созданная зарубежным инженером-изобретателем Д. Шарлетом для персональных разработок, анализа и сигнальной отладки электрических аудиосхем на базе протокола ASIO¹⁹ путем трансляции сигналов в SPICE-модель схемы через аудиоинтерфейс в режиме реального времени.

Предложенный Д. Шарлетом метод киберфизической SPICE-эмуляции сигнальных аудиомодулей, нашедший первое практическое воплощение в среде ВГЭ *LiveSPICE*, является весьма актуальным для исследования, поскольку его внедрение позволит разрабатывать, проводить сигнальную отладку и анализ аналоговых низкочастотных SPICE-схем с физически реальными сигналами от внешних схемно-аппаратных решений в реальном времени. При этом научно-практическая адаптация и внедрение метода киберфизической SPICE-эмуляции в инженерную среду разработчиков требуют перехода на глобальные мультифункциональные платформы ВГЭ со смешанным описанием схем, а также более широким спектром доступных библиотек и возможностью открытого пользовательского программного доступа, как, например, *Simulink*.

Метод состоит в замене для анализа и сигнальной отладки аппаратного модуля или функционального

узла, составляющего схемно-архитектурную часть реального радиоэлектронного устройства, киберсхемой, построенной на программной платформе ВГЭ.

1. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК В СХЕМАХ АУДИОСИГНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ ЭМУЛЯЦИЕЙ

Функциональная схема реализации метода киберфизической SPICE-эмуляции (рис. 1), иллюстрирующая приемопередачу сигнала по протоколу «ввода-вывода» между программно-аппаратным интерфейсом (аудиоинтерфейсом) и предустановленной средой ВГЭ, работает следующим образом. Аудиосигнал подается на входные каналы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) программно-аппаратного интерфейса; программно-аппаратный интерфейс, подключенный через порт USB к компьютеру, по протоколу передачи аудиосигнала через драйвер передает в систему ВГЭ информацию о сигнале; система ВГЭ передает обработанный сигнал программно-аппаратному интерфейсу; программно-аппаратный интерфейс выводит обработанный сигнал на выходные каналы цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Основными параметрами программного блока ВГЭ, влияющими на временные задержки, возникающие при прохождении входного сигнала через программно-аппаратный интерфейс, драйвер и систему ВГЭ, помимо быстродействия АЦП/ЦАП и задержек протокола «ввода-вывода» данных, являются частота дискретизации, размер и время буферизации, число задействованных аппаратных каналов и т.д. Общая формула для накопленных временных задержек $T_{ВЗ \text{ накопл}}$ выглядит следующим образом:

$$T_{ВЗ \text{ накопл}} = T_{АВЗ} + T_{ВЗ \text{ ВГЭ}}, \quad (1)$$

где $T_{АВЗ}$ – аппаратные временные задержки; $T_{ВЗ \text{ ВГЭ}}$ – временные задержки, вносимые блоком ВГЭ.

Аппаратные временные задержки при обработке аудиоинтерфейсом $T_{\text{инт}}$ описываются следующей формулой:

$$T_{\text{инт}} = T_{\text{ЦАП}} + T_{\text{АЦП}} + T_{\text{буф}} + T_{\text{разр}} + T_{\text{чд}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ЦАП}}$ – временные задержки, вносимые ЦАП выходного канала программно-аппаратного интерфейса; $T_{\text{АЦП}}$ – временные задержки, вносимые АЦП входного канала программно-аппаратного интерфейса; $T_{\text{буф}}$ – временные задержки, вносимые буфером программно-аппаратного интерфейса; $T_{\text{разр}}$ – временные задержки, определяемые разрядностью АЦП/ЦАП входного/выходного канала программно-аппаратного интерфейса; $T_{\text{чд}}$ – временные задержки, определяемые частотой дискретизации.

¹⁶ <https://www.ni.com/en/shop/labview.html?srsId=AfmBOoowwWPAjm-J6TthCp-LDLqR2ikpuO0W5eJHВp2ukB0E3Хe00cfO>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁷ <https://proteus.no/proteus.html>. Дата обращения 20.02.2025. / Accessed February 20, 2025.

¹⁸ Сайт разработчика *LiveSPICE*. <https://www.livespice.org/>. Дата обращения 20.02.2025. [The LiveSPICE developer official website. <https://www.livespice.org/>. Accessed February 20, 2025.]

¹⁹ Audio Stream Input/Output, «ввод-вывод потоковых аудиоданных» – протокол передачи данных с малой задержкой, предоставляющий приложениям унифицированный интерфейс к аппаратным ресурсам. [Audio Stream Input/Output is a low-latency data transmission technology providing applications with a uniform interface to hardware resources.]

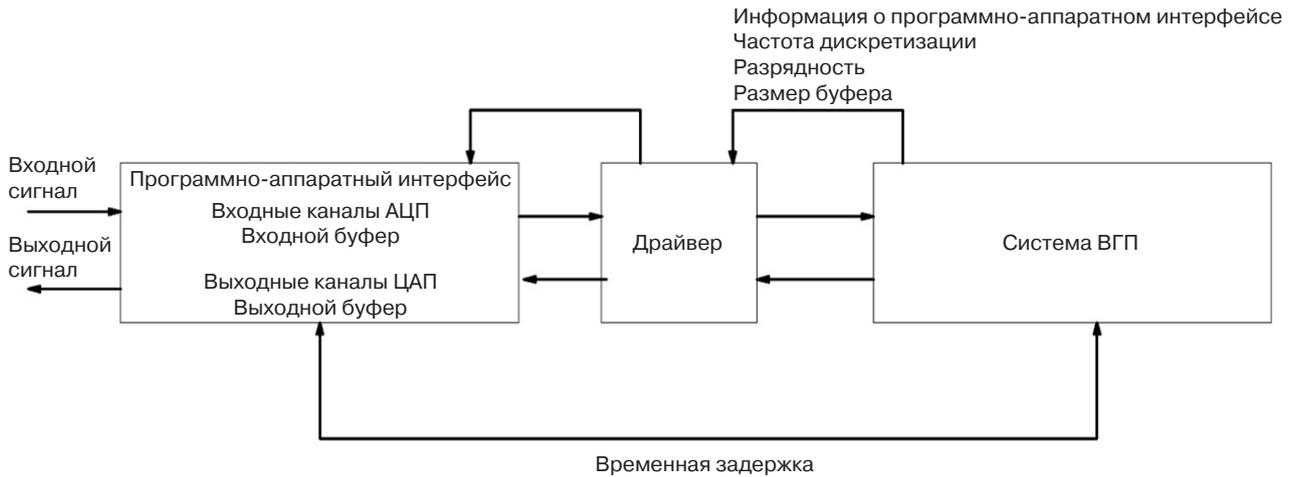


Рис. 1. Функциональная схема реализации метода киберфизической SPICE-эмуляции. Система ВГП – система визуального графического проектирования

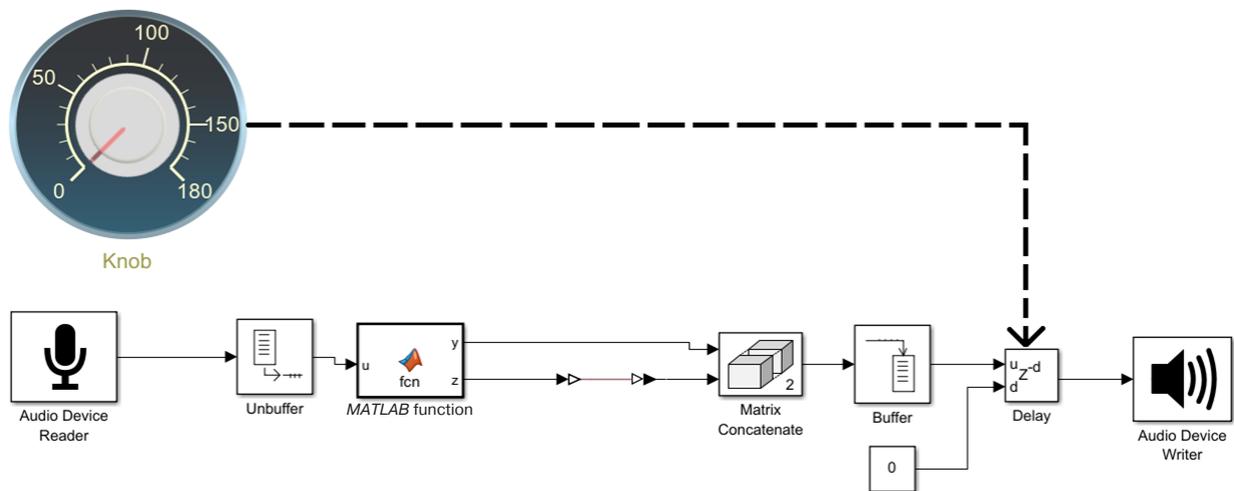


Рис. 2. Функциональная схема плагина киберфизической многоканальной эмуляции сигнальных аудиомодулей в среде ВГЭ Simulink

Для аудиотехники критической накопленной временной задержкой является задержка выше 20 мс, меньшую задержку трудно воспринять на слух. При анализе схем допустима задержка до 130 мс²⁰.

Для проведения исследования временных задержек при киберфизической эмуляции схемы разработан плагин киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей в среде ВГЭ Simulink. При использовании библиотеки Simscape для Simulink данный плагин позволяет разрабатывать и проводить отладку аудиомодулей в реальном времени, замещая реальный модуль его цифровым SPICE-двойником. Этот подход также применен для исследования характеристик, перечисленных во введении, а именно частоты дискретизации,

размера буфера²¹ [3, 4]. Функциональная схема плагина представлена на рис. 2.

Плагин включает следующие функциональные блоки:

1. «Audio Device Reader» – блок инициализации входных каналов программно-аппаратного интерфейса с определенным протоколом;
2. «Unbuffer» – блок, необходимый для преобразования получаемых кадров с программно-аппаратного интерфейса в линейную последовательность семплов;

²¹ Левченко Н.Р., Костин М.С., Филатов С.В., Печенкин С.М. Программа коммутирования аудиointерфейса с SPICE-технологией: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024685518 РФ. Заявка № 2024684363; заявл. 18.10.2024; опубл. 30.10.2024. Бюл. № 11. [Levchenko N.R., Kostin M.S., Filatov S.V., Pechenkin S.M. *Audio Interface Switching Program with SPICE Technology*: Certificate of State Registration of Computer Program 2024685518 RF. Publ. 30.10.2024 (in Russ.)]

²⁰ Что такое задержка при записи звука? <https://taplic.com/audio-tips/latency-in-audio/>. Дата обращения 20.02.2025. [What is the latency in audio recording? <https://taplic.com/audio-tips/latency-in-audio/>. Accessed February 20, 2025.]

3. «*MATLAB function*» – блок-функция, необходимая для разделения каналов программно-аппаратного интерфейса;
4. «*Matrix Concatenate*» – блок, необходимый для формирования матрицы формата $M \times N$, где M – количество семплов, N – количество задействованных каналов;
5. «*Buffer*» – блок, необходимый для преобразования полученной матрицы в кадры для последующей отправки в программно-аппаратный интерфейс;
6. «*Delay*» – блок, необходимый для компенсации фазового сдвига перед отправкой на выходные каналы программно-аппаратного интерфейса;
7. «*Audio Device Writer*» – блок, необходимый для записи полученных кадров в выходные каналы программно-аппаратного интерфейса;
8. «*Кноп*» – цифровой потенциометр для корректировки фазового сдвига блоком «*Delay*».

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК В СХЕМАХ АУДИОМОДУЛЕЙ С КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ SPICE-ЭМУЛЯЦИЕЙ

В рамках проведенного исследования оценено при приеме-передаче сигнала влияние на временные задержки таких параметров программно-аппаратного интерфейса как частота дискретизации, разрядность, размер буфера и протокол передачи аудиоданных. Исследования проведены для двух платформ ВГЭ: *Simulink* – при помощи специального плагина киберфизической SPICE-эмуляции сигнальных аудиомодулей и *LiveSPICE*. В качестве программно-аппаратного интерфейса использовался аудиоинтерфейс UMC1820 (Behringer, Германия) с возможностью выбора следующих настроек: размер буфера – 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 и 2048 семплов; частота дискретизации – 44.1, 48, 88.2 и 96 кГц; протоколы передачи данных – ASIO, WASAPI²² и DirectSound [5–7].

На рис. 3 представлена схема киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей.

В табл. 1 представлены результаты измерений временных задержек $\tau_{\text{зад}}$, полученные с помощью схемы киберфизической эмуляции при изменении частоты дискретизации $F_{\text{д}}$ с фиксированным размером буфера $N = 2048$ для одноканальной схемы прямой трансляции со входа на выход аудиоинтерфейса.

²² Windows Audio Session API, «ввод-вывод потоковых аудиоданных» – протокол передачи данных с малой задержкой, предоставляющий приложениям унифицированный интерфейс к аппаратным ресурсам, разработанный компанией Microsoft. [Windows Audio Session API is a low-latency data transfer protocol providing applications with a unified interface to hardware resources, developed by Microsoft.]



Рис. 3. Схема киберфизической эмуляции, используемая для исследования временных задержек:

- 1 – осциллограф RTB2002 (Rohde & Schwarz, Германия),
2 – аудиоинтерфейс UMC1820, 3 – персональный компьютер, 4 – генератор сигнала HMF2550 (Rohde & Schwarz, Германия)

Таблица 1. Результаты измерений временных задержек при изменении частоты дискретизации с фиксированным размером буфера

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
<i>LiveSPICE</i> , ASIO		<i>Simulink</i> , ASIO		<i>Simulink</i> , DirectSound		<i>Simulink</i> , WASAPI	
$F_{\text{д}}$, кГц	$\tau_{\text{зад}}$, мс	$F_{\text{д}}$, кГц	$\tau_{\text{зад}}$, мс	$F_{\text{д}}$, кГц	$\tau_{\text{зад}}$, мс	$F_{\text{д}}$, кГц	$\tau_{\text{зад}}$, мс
44.1	81.8	44.1	128	44.1	174	44.1	135
48	78.6	48	121	48	162	48	130
88.2	71	88.2	104	88.2	110	88.2	108
96	70	96	98.8	96	108	96	100

Результаты исследований для среды ВГЭ *LiveSPICE* с протоколами DirectSound и WASAPI не представлены, поскольку среда ВГЭ *LiveSPICE* системно настроена исключительно на работу с протоколом ASIO.

В табл. 2 представлены результаты измерений временных задержек при изменении размера буфера N с фиксированной частотой дискретизации $F_{\text{д}} = 44.1$ кГц для одноканальной схемы прямой трансляции со входа на выход аудиоинтерфейса и протоколов ASIO, DirectSound и WASAPI.

Как видно из табл. 1 и 2, при изменении размера буфера программно-аппаратного интерфейса для схемы прямой трансляции сигнала и протокола DirectSound передачи аудиосигнала временные задержки увеличиваются. Так, максимальные временные задержки (174 мс) показала схема прямого прохождения сигнала для среды *Simulink* с плагином киберфизической эмуляции и протоколом приема-передачи DirectSound. Минимальные задержки (5 мс) продемонстрировала схема прямой трансляции сигнала для среды *LiveSPICE*. При повышении частоты дискретизации наблюдается уменьшение временных задержек, обусловленное переполнением буфера [8–10].

Таблица 2. Результаты измерений временных задержек при изменении размера буфера с фиксированной частотой дискретизации

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
LiveSPICE, ASIO		Simulink, ASIO		Simulink, DirectSound		Simulink, WASAPI	
N	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	N	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	N	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	N	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$
8	5	8	81.8	8	–	8	90
16	5	16	82.4	16	–	16	92
32	6	32	82.4	32	–	32	92
64	6.6	64	82.4	64	–	64	92
128	8.6	128	85.4	128	–	128	95
256	13.8	256	88.4	256	103	256	99
512	23.2	512	93.8	512	109	512	100
1024	42.8	1024	105.8	1024	111	1024	107
2048	82	2048	129	2048	164	2048	135

Для измерения временных задержек с применением цифрового SPICE-двойника в системах ВГЭ использована типовая схема усилителя низкой частоты (УНЧ). На рис. 4 и 5 представлены электрические принципиальные схемы УНЧ, построенные на платформах ВГЭ *Simulink* с помощью библиотеки *Simscape* и *LiveSPICE*. Выбор типовой схемы УНЧ для тестирования и коррекции характеристик временных задержек аналоговых схем с киберфизической

SPICE-эмуляцией обоснован типовыми схемными решениями микшерных аудиоконсолей (активных эквалайзерных линеек, преампов, сумматоров, панорамных делителей и т.д.), построенными на базе операционных усилителей (ОУ) [11–13].

В табл. 3 представлены результаты измерения временных задержек с применением цифрового двойника аудиомодуля УНЧ при изменении частоты дискретизации F_d с фиксированным размером буфера $N = 2048$.

Таблица 3. Результаты измерений временных задержек с применением цифрового двойника аудиомодуля УНЧ при изменении частоты дискретизации с фиксированным размером буфера

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
LiveSPICE, ASIO		Simulink, ASIO		Simulink, DirectSound		Simulink, WASAPI	
$F_d, \text{кГц}$	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	$F_d, \text{кГц}$	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	$F_d, \text{кГц}$	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$	$F_d, \text{кГц}$	$\tau_{\text{зад}}, \text{мс}$
44.1	100	44.1	194	44.1	398	44.1	220
48	96	48	182	48	384	48	205
88.2	95	88.2	146	88.2	362	88.2	182
96	95	96	137	96	351	96	157

В табл. 4 представлены результаты измерения временных задержек с применением цифрового двойника аудиомодуля УНЧ при изменении размера буфера N с фиксированной частоте дискретизации $F_d = 44.1 \text{ кГц}$.

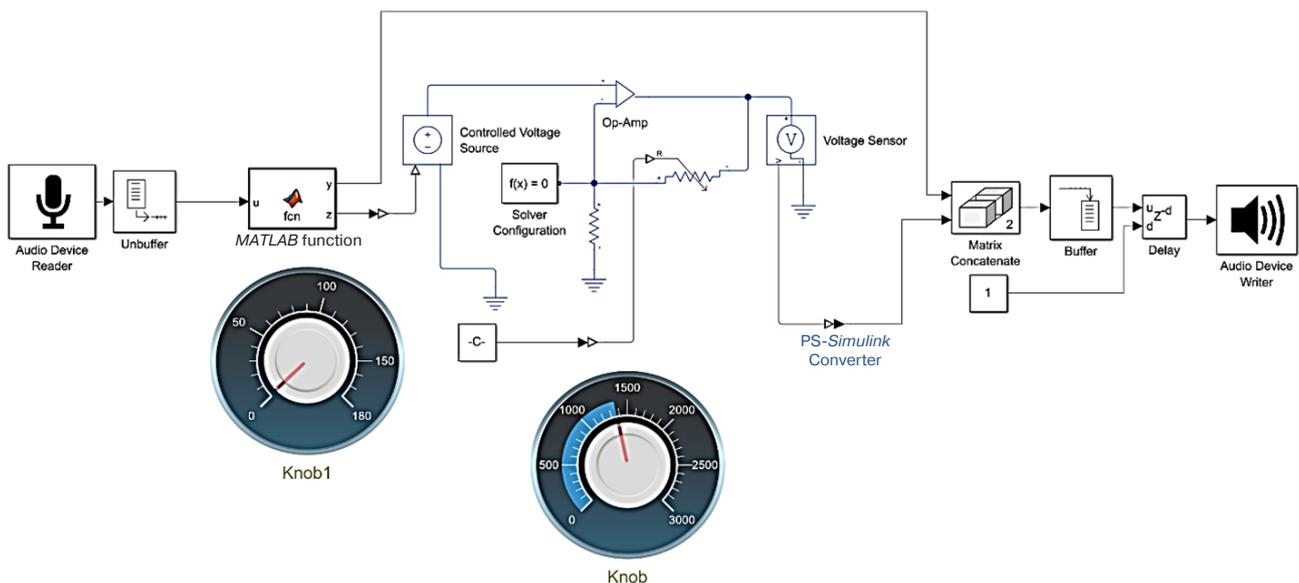


Рис. 4. Схема УНЧ в среде ВГЭ *Simulink* для исследования временных задержек

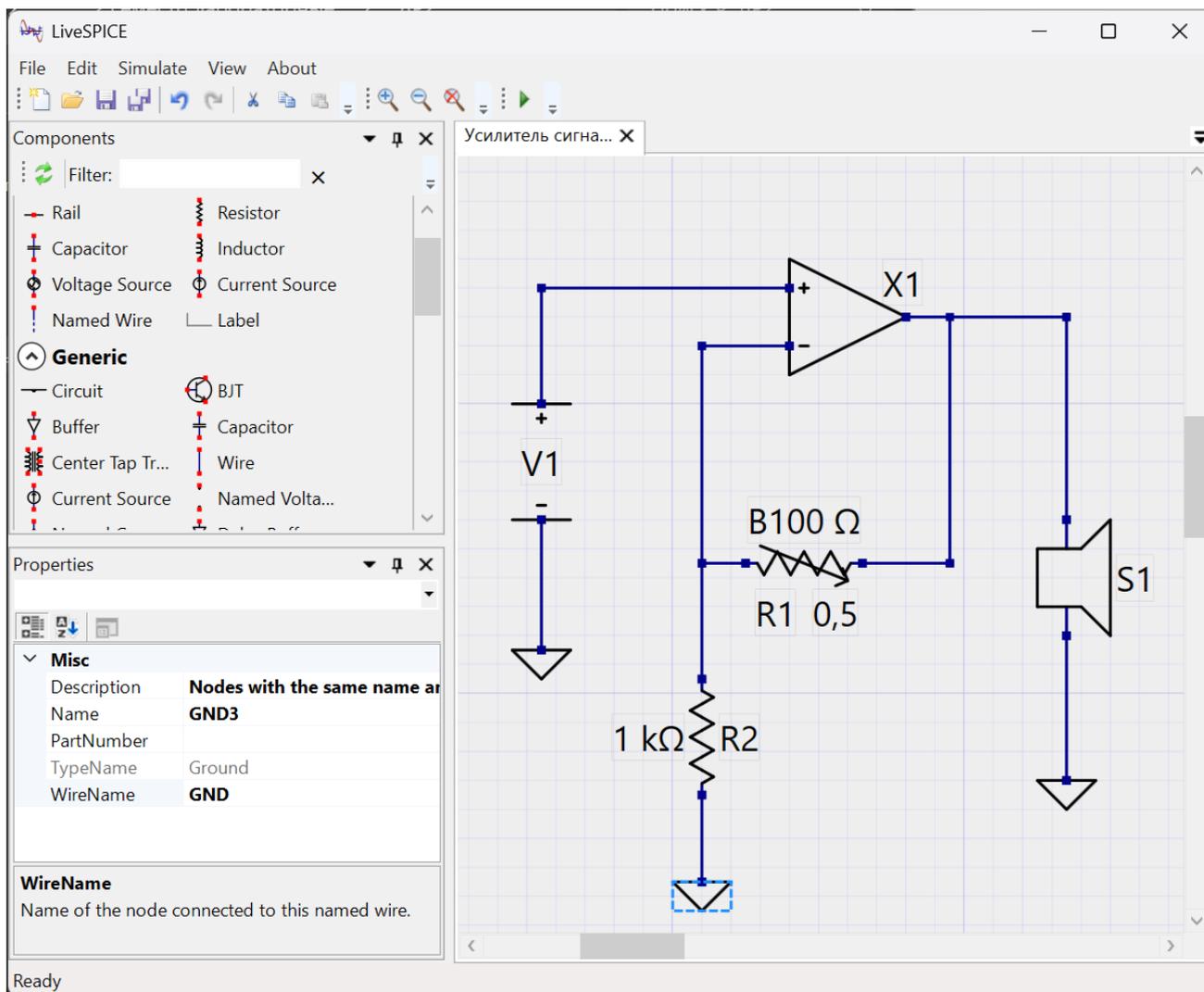


Рис. 5. Схема модели УНЧ в среде ВГЭ LiveSPICE для исследования временных задержек. Обозначения элементов схемы соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-811²³

Таблица 4. Результаты измерений временных задержек с применением цифрового двойника аудиомодуля УНЧ при изменении размера буфера с фиксированной частотой дискретизации

Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных								Среда ВГЭ, протокол «ввода-вывода» данных							
LiveSPICE, ASIO		Simulink, ASIO		Simulink, DirectSound		Simulink, WASAPI		LiveSPICE, ASIO		Simulink, ASIO		Simulink, DirectSound		Simulink, WASAPI	
N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс	N	$\tau_{\text{зад}}$, мс
8	7	8	100	8	–	8	110	256	17.8	256	111.2	256	262	256	118.6
16	7.2	16	100.4	16	–	16	110.2	512	29.4	512	124	512	297	512	130
32	7.4	32	101.2	32	–	32	111.5	1024	53.2	1024	147	1024	310	1024	150
64	8	64	102.8	64	–	64	113.3	2048	100	2048	194	2048	398	2048	210
128	11.6	128	105.2	128	–	128	116.5								

²³ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ..)]

Path	Time Plot (Dark Band = Self Time)	Total Time (s)	Self Time (s)	Number of Calls
> ...ulate(disserOPAMP)		1.130	0.000	1

Рис. 6. Окно работы встроенного инструмента *Simulink Profiler* с плагином киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей

По сравнению с результатами измерений для схем с прямым прохождением – без SPICE-схемы УНЧ, временные задержки увеличились в 2 раза. Связано это с введением дополнительных задержек на обработку SPICE-схемы программным блоком – средой ВГЭ [10, 14, 15]. Система ВГЭ *LiveSPICE* показала наименьшую временную задержку, благодаря встроенному алгоритму просчета дифференциальных уравнений SPICE-модели единойжды. Безусловно, встроенный алгоритм упрощает интегро-дифференциальные расчеты для SPICE-схемы, однако является не гибким и не позволяет использовать готовые SPICE-библиотеки ЭКБ, поставляемые компаниями-производителями по сравнению с библиотекой *Simscape*. В этом случае формула (2) для аппаратных задержек примет следующий вид:

$$T_{\text{инт}} = T_{\text{ЦАП}} + T_{\text{АЦП}} + T_{\text{буф}} + T_{\text{разр}} + T_{\text{чд}} - T_{\text{СВГЭ}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{СВГЭ}}$ – временная задержка, вносимая программным блоком среды ВГЭ.

Так как в среде ВГЭ *LiveSPICE* отсутствуют внутренние инструменты по измерению времени, затрачиваемого самой платформой ВГЭ на эмуляцию, дальнейшие исследования проводились в среде ВГЭ *Simulink* со специально разработанным плагином киберфизической эмуляции под работу с библиотекой *Simscape*. Протокол ASIO показал наименьшие временные задержки, поэтому дальнейшие исследования проводились только с ним, как наиболее распространенным в аудиотехнике [16–18].

3. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК, ВНОСИМЫХ ПРОГРАММНЫМ БЛОКОМ SPICE-ЭМУЛЯЦИИ В СРЕДЕ *SIMULINK*

Для измерения временных задержек, вносимых программным блоком SPICE-эмуляции в среде ВГЭ, используется встроенный инструмент *Simulink Profiler*²⁴. Данный инструмент запускает моделирование и создает отчет, на основе которого

²⁴ Техническая документация *Simulink Profiler*. <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/simulinkprofiler.html>. Дата обращения 20.02.2025. [Technical documentation of *Simulink Profiler*. <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/simulinkprofiler.html>. Accessed February 20, 2025.]

проводился анализ временных задержек, вносимых программным блоком ВГЭ, на базе которого построена схема аудиомодуля. Окно данного инструмента представлено на рис. 6.

Оценить временные задержки, вносимые программным блоком SPICE-эмуляции, возможно через полученные параметры следующим образом:

$$T_{\text{СВГЭ}} = \frac{\text{Self Time}}{\text{Number of calls}}, \quad (4)$$

где Self Time – время работы *Simulink*-модели с учетом формирования отчета *Simulink Profiler*, Number of Calls – количество вызовов модели за время Self Time [19, 20].

Результаты оценки временных задержек, вносимых программной SPICE-эмуляцией *Simulink* представлены в табл. 5 – для схемы прямой трансляции сигнала и в табл. 6 – для схемы УНЧ на ОУ.

Таблица 5. Результаты оценки временных задержек, вносимых программной SPICE-эмуляцией *Simulink*, для схемы прямой трансляции сигнала

Время работы <i>Simulink Profiler</i> , с	Время SPICE-эмуляции ВГЭ, мкс	Время SPICE-эмуляции ВГЭ с симуляцией электрической принципиальной схемы, мкс
1	1.2	1.8
2	1.2	1.8
3	1.2	1.8
4	1.2	1.8
5	1.3	1.95

По результатам, представленным в табл. 5, видно, что с учетом киберфизической SPICE-эмуляции сигнального аудиомодуля временные задержки, вносимые программным блоком эмуляции, увеличились в 1.5 раза.

Результаты исследований быстродействия не представлены, поскольку среда ВГЭ *Simulink* не имеет встроенных тестов для измерения числа затрачиваемых тактов центрального процессора. Используемый центральный процессор в работе – 64-разрядный Intel®Core™ i5-10500T (Intel, США) с тактовой частотой 2.3 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод киберфизической SPICE-эмуляции аналоговых аудиоустройств. Предложена «интерфейс-схема» на базе программно-аппаратного аудиоинтерфейса UMC1820. Исследован характер формирования временных задержек, вносимых программно-аппаратным интерфейсом аппаратно и программно системой ВГЭ. Исследование показало, что наименьшие временные задержки (7 мс) продемонстрировала система ВГЭ *LiveSPICE*. Это связано с применением встроенного алгоритма просчета дифференциальных уравнений SPICE-модели единойжды. Но данный алгоритм не является гибким и не позволяет использовать разработанные SPICE-библиотеки.

Система ВГЭ *Simulink* с разработанным плагином киберфизической эмуляцией схем, напротив, позволяет внедрять кодовое описание готовых моделей ЭКБ ценой повышенных временных задержек (более 100 мс). Проведена расчетная оценка временных задержек, вносимых системой ВГЭ, с помощью инструмента *Simulink Profiler*.

Рекомендация: перед применением метода киберфизической эмуляции сигнальных аудиомодулей

необходимо проводить калибровку программно-аппаратного интерфейса аппаратно с помощью аналоговых потенциометров, встроенных в АЦП, и программно в системе ВГЭ – с помощью блока «Delay» для корректировки временных задержек. Так, в качестве обоснованно выбранных настроек при практической реализации метода киберфизической эмуляции SPICE-моделей являются частота дискретизации 44.1 кГц, размер буфера от 512 до 1024 семплов и протокол «ввода-вывода» данных ASIO.

Вклад авторов

Н.Р. Левченко – разработка плагина для киберфизической эмуляции, проведение эксперимента, обработка полученных результатов.

М.С. Костин – идея киберфизического исследования сигнальных аудиомодулей, консультация по вопросам проведения и обработки результатов эксперимента.

Authors' contributions

N.R. Levchenko developed a plugin for cyber-physical simulation, conducted experiments, and processed findings.

M.S. Kostin suggested a cyber-physical approach to analyzing audio signal modules, offering guidance on conducting and interpreting experimental findings.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Çilingiroğlu Uğur. *Analog Integrated Circuit Design by Simulation: Techniques, Tools, and Methods*. 1st ed. New York: McGraw-Hill; 2019. 576 p.
2. Anumba C.J., Akanmu A., Yuan X., Kan C. Cyber—physical systems development for construction applications. *Front. Eng. Manag.* 2021;8(1):72–87. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0130-4>
3. Левченко Н.Р., Костин М.С. Стенд киберфизического прототипирования сигнальных аудиомодулей. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2024»): Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2024. С. 507–511.
4. Левченко Н.Р. Плагин для киберфизического прототипирования сигнальных аудиомодулей. В сб.: *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. Москва. 2024. С. 344–350. <https://elibrary.ru/omggfz>
5. Левченко Н.Р. Программные интерфейсы передачи аудиоданных для киберфизического SPICE-сигнального прототипирования аудиомодулей. В сб.: *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов Национальной научно-практической конференции*. Москва. 2023. С. 394–398. <https://elibrary.ru/pbtjgd>
6. Левченко Н.Р., Костин М.С. Киберфизическое прототипирование сигнальных аудиомодулей. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2023»): Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2023. С. 347–350. <https://www.elibrary.ru/oykued>
7. Cordell B. *Designing Audio Power Amplifiers*. Routledge; 2019. 792 p.
8. Петленко Д.Б., Ярлыков А.Д., Бойков К.А. *Аналого-цифровые преобразователи сигнальных аудиоинтерфейсов*. М.: Реглет; 2023. 65 с.
9. Self D. *Small Signal Audio Design*: 4th ed. Focal Press; 2023. 846 p. <https://doi.org/10.4324/9781003332985>
10. Bennett C.L. *Digital Audio Theory: A Practical Guide*: 1st ed. Focal Press; 2020. 254 p. <https://doi.org/10.4324/9780429297144>
11. Steiglitz K. *A Digital Signal Processing Primer: with Applications to Digital Audio and Computer Music*. New York, USA: Dover Publications Inc.; 2020. 320 p.
12. Петленко Д.Б., Ярлыков А.Д., Бойков К.А. *Цифровые методы секвенсорной эквализации аудиосигналов радиоакустических систем*. М.: Реглет; 2023. 109 с.
13. Collins K. *Studying Sound: A Theory and Practice of Sound Design*. London, England: The MIT Press; 2020. 248 p.

14. Kamenov A. *Digital Signal Processing for Audio Applications*: 2nd ed. RecordingBlogs; 2014. 348 p.
15. Cipriani A., Giri M. *Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8. V. 2*. 3rd ed. ConTempoNet; 2020. 748 p.
16. Ковалгин Ю.А., Вахитов Ш.Я. *Акустика*. М.: Горячая линия – Телеком; 2022. 660 с.
17. Pirkle W.C. *Designing Audio Effect Plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP Theory*: 2nd ed. New York, USA: Routledge; 2019. 704 p.
18. Геворский А.В., Костин М.С., Бойков К.А. Программно-архитектурная конфигурация многофункционального ADSP-модуля сигнального медиатестирования аудиоустройств. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):30–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58>
19. Oney W. *Programming the Microsoft® Windows® Driver Model*: 2nd ed. Microsoft Press; 2002. 880 p.
20. Yosifovich P. *Windows Kernel Programming*. Independently published; 2021. 461 p.

REFERENCES

1. Çilingiroğlu Uğur. *Analog Integrated Circuit Design by Simulation: Techniques, Tools, and Methods*. 1st ed. New York: McGraw-Hill Education. 2019. 576 p.
2. Anumba C.J., Akanmu A., Yuan X., Kan C. Cyber-physical systems development for construction applications. *Front. Eng. Manag.* 2021;8(1):72–87. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0130-4>
3. Levchenko N.R., Kostin M.S. Stand for cyberphysical prototyping of signal audio modules. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (RADIOINFOCOM-2024): Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2024. P. 507–511 (in Russ.).
4. Levchenko N.R. Plugin for cyberphysical prototyping of signal audio modules. In: *Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovative Projects: Proceedings of the 3rd National Scientific and Practical Conference*. Moscow. 2024. P. 344–350 (in Russ.). <https://elibrary.ru/omggfz>
5. Levchenko N.R. Software interfaces for audio data transmission for cyber-physical SPICE-signal prototyping of audio modules. In: *Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovative Projects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference*. Moscow. 2023. P. 394–398 (in Russ.). <https://elibrary.ru/pbtjgd>
6. Levchenko N.R., Kostin M.S. Cyberphysical prototyping of signal audio modules. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (RADIOINFOCOM-2023): Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2023. P. 347–350 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/oykued>
7. Cordell B. *Designing Audio Power Amplifiers*. Routledge; 2019. 792 p.
8. Petlenko D.B., Yarlykov A.D., Boikov K.A. *Anologo-tsifrovoye preobrazovately signal'nykh audiointerfeisov (Analog-to-Digital Converters of Signal Audio Interfaces)*. Moscow: Reglet; 2023. 65 p. (in Russ.).
9. Self D. *Small Signal Audio Design*: 4th ed. Focal Press; 2023. 846 p. <https://doi.org/10.4324/9781003332985>
10. Bennett C.L. *Digital Audio Theory: A Practical Guide*: 1st ed. Focal Press; 2020. 254 p. <https://doi.org/10.4324/9780429297144>
11. Steiglitz K. *A Digital Signal Processing Primer: with Applications to Digital Audio and Computer Music*. New York, USA: Dover Publications Inc.; 2020. 320 p.
12. Petlenko D.B., Yarlykov A.D., Boikov K.A. *Tsifrovoye metody sekvensornoi ekvalizatsii audiosignalov radioakusticheskikh system (Digital Methods of Sequencer Equalization of Audio Signals of Radioacoustic Systems)*. Moscow: Reglet; 2023. 109 p. (in Russ.).
13. Collins K. *Studying Sound: A Theory and Practice of Sound Design*. London, England: The MIT Press; 2020. 248 p.
14. Kamenov A. *Digital Signal Processing for Audio Applications*: 2nd ed. RecordingBlogs; 2014. 348 p.
15. Cipriani A., Giri M. *Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8. V. 2*. 3rd ed. ConTempoNet; 2020. 748 p.
16. Kovalgin Yu.A., Vakhitov Sh.Ya. *Акустика (Acoustics)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2022. 660 p. (in Russ.).
17. Pirkle W.C. *Designing Audio Effect Plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP Theory*: 2nd ed. New York, USA: Routledge; 2019. 704 p.
18. Gevorsky A.V., Kostin M.S., Boikov K.A. Software-architectural configuration of the multifunctional audio digital signal processor module for signal mediatesting of audio devices. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):30–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58>
19. Oney W. *Programming the Microsoft® Windows® Driver Model*: 2nd ed. Microsoft Press; 2002. 880 p.
20. Yosifovich P. *Windows Kernel Programming*. Independently published; 2021. 461 p.

Об авторах

Левченко Никита Романович, ассистент, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: Levchenko_n@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5126-8830, <https://orcid.org/0009-0002-1749-1451>

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

About the Authors

Nikita R. Levchenko, Assistant, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: Levchenko_n@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5126-8830, <https://orcid.org/0009-0002-1749-1451>

Mihail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Deputy Director, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391.825

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-63-74>

EDN QHZTAK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Режекция нефлуктуационных помех с помощью адаптивного фильтра на основе анализа огибающей спектра

Г.В. Коняшкин[®], Г.В. Куликов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: konyashkin@mirea.ru

• Поступила: 15.04.2025 • Доработана: 29.05.2025 • Принята к опубликованию: 23.07.2025

Резюме

Цели. Активное развитие беспроводных технологий, включая IoT (Internet of Things, интернет вещей) и 5G/6G, сопровождается ростом уровня электромагнитных помех, что ставит перед инженерами задачу разработки эффективных методов их подавления. Особую сложность представляют нефлуктуационные помехи разного рода. Цель данного исследования заключается в реализации и анализе эффективности метода режекции нефлуктуационных помех с использованием адаптивного фильтра, основанного на анализе огибающей спектра.

Методы. В работе использованы методы математического моделирования, спектрального анализа и адаптивной фильтрации. Предложен подход, основанный на выделении огибающей спектра для идентификации и последующего подавления нефлуктуационных помех.

Результаты. Проведено исследование эффективности адаптивного алгоритма подавления нефлуктуационных помех на основе анализа огибающей спектра, который позволяет выделять огибающую спектра помехи, что обеспечивает формирование амплитудно-частотной характеристики режекторного фильтра в реальном времени. В ходе исследования реализованы и протестированы методы обработки для 3 типов нефлуктуационных помех: гармонической, частотно-манипулированной (ЧМ) и фазоманипулированной (ФМ). В качестве полезного сигнала использован сигнал с квадратурной амплитудной модуляцией. Экспериментальные результаты демонстрируют хорошую эффективность предложенного метода. Разработанный адаптивный режекторный фильтр на основе анализа огибающей спектра обладает высокой эффективностью при борьбе с гармонической помехой: энергетический выигрыш в зависимости от относительной интенсивности помехи может составлять до 8–9 дБ. При увеличении количества помех эффективность фильтра сохраняется, хотя и несколько снижается. Алгоритм при определенных условиях работоспособен в условиях воздействия узкополосных ЧМ- и ФМ-помех.

Выводы. Предложенный адаптивный алгоритм подавления нефлуктуационных помех на основе анализа огибающей спектра наиболее эффективен при наличии в канале связи гармонических помех и менее эффективен при наличии более широкополосных помех. Работа имеет практическую значимость для систем цифровой связи, где требуется высокая помехоустойчивость в условиях сложной электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: квадратурная амплитудная модуляция, нефлуктуационные помехи, огибающая спектра, адаптивная фильтрация, режекция, вероятность битовой ошибки, помехоустойчивость

Для цитирования: Коняшкин Г.В., Куликов Г.В. Режекция нефлуктуационных помех с помощью адаптивного фильтра на основе анализа огибающей спектра. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):63–74. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-63-74>, <https://www.elibrary.ru/QHZTAK>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Non-fluctuation interference rejection using an adaptive filter based on spectrum envelope analysis

Georgy V. Konyashkin[@], Gennady V. Kulikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: konyashkin@mirea.ru

• Submitted: 15.04.2025 • Revised: 29.05.2025 • Accepted: 23.07.2025

Abstract

Objectives. The rapid advancement of wireless technologies, including IoT and 5G/6G, is accompanied by an increase in the overall level of electromagnetic interference. This sets engineers the task of developing effective methods to suppress such interference, including especially challenging non-fluctuating interference of various kinds. The study aims to implement and analyze the effectiveness of a non-fluctuation interference rejection method using an adaptive filter based on spectrum envelope analysis.

Methods. Mathematical modeling, spectral analysis, and adaptive filtering methods are used in the work. The described approach is based on spectrum envelope extraction for identification and subsequent suppression of non-fluctuation interference.

Results. The effectiveness of an adaptive algorithm for suppressing non-fluctuation interference based on the analysis of the spectrum envelope has been demonstrated. This algorithm can be used as a means for isolating the envelope of the interference spectrum to enable the formation of the amplitude-frequency response of the notch filter in real time. Processing methods for three types of non-fluctuation interference were implemented and tested: harmonic, frequency-shift keying (FSK), and phase-shift keying (PSK). A signal with quadrature amplitude modulation forms a useful signal for the purposes of the study. The experimental results demonstrate the good efficiency of the proposed method. The developed adaptive notch filter based on spectrum envelope analysis is highly effective in combating harmonic interference to achieve energy gains of 8–9 dB depending on the relative intensity of interference. Notably, even as interference intensifies, the filter effectiveness persists, albeit with a slight reduction. The algorithm functions effectively under exposure to narrowband FSK and PSK interference.

Conclusions. The proposed adaptive algorithm for suppressing fluctuation interference based on spectrum envelope analysis is optimally effective in the presence of harmonic interference within the communication channel, but less effective in the presence of more broadband interference. The study is of practical importance for digital communication systems, where high noise immunity is required in a complex electromagnetic environment.

Keywords: quadrature amplitude modulation, non-fluctuation interference, spectrum envelope, adaptive filtering, rejection, bit error rate, noise immunity

For citation: Konyashkin G.V., Kulikov G.V. Non-fluctuation interference rejection using an adaptive filter based on spectrum envelope analysis. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):63–74. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-63-74>, <https://www.elibrary.ru/QHZTAK>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие беспроводных технологий, включая IoT (Internet of Things, интернет вещей) и 5G/6G, сопровождается ростом уровня электромагнитных помех, что ставит перед инженерами задачу разработки эффективных методов их подавления. Особую сложность представляют нефлуктуационные помехи разного рода. К их числу относятся гармонические сигналы, а также сигналы с частотной и фазовой модуляцией, которые могут возникать как вследствие случайных технических нарушений регламентов радиосвязи, так и в результате преднамеренных действий. Такие помехи существенно снижают отношение сигнал/шум + помеха, затрудняя декодирование информации и повышая вероятность ошибок в системах связи [1–7].

Традиционные методы режекции, такие как адаптивные фильтры с алгоритмами LMS¹/NLMS² или подходы на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), часто оказываются неэффективными [8–12]. Это связано с их ограниченной способностью адаптироваться к нестационарным помехам, а также с высокими вычислительными затратами при обработке. Кроме того, методы, основанные на предварительном анализе спектра, требуют точного знания частотных характеристик помехи, что затруднительно в условиях их динамического изменения.

¹ LMS-алгоритм (Least Mean Squares, алгоритм наименьших средних квадратов) – метод адаптивной фильтрации, используется для настройки коэффициентов фильтра таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратичную ошибку между выходным сигналом фильтра и желаемым сигналом. [The Least Mean Squares (LMS) algorithm is an adaptive filtering technique used to adjust the filter coefficients so as to minimize the mean square error between the filter output and the desired signal.]

² NLMS-алгоритм (Normalized Least Mean Squares, нормализованный алгоритм наименьших квадратов) – метод адаптивной фильтрации, используется для оптимизации параметров фильтра в режиме реального времени. Расширяет базовый алгоритм LMS путем нормализации шага адаптации, что повышает его устойчивость и эффективность при работе с изменяющимися во времени сигналами. [The Normalized Least Mean Squares (NLMS) algorithm is an adaptive filtering method used to optimize filter parameters in real time. It extends the basic LMS algorithm by normalizing the adaptation step, which increases its stability and efficiency when working with time-varying signals.]

В работе предложен альтернативный подход, основанный на использовании априорной информации об огибающей спектра полезного сигнала. Суть метода заключается в выделении спектральной маски помехи с последующим синтезом режекторного фильтра, подавляющего выявленные частотные компоненты [13]. Ключевым преимуществом алгоритма является его адаптивность: он не требует априорной информации о параметрах помехи и способен работать в режиме реального времени. В рамках исследования алгоритм был апробирован применительно к 3 типам нефлуктуационных помех, что позволило оценить универсальность метода. Эксперименты подтвердили, что предложенный адаптивный фильтр обеспечивает значительное снижение уровня помех при минимальном воздействии на полезный сигнал.

Актуальность работы обусловлена растущими требованиями к помехоустойчивости современных радиосистем, особенно в контексте внедрения технологий IoT и автономных устройств, где надежность связи напрямую влияет на безопасность и функциональность. Результаты исследования могут быть применены в телекоммуникационном оборудовании, военных системах связи и промышленной автоматизации, обеспечивая повышение качества работы в условиях сложной электромагнитной обстановки.

МЕТОД РЕЖЕКЦИИ ПОМЕХ

Принцип работы реализованного в ходе проводимого исследования адаптивного фильтра на основе анализа огибающей спектра заключается в следующем:

1. Спектральная обработка. Принимаемая смесь сигнала и помех подвергается спектральному анализу с использованием БПФ. Это преобразует сигнал из временной области в частотную, позволяя получить спектральную картину для дальнейшего анализа.
2. Выделение огибающей спектра. Вычисляется огибающая спектра принимаемой смеси, представляющая собой экстраполированные значения локальных максимумов спектра по заданному диапазону точек. Она позволяет явно выделить отдельные частотные компоненты смеси сигнала и помех.

3. Анализ огибающей спектра. Огибающая спектра принимаемой смеси анализируется для выделения тех частотных компонент, которые необходимо фильтровать. Для этого из огибающей спектра принимаемой смеси вычитается априори известная (т.к. на приемной стороне известны основные параметры сигнала, в частности, метод модуляции и скорость передачи информации) эталонная огибающая спектра полезного сигнала. Это позволяет выделить огибающую спектра помехи для последующего использования ее параметров в конфигурации системы фильтрации.
4. Синтез режекторного фильтра. Полученная огибающая спектра помехи позволяет в реальном времени сформировать амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) регулируемого режекторного фильтра, с помощью которого осуществляется фильтрация смеси сигнала и помехи. Регулируемый режекторный фильтр может быть реализован в виде многополосной структуры с изменяемыми коэффициентами усиления в полосах [13] или в виде фильтра с синтезируемой АЧХ. Последний вариант реализован в данной работе. Функциональная схема адаптивного фильтра, реализующая этот алгоритм, приведена на рис. 1.

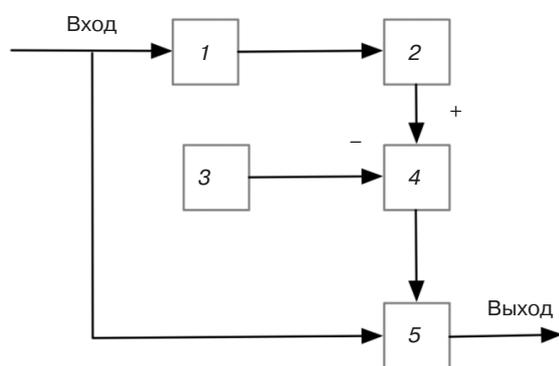


Рис. 1. Функциональная схема адаптивного фильтра на основе анализа огибающей спектра:
1 – преобразователь Фурье; 2 – детектор огибающей спектра; 3 – эталон огибающей спектра полезного сигнала; 4 – сумматор; 5 – режекторный фильтр с синтезируемой АЧХ

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА

Компьютерная модель адаптивного фильтра на основе анализа огибающей спектра применительно к сигналу с квадратурной амплитудной модуляцией 16-QAM (англ. Quadrature Amplitude Modulation 16-QAM) реализована в *MATLAB/Simulink* (trial-версия) и *Scilab/Xcos* (рис. 2). Результаты исследования могут быть легко распространены на другие сигналы со стационарным спектром.

В секции «М КАМ Модуляция» осуществляется генерация полезного сигнала заданной размерности, после чего в канале происходит наложение аддитивного белого гауссовского шума и сложение с выбранным типом нефлуктуационной помехи, сформированной в секции «Генерация нефлуктуационных помех различного типа». Далее, при необходимости, происходит перенос на несущую частоту, после чего полученная смесь сигнала и помех разветвляется на 2 секции демодуляции и расчета BER для обработки с использованием адаптивного фильтра и без него, а также попадает в подсистему выделения огибающей спектра помехи, более подробно представленную на рис. 3.

В результате работы схемы получены спектрограммы, наглядно раскрывающие принцип работы и подтверждающие работоспособность алгоритма, представленные на рис. 4.

Для проведения исследований сформированы 3 генератора помех различных типов: гармонической (от 1 до 4 помех), частотно-манипулированной (ЧМ) и фазоманипулированной (ФМ). В верхней части схемы реализован алгоритм выделения огибающей спектра помехи по принципу, отображенному на рис. 1. Информация о выделенной огибающей спектра помехи обрабатывается с использованием функции *yulewalk*³, предназначенной для проектирования БИХ-фильтров с заданной АЧХ методом, основанным на уравнениях Юла – Уолкера [14–16]. Проектируемый фильтр имеет передаточную функцию:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}},$$

где n_a и n_b – порядки знаменателя и числителя соответственно; z – комплексная переменная Z-преобразования ($z = e^{j\omega n}$), которая связывает разностное уравнение фильтра с его передаточной функцией; $\omega = \frac{2\pi n}{N}$.

Алгоритм выделения огибающей спектра помехи минимизирует среднюю квадратичную ошибку между желаемой и реальной АЧХ, используя итеративный подход.

Основные этапы работы алгоритма:

1. Задание желаемой АЧХ. Пользователь задает векторы частот f и соответствующих амплитуд m , определяющих желаемую характеристику. Частоты нормируются относительно частоты Найквиста ($0 \leq f \leq 1$).

³ *Signal Processing Toolbox User's Guide*. Copyright 1988–2002 by The MathWorks, Inc.

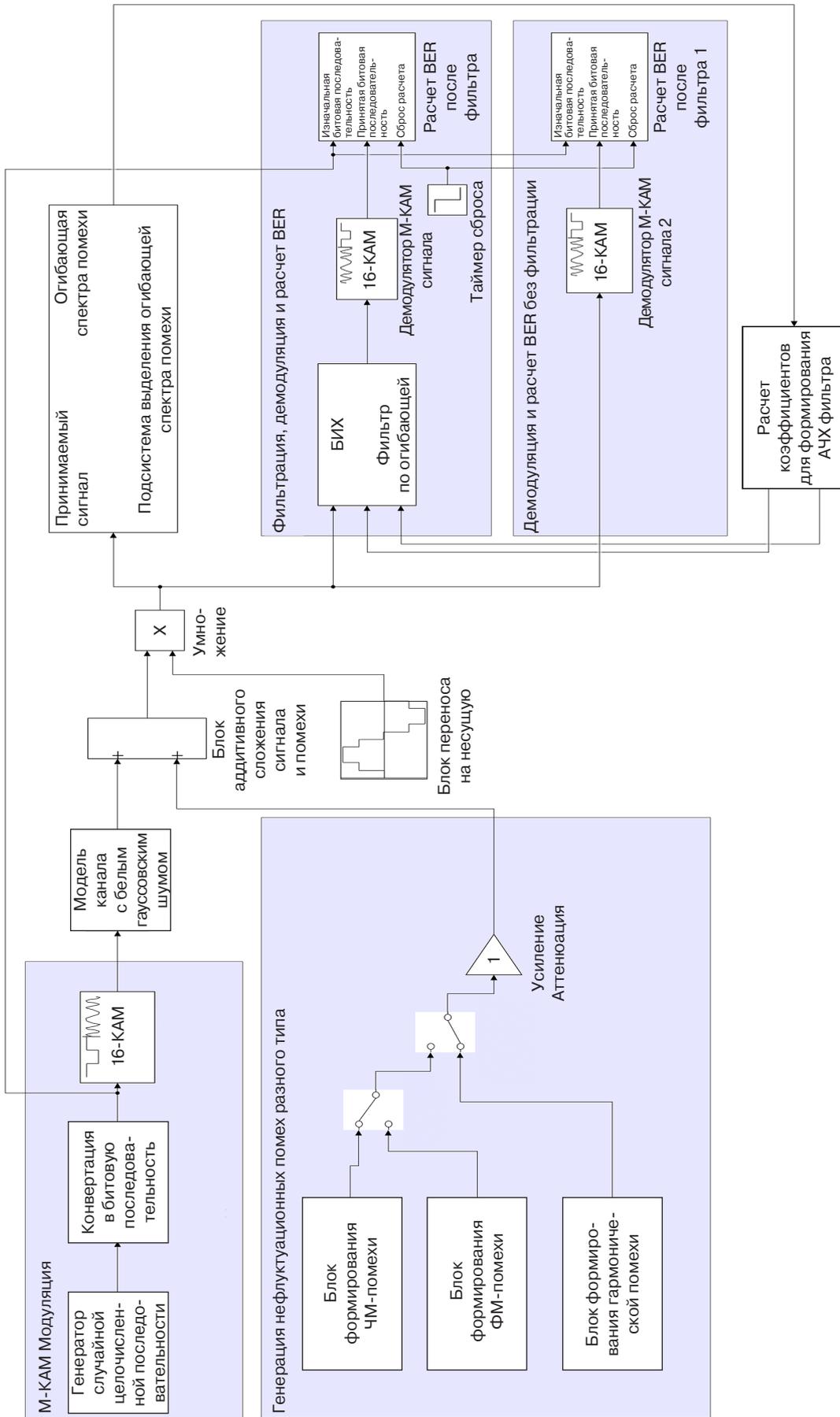


Рис. 2. Функциональная схема для исследования влияния разных типов нефлуктуационных помех. БИХ – бесконечная импульсная характеристика, BER (bit error rate) – вероятность битовой ошибки

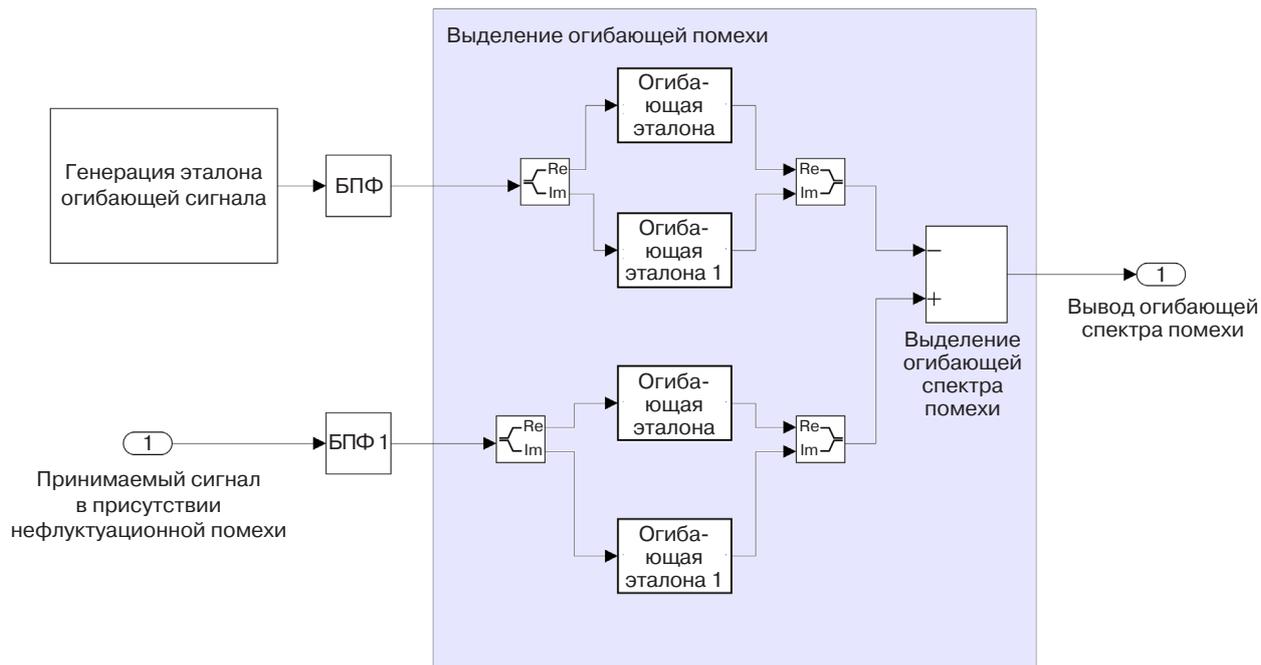


Рис. 3. Подсистема выделения огибающей спектра помехи

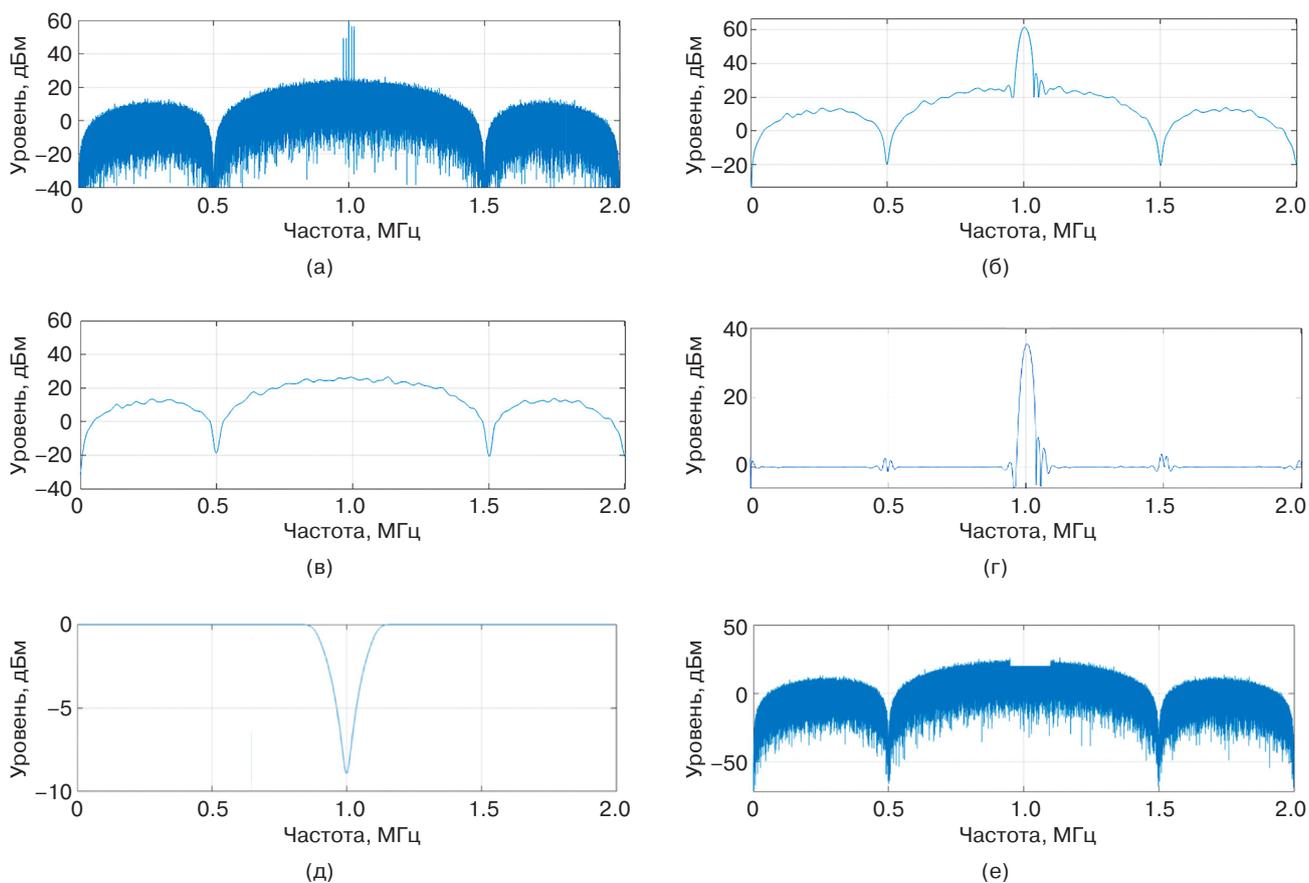


Рис. 4. Спектрограммы, отражающие принцип работы алгоритма:

(а) спектр принятого сигнала с помехой; (б) огибающая спектра принятого сигнала с помехой; (в) эталон огибающей спектра сигнала; (г) разность огибающих принятого сигнала с помехой и эталонной огибающей спектра сигнала; (д) синтезированная АЧХ режекторного фильтра; (е) спектр отфильтрованного сигнала. Уровень в данном случае – это относительная единица измерения мощности сигнала, выраженная в децибелах по отношению к 1 милливатту

2. Расчет автокорреляционной функции. Автокорреляционная функция $r(k)$ описывает, как сигнал коррелирует с самим собой при различных временных задержках k . Желаемая АЧХ преобразуется в автокорреляционную функцию через обратное преобразование Фурье:

$$r(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |H_d(e^{j\omega_n})|^2 e^{j2\pi kn/N},$$

где $|H_d(e^{j\omega_n})|^2$ – квадрат амплитуды желаемой (англ. desired) характеристики, N – количество точек дискретизации, k – индекс задержки.

3. Решение уравнений Юла – Уолкера для знаменателя $A(z)$ передаточной функции. Формируется матрица автокорреляции \mathbf{R} размером $n \times n$ в зависимости от того, какой порядок фильтра нам нужен. Для порядка фильтра n коэффициенты знаменателя $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ находятся из системы:

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{a} = -\mathbf{r},$$

в которой $R_{ij} = r(|i - j|)$ – элементы матрицы автокорреляции; $\mathbf{r} = [r(1), r(2), \dots, r(n)]^T$. Далее рассчитывается знаменатель в виде $A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$.

4. Расчет коэффициентов числителя $B(z)$ передаточной функции. После фиксации $A(z)$ коэффициенты числителя $B(z)$ определяются методом наименьших квадратов, минимизируя ошибку:

$$\sum_{i=0}^{L-1} \left| H_d(e^{j\omega_n}) - \frac{B(e^{j\omega_i})}{A(e^{j\omega_i})} \right|^2,$$

где $A(z)$ – уже найденный знаменатель, L – количество частотных точек.

Далее для упрощения выполняется переход к линейной форме при расчете числителя $B(z)$:

$$B(z) \approx H_d(e^{j\omega_i}) A(z).$$

5. Итеративное уточнение. На этом этапе алгоритм может повторно корректировать $A(z)$ и $B(z)$, чтобы улучшить соответствие АЧХ.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Гармоническая помеха

Для гармонической помехи проведены исследования эффективности режекции с учетом количества помех, одновременно присутствующих в канале связи, относительной амплитуды помехи μ (амплитуда помехи,

деленная на среднюю амплитуду полезного сигнала) и отношения сигнал/шум (ОСШ). Оценка эффективности осуществлялась по величине достигаемой BER.

Проведено исследование влияния количества гармонических помех на эффективность работы фильтра, результаты исследования приведены в таблице.

По полученным значениям построен график, представленный на рис. 5, который иллюстрирует эффективность фильтрации в зависимости от количества гармонических помех.

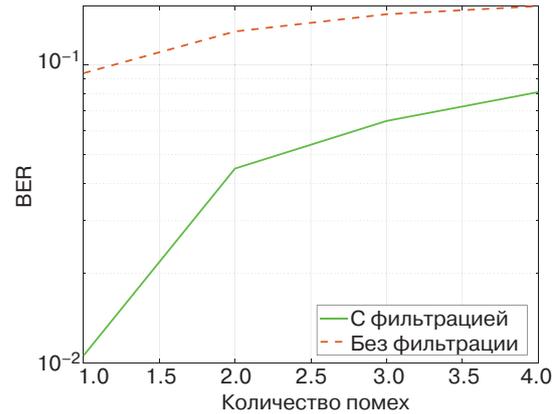


Рис. 5. График зависимости BER от количества помех

Анализируя график, можно сделать вывод что наибольшую эффективность реализованный метод адаптивной фильтрации показывает при малом количестве гармонических помех, однако он сохраняет свою эффективность и при увеличении их количества.

Зависимости BER от ОСШ при разной относительной интенсивности одной гармонической помехи μ для 2 случаев: без фильтрации и при использовании разработанного адаптивного режекторного фильтра показаны на рис. 6.

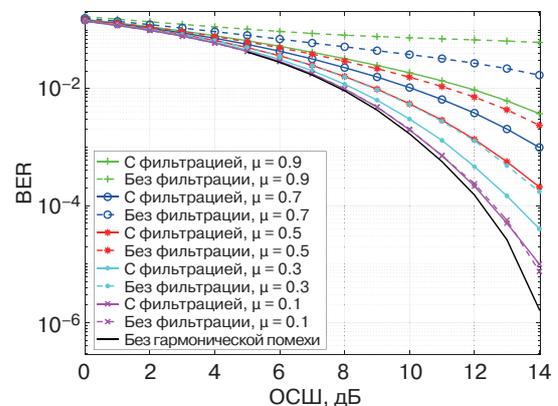
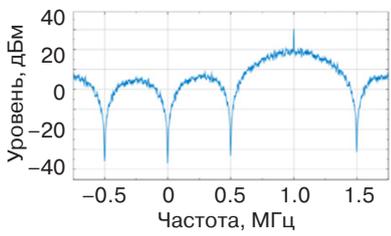
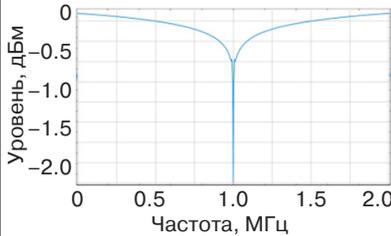
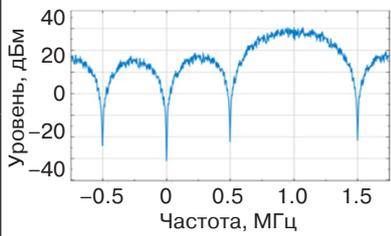
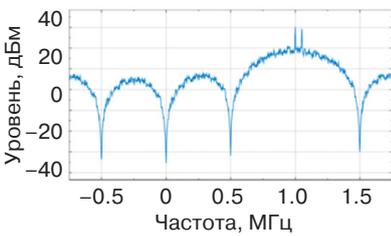
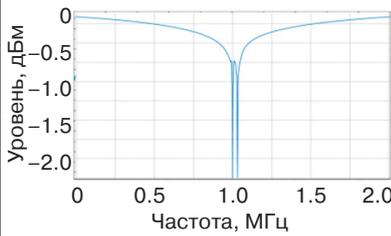
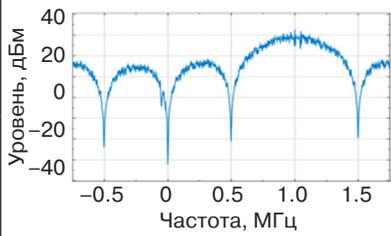
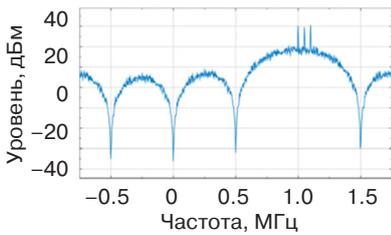
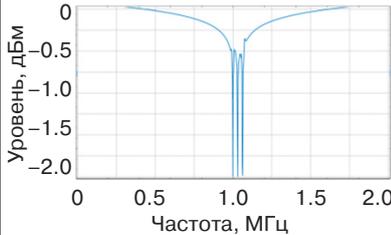
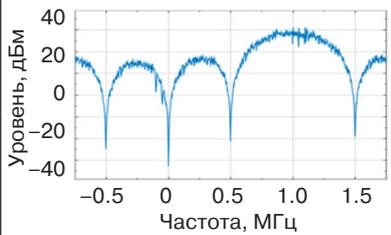
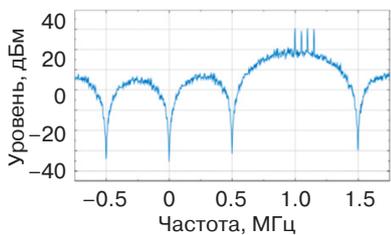
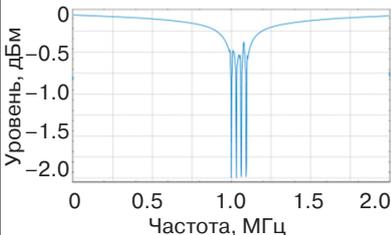
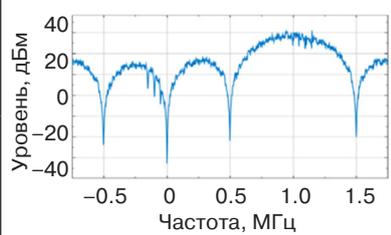
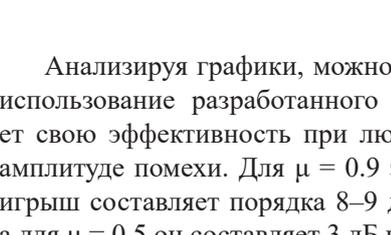
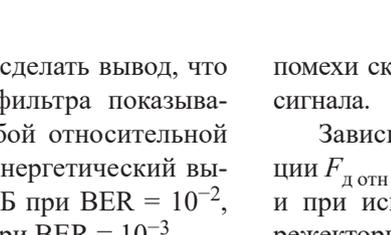
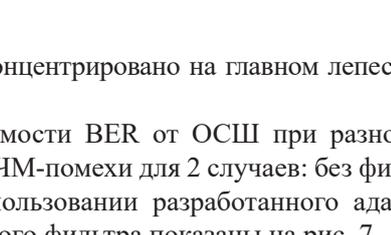
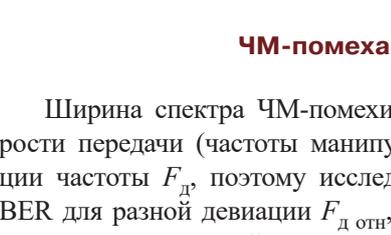
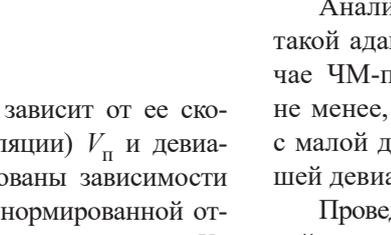
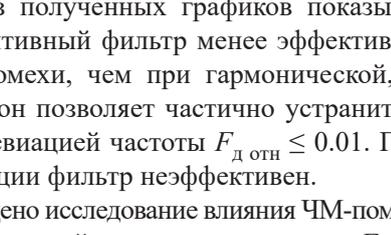
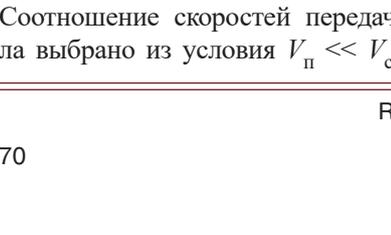
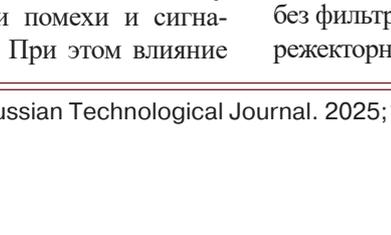
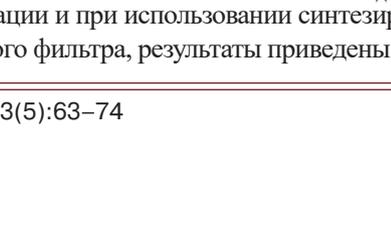


Рис. 6. Зависимость BER от ОСШ при использовании режекторного фильтра на основе анализа огибающей спектра и без фильтра при приеме сигналов 16-QAM на фоне гармонической помехи с разной относительной интенсивностью μ

Таблица. Результаты исследования в зависимости от количества гармонических помех при ОСШ = 13 дБ, $\mu = 1$

Спектр до фильтрации	АЧХ фильтра	Спектр после фильтрации	BER с фильтрацией и без нее
			0.01059
			0.09377
			0.01294
			0.04491
			0.06486
			0.14781
			0.08102
			0.13731

Анализируя графики, можно сделать вывод, что использование разработанного фильтра показывает свою эффективность при любой относительной амплитуде помехи. Для $\mu = 0.9$ энергетический выигрыш составляет порядка 8–9 дБ при $BER = 10^{-2}$, а для $\mu = 0.5$ он составляет 3 дБ при $BER = 10^{-3}$.

ЧМ-помеха

Ширина спектра ЧМ-помехи зависит от ее скорости передачи (частоты манипуляции) V_{Π} и девиации частоты $F_{д}$, поэтому исследованы зависимости BER для разной девиации $F_{д\text{отн}}$, нормированной относительно канальной скорости передачи сигнала V_c . Соотношение скоростей передачи помехи и сигнала выбрано из условия $V_{\Pi} \ll V_c$. При этом влияние

помехи сконцентрировано на главном лепестке КАМ сигнала.

Зависимости BER от ОСШ при разной девиации $F_{д\text{отн}}$ ЧМ-помехи для 2 случаев: без фильтрации и при использовании разработанного адаптивного режекторного фильтра показаны на рис. 7.

Анализ полученных графиков показывает, что такой адаптивный фильтр менее эффективен в случае ЧМ-помехи, чем при гармонической, но, тем не менее, он позволяет частично устранить помеху с малой девиацией частоты $F_{д\text{отн}} \leq 0.01$. При большей девиации фильтр неэффективен.

Проведено исследование влияния ЧМ-помехи с разной относительной интенсивностью μ при $F_{д\text{отн}} = 0.01$, без фильтрации и при использовании синтезированного режекторного фильтра, результаты приведены на рис. 8.

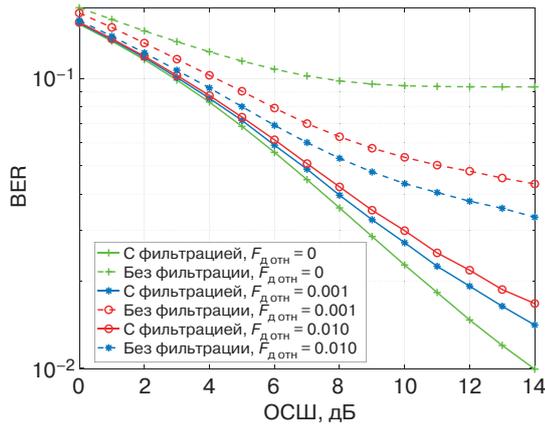


Рис. 7. Зависимость BER от ОСШ при использовании режекторного фильтра на основе анализа огибающей спектра и без фильтра при приеме сигналов 16-КАМ на фоне ЧМ-помехи с разной относительной девиацией при $\mu = 1$

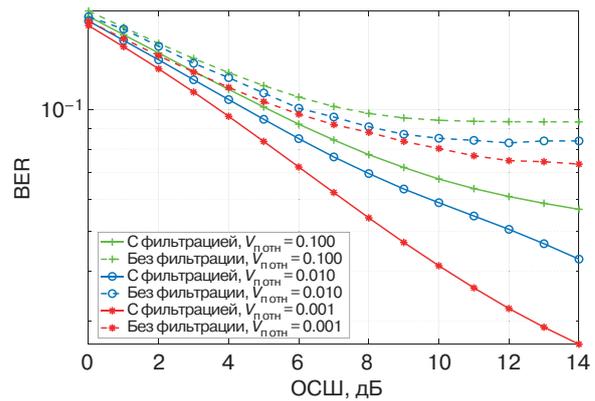


Рис. 9. Зависимость BER от ОСШ при использовании режекторного фильтра на основе анализа огибающей спектра и без фильтра при приеме сигналов 16-КАМ на фоне ФМ-помехи с разной относительной скоростью передачи

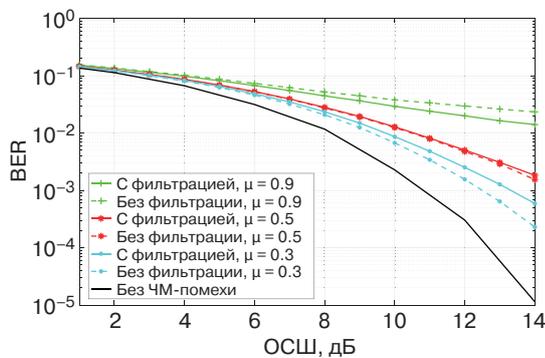


Рис. 8. Зависимость BER от ОСШ при использовании режекторного фильтра на основе анализа огибающей спектра и без фильтра при приеме сигналов 16-КАМ на фоне ЧМ-помехи с разной относительной интенсивностью μ

Анализируя график, можно сделать вывод, что использование разработанного фильтра показывает свою эффективность только при относительной интенсивности помехи $\mu > 0.9$, в остальных случаях происходит режекция полезного сигнала, тем не менее, при благоприятных условиях энергетический выигрыш составляет порядка 2–4 дБ при $BER = 10^{-2}$.

ФМ-помеха

Ширина спектра ФМ-помехи зависит от ее скорости передачи (частоты манипуляции) $V_{\text{п}}$, поэтому исследованы зависимости BER для разной скорости передачи $V_{\text{п отн}}$, нормированной к канальной скорости передачи сигнала V_c .

На рис. 9 показаны зависимости BER от ОСШ при приеме сигнала 16-КАМ на фоне ФМ-помехи с относительной амплитудой $\mu = 1$ и разной относительной скоростью передачи $V_{\text{п отн}}$ для 2 случаев: без фильтрации и при использовании разработанного адаптивного режекторного фильтра.

Анализ полученных графиков показывает, что реализованный фильтр менее эффективен в случае ФМ-помехи, чем при гармонической, но, тем не менее, он позволяет частично устранить помеху с малой относительной скоростью передачи $V_{\text{п отн}} \leq 0.01$. При большей относительной скорости передачи фильтр неэффективен.

Проведено исследование влияния ФМ-помехи с разной относительной интенсивностью μ при $V_{\text{п отн}} = 0.01$, результаты моделирования представлены на рис. 10.

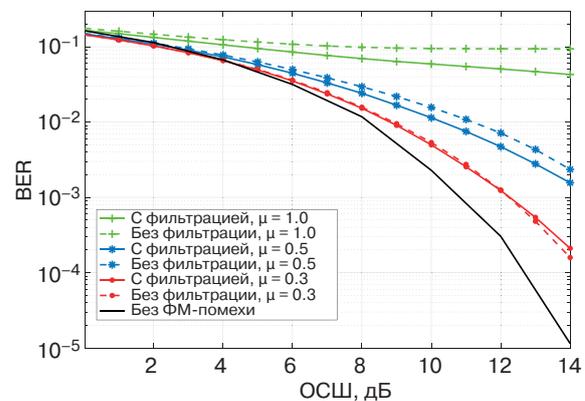


Рис. 10. Зависимость BER от ОСШ при использовании режекторного фильтра на основе детектора огибающей и без фильтра при приеме сигналов 16-КАМ на фоне ФМ-помехи с $V_{\text{п отн}} = 0.01$ и разной относительной интенсивностью μ

Видно, что разработанный фильтр так же, как в случае ЧМ-помехи, эффективен при больших значениях $\mu = 1$, обеспечивая энергетический выигрыш в несколько децибел, обеспечивает малый энергетический выигрыш при средних значениях $\mu = 0.5$ и ухудшает ситуацию при малых $\mu < 0.3$. Это связано с тем, что режекции подвергаются и компоненты

полезного сигнала, и в последнем случае это проявляется заметнее, тем не менее, для $\mu > 0.5$, имеется энергетический выигрыш порядка 2–4 дБ и $BER = 10^{-2}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный адаптивный режекторный фильтр на основе анализа огибающей спектра обладает высокой эффективностью при борьбе с гармонической помехой. Энергетический выигрыш в зависимости от относительной интенсивности помехи может составлять до 8–9 дБ. При увеличении количества помех эффективность фильтра сохраняется, хотя и несколько снижается.
2. Алгоритм режекции, изначально разработанный для борьбы с гармонической помехой, при определенных условиях работоспособен в условиях воздействия узкополосных ЧМ- и ФМ-помех.
3. При режекции ЧМ-помехи эффективность фильтра существенно зависит от девиации частоты помехи и ее интенсивности. Эффективность максимальна при узкополосной ЧМ-помехе и снижается при увеличении девиации. При малой девиации частоты $F_{д\text{отн}} = 0.01$ и большой

интенсивности помехи $\mu > 0.5$ энергетический выигрыш от использования фильтра может составлять до 2–4 дБ.

4. При режекции ФМ-помехи эффективность режекторного фильтра существенно зависит от скорости передачи помехи и ее интенсивности, снижаясь при увеличении скорости передачи помехи. Тем не менее, энергетический выигрыш от использования фильтра может составлять до 2–4 дБ при $\mu > 0.5$.
5. Эффективность разработанного режекторного фильтра выше при большой относительной интенсивности ЧМ- и ФМ-помех. При их относительной интенсивности менее 0.5 фильтрация неэффективна из-за значительной режекции полезного сигнала.
6. Некоторым ограничением применимости фильтра является требование достаточной стационарности нефлуктуационной помехи, определяемой скоростью работы итеративного алгоритма синтеза желаемой АЧХ.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Помехозащищенность приема дискретных сигналов*; под ред. Ю.И. Савватеева, О.В. Назарова. М.: Радиотехника; 2015. 584 с. ISBN 978-5-93108-094-9
2. Борисов В.И., Зинчук В.М. *Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход*. М.: РадиоСофт; 2008. 260 с. ISBN 5-93274-011-6. <https://www.elibrary.ru/catzhm>
3. Паршуткин А.В., Маслаков П.А. Помехоустойчивость каналов связи с амплитудно-фазовой модуляцией к воздействию непреднамеренных нестационарных помех. *Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму*. 2019;11–12:96–101.
4. Ложкин К.Ю., Петров А.В., Миронов В.А., Михалёв В.В., Прожеторко С.С. Аналитические зависимости средней вероятности искажения бита W-KAM-сигнала на фоне гармонической или фазоманипулированной помех с учетом замираний. *Радиотехника*. 2020;84(4–8):27–35. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202004\(8\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202004(8)-03)
5. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;11:2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
6. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В., Кузеленков П.И. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/10/text.pdf>, <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.10>
7. Куликов Г.В., Шамшура А.О., Печенин Е.А., Шаталов Е.В. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией на фоне частотно-манипулированной помехи. *Вестник Воронежского института ФСИИ России*. 2022;2:9–15.
8. Уидроу Б., Стирнз С. *Адаптивная обработка сигналов*: пер. с англ. М.: Радио и связь; 1989. 439 с. ISBN 5-256-00180-9
9. Farhang-Boroujenu B. *Adaptives Filters: Theory & Applications*. Wiley, UK; 1998. 529 p.
10. Shynk J.J. Frequency-domain and multirate adaptive filtering. *IEEE Signal Process. Mag.* 1992;9(1):14–37. <https://doi.org/10.1109/79.109205>
11. Попов Д.И. Анализ рекурсивных режекторных фильтров в переходном режиме. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;4:259–264. <https://www.elibrary.ru/guzddw>

12. Попов Д.И. Оптимизация параметров рекурсивных режекторных фильтров. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2022;2(62):26–35. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2022-2-2>, <https://www.elibrary.ru/fcnxab>
13. Куликов Г.В., Коняшкин Г.В. *Адаптивный режекторный фильтр для подавления нефлуктуационных помех*: пат. 232764 U1 РФ. Заявка № 2024135726; заявл. 28.11.2024; опубл. 19.03.2025. Бюл. № 8.
14. Friedlander B., Porat B. The Modified Yule-Walker Method of ARMA Spectral Estimation. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*. 1984;AES-20(2):158–173. <https://doi.org/10.1109/TAES.1984.310437>
15. Солоница А., Улахович Д. *Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов*. СПб.: БХВ-Петербург; 2002. 464 с.
16. Нгуен Тьен Фат. *Обработка радиотехнических сигналов на фоне помех*: Монография. Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком»; 2018. 76 с. <https://www.elibrary.ru/хоырql>

REFERENCES

1. Savvateev Yu.I., Nazarov O.V. (Eds.). *Pomekhozashchishchennost' priema diskretnykh signalov (Noise Immunity of Reception of Discrete Signals)*. Moscow: Radiotekhnika; 2015. 584 p. (in Russ.). ISBN 978-5-93108-094-9
2. Borisov V.I., Zinchuk V.M. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi. Veroyatnostno-vremennoi podkhod (Noise Immunity of Radio Communication Systems. Probabilistic-Temporal Approach)*. Moscow: RadioSoft; 2008. 260 p. ISBN 5-93274-011-6 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/catzhm>
3. Parshutkin A.V., Maslakov P.A. Noise stability of satellite communication channels with amplitude-phase modulation to exposure to urged unsteady interference. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu = Military Enginery. Counter-Terrorism Technical Divices. Issue 16*. 2019;11–12:96–101 (in Russ.).
4. Lozhkin K. Yu., Petrov A.V., Mironov V.A., Mikhalev V.V., Prozheterko S.S. Analytical dependences of bit distortion average probability M-QAM of a signal against harmonic or PSK jamming subject to fading. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2020;84(4–8):27–35 (in Russ.). [https://doi.org/10.18127/j00338486-202004\(8\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202004(8)-03)
5. Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Interference immunity of reception of signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of harmonic interference. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2018;11:2 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
6. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Batalov E.V., Kuzelenkov P.I. Noise immunity of reception of signals with quadrature amplitude modulation in the presence of interference phase-shift keying. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics* 2019;7 (in Russ.). Available from URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/10/text.pdf>, <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.10>
7. Kulikov G.V., Shamshura A.O., Pechenin E.A., Shatalov E.V. Analysis of the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation against the background of frequency-shift keyed interference. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Vestnik of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service* 2022;2:9–15 (in Russ.).
8. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive Signal Processing*. Prentice-Hall; 1985. 474 p.
[Widrow B., Stearns S.D. *Adaptivnaya obrabotka signalov (Adaptive Signal Processing)*: transl. from Engl. Moscow: Radio i svyaz'; 1989. 439 p. (in Russ.). ISBN 5-256-00180-9]
9. Farhang-Boroujeny B. *Adaptives Filters: Theory & Applications*. Wiley, UK; 1998. 529 p.
10. Shynk J.J. Frequency-domain and multirate adaptive filtering. *IEEE Signal Process. Mag.* 1992;9(1):14–37. <https://doi.org/10.1109/79.109205>
11. Popov D.I. Analysis of recursive rejection filters in transient mode. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2023;4:259–264. <https://www.elibrary.ru/guzddw>
12. Popov D.I. Optimization the parameters of recursive notch filters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki = University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*. 2022;2(62):26–35. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2022-2-2>, <https://www.elibrary.ru/fcnxab>
13. Kulikov G.V., Konyashkin G.V. *Adaptive Notch Filter for Non-Fluctuation Interference Suppression*: RF Pat. 232764 U1. Publ. 19.03.2025.
14. Friedlander B., Porat B. The Modified Yule-Walker Method of ARMA Spectral Estimation. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*. 1984;AES-20(2):158–173. <https://doi.org/10.1109/TAES.1984.310437>
15. Solonina A., Ulakhovich D. *Algoritmy i protsessory tsifrovoi obrabotki signalov (Algorithms and Processors of Digital Signal Processing)*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2002. 464 p. (in Russ.).
16. Nguyen Tien Phat. *Obrabotka radiotekhnicheskikh signalov na fone pomekh (Processing of Radio Signals Against the Background of Interference)*. Monograph. Le Kui Don Vietnam State Technical University. Tambov: Konsaltingovaya kompaniya Yukom; 2018. 76 p. (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/хоырql>

Об авторах

Коняшкин Георгий Викторович, ассистент, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: konyashkin@mirea.ru. Scopus Author ID 58894490900, SPIN-код РИНЦ 9101-3255, <https://orcid.org/0009-0003-1669-6604>

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, SPIN-код РИНЦ 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

About the Authors

Georgy V. Konyashkin, Assistant, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: konyashkin@mirea.ru. Scopus Author ID 58894490900, RSCI SPIN-code 9101-3255, <https://orcid.org/0009-0003-1669-6604>

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, RSCI SPIN-code 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.969

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-75-86>

EDN RTWBZR



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

К вопросу выбора критериев качества алгоритмов планирования наблюдений за космическими аппаратами

А.В. Ксендзук ^{1, @},
И.А. Кузнецов ²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел», Москва, 125480 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ks_alex@mail.ru

• Поступила: 25.02.2025 • Доработана: 31.03.2025 • Принята к опубликованию: 25.07.2025

Резюме

Цели. Одна из важнейших задач мониторинга космического пространства – это планирование наблюдений за космическими аппаратами. От того, насколько хорошо составлен план наблюдений, зависят качество и объем получаемой информации. В настоящее время существует множество различных методов планирования наблюдений за космическими аппаратами, однако единые критерии, которые позволяют сравнить различные алгоритмы планирования, отсутствуют. Цель работы – на основе физических принципов наблюдения радиолокационными, радиотехническими и оптическими средствами мониторинга разработать критерии качества планирования, определить их основные параметры аналитически и проверить численно.

Методы. Предложенные критерии качества – детерминированные, ограниченные по энергии мощностью сигнала и временем наблюдения. Аналитически определены предельные значения критериев качества для фиксированного времени наблюдения. В вычислительном эксперименте для 4 алгоритмов планирования получены значения критериев качества.

Результаты. Для сравнения различных алгоритмов планирования наблюдений, учитывающих приоритет космического аппарата и общее времени его наблюдения, предложен критерий качества «вес – время наблюдения». Для учета структуры общего времени наблюдения введен критерий «вес – структура наблюдения». Аналитически показано, что значения критериев ограничены, а также различаются для разных методов планирования. Выполнен численный эксперимент, который подтвердил характер изменения критериев для различных методов планирования и параметров, входящих в критерии.

Выводы. Предложенные критерии качества планирования наблюдений основаны на физических принципах наблюдения радиотехническими и оптическими средствами и позволяют численно сравнить результаты планирования наблюдений за космическими аппаратами с учетом приоритетности наблюдения, времени наблюдения и его структуры. Вычислительный эксперимент подтвердил возможность применения предложенных критериев «вес – время наблюдения» и «вес – структура наблюдения» для сравнения различных алгоритмов планирования. Предложенные критерии целесообразно использовать для оптимизации алгоритмов планирования или их численного сравнения для различных условий наблюдения за космическими аппаратами.

Ключевые слова: планирование наблюдений, критерий качества, космический аппарат, мониторинг космических аппаратов, конфликтное наблюдение

Для цитирования: Ксэндзук А.В., Кузнецов И.А. К вопросу выбора критериев качества алгоритмов планирования наблюдений за космическими аппаратами. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):75–86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-75-86>, <https://www.elibrary.ru/RTWBZR>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Optimization criterion for spacecraft observation planning algorithms

Alexander V. Ksendzuk ^{1, @},
Ivan A. Kuznetsov ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² MAK Vympel, Moscow, 125480 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ks_alex@mail.ru

• Submitted: 25.02.2025 • Revised: 31.03.2025 • Accepted: 25.07.2025

Abstract

Objectives. One of the critical tasks of space monitoring is the planning of observations due to the quality and amount of information obtained depending on how well the observation plan is developed. However, the selection of a method for planning spacecraft observations is hampered by a lack of unified criteria for comparing different planning algorithms. Therefore, the work sets out to develop planning quality criteria on the basis of physical observation principles based on radar, radiotechnical, and optical monitoring approaches in order to analytically determine their main parameters and check these parameters numerically.

Methods. The proposed quality criteria are deterministic, limited in energy by signal strength and observation time. The limiting values of the quality criteria for fixed observation time are analytically determined. In order to obtain the values of the quality criteria for four scheduling algorithms, a computational experiment is carried out.

Results. The proposed “weight–observation time” quality criterion is used to compare different observation planning algorithms that take into account spacecraft priority and total observation time. In order to account for the structure of the total observation time, the “weight–observation structure” criterion is introduced. It is analytically confirmed that the limited criteria values differ for different scheduling methods. The conducted numerical experiment is used to confirm the nature of the change of criteria for different planning methods and parameters included in the criteria.

Conclusions. The proposed observation planning quality criteria, which are based on the physical observation principles by radiotechnical and optical means, are used to numerically compare the results of spacecraft observation planning to take into account the priority of observation, as well as observation time and structure (how many and how long are the intervals into which the total observation time is divided). The possibility of using the proposed “weight–observation time” and “weight–observation structure” criteria to compare different planning algorithms is confirmed by computational experiment. Therefore, it is reasonable to use the proposed criteria for optimization of scheduling algorithms or their numerical comparison for different satellite observation conditions.

Keywords: observation planning, quality criterion, spacecraft, spacecraft monitoring, conflict observation

For citation: Ksendzук A.V., Kuznetsov I.A. Optimization criterion for spacecraft observation planning algorithms. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):75–86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-75-86>, <https://www.elibrary.ru/RTWBZR>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается значительный рост числа космических аппаратов (КА) и космического мусора при относительно медленном росте количества и качества оптических, радиолокационных и радиотехнических средств мониторинга околоземного космического пространства¹ [1]. В этих условиях особую важность приобретает задача планирования наблюдений средствами мониторинга. Актуальность данной проблемы подтверждают работы [2–8], в которых авторы предлагают различные алгоритмы для планирования наблюдений, в т.ч. за астрономическими объектами [9, 10].

В [2] для оценки эффективности алгоритма планирования, влияние каждого фактора (погодные условия, уровень рассеивания частиц и др.) на итоговый результат распределяется в процентном соотношении, исходя из влияния каждого фактора на качество решения задачи. Каждый параметр оценивается в диапазоне от 1 до 10 баллов, затем значение параметра умножается на соответствующий ему процент важности, и все взвешенные оценки суммируются.

В [3] для планирования наблюдений строят карты эффективности обнаружения КА, используя результирующий коэффициент эффективности, который рассчитывается как произведение критериев (коэффициент экстинкции, угловая скорость и др.), со своим весовым коэффициентом.

В [4] при выборе КА, за которым будет осуществляться наблюдение, используется след ковариационной матрицы, описывающий среднее изменение вклада в измерения. След может быть связан с параметрами информативности, например, изменением дифференциальной энтропии.

В [5] анализируется эффективность методов «жадной» оптимизации, которые не требуют значительных вычислительных и математических ресурсов. В качестве критерия используется функция стоимости на основе потенциальных наблюдений и того, насколько наблюдения соответствуют поставленной цели, при этом численные и аналитические формулы для вычисления «соответствия» не приводятся.

В [6] оптимизация проводится по времени наблюдения за объектом с учетом времени переключения наблюдения с предыдущего объекта. Таким образом, глобальная оптимизация максимизирует общее время наблюдения КА, при этом приоритет наблюдения КА не учитывается.

В [7] в качестве критерия используется среднее время наблюдения спутников за вычетом отклонения времени наблюдения каждого спутника относительно среднего значения, умноженного на коэффициент Лагранжа. Критерий принимает максимальное значение, когда все спутники наблюдаются одинаковое время.

Таким образом, несмотря на наличие большого количества методов, алгоритмов и программного обеспечения для планирования, отсутствуют общепринятые критерии качества, которые позволяют сравнить эти методы. Следовательно, разработка физически обоснованных критериев является актуальной задачей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ

При планировании наблюдений за КА одной из основных задач является разрешение конфликтов в случае, когда число (пропускная способность) каналов наблюдения меньше числа одновременно видимых КА, т.е. необходимость выбора, за какими КА необходимо наблюдать [11]. Под видимостью КА понимается возможность его наблюдения в пространстве (геометрическая видимость), по энергетическим параметрам (радиолокационная и радиотехническая видимость) и в частотной области (для радиотехнических средств частота сигнала КА должна находиться в пределах диапазона рабочих частот).

Если бы конфликты отсутствовали, задача по формированию плана наблюдений сводилась бы к последовательному слежению за видимыми КА и, при необходимости экономии ресурса наблюдательных средств, прекращению наблюдений при формировании требуемого объема информации.

В реальных условиях наблюдения присутствует множество конфликтов (видимость нескольких КА одновременно), по каждому из которых необходимо принимать решение, за каким из КА надо наблюдать. Различные методы решения конфликтов приводят к формированию различных планов наблюдения.

¹ <https://www.space-track.org/>. Дата обращения 20.01.2025. / Accessed January 20, 2025.

Исходными данными для планирования являются: матрица видимости КА, приоритетность КА и время, достаточное для получения информации требуемого качества. Для удобства планирования время полагаем дискретным.

В матрице видимости $V(i, t)$ строка i соответствует номеру КА, столбец t – времени, каждая ячейка $V_{i, t}$ показывает видимость КА средством мониторинга. В простейшем случае значения в матрице принимают значения 0 и 1 (видимость исходя из геометрических соотношений). В более сложном варианте в ячейках записана величина, связанная с качеством наблюдения, например, отношение сигнал/шум по мощности или вероятность наблюдения КА. Сумма строк в пределах столбца показывает, сколько КА видны (могут наблюдаться) одновременно.

Вектор приоритетности (весов) КА для каждого спутника определяет вес w_i – целое положительное число, показывающее важность наблюдения КА (чем больше значение, тем выше приоритет и ценность наблюдения за этим КА).

Вектор достаточного (непрерывного) времени наблюдения для каждого i -го КА определяет (непрерывный) интервал времени $T_{suf\ i}$, достаточный для получения необходимого объема информации/качества оценок параметров. Требование непрерывности интервала основано на принципах оценки постоянных на интервале наблюдения параметров. Если это требование необязательно, то $T_{suf\ i}$ может быть полным временем наблюдения. В случае, когда в матрице наблюдения используется отношение сигнал/шум по мощности, $T_{suf\ i}$ определяет энергетическое отношение сигнал/шум, от которого зависит качество оценок [12].

Результат планирования – **матрица наблюдения** $O(i, t)$, размерность которой совпадает с размерностью матрицы видимости. Для каждой i -й строки (номера КА) в момент времени t в ячейке $O_{i, t}$ может быть значение 1 (i -й КА в этот момент времени будет

наблюдаться средством мониторинга) или 0 (КА не будет наблюдаться). В один момент времени t (столбец матрицы) число аппаратов, за которыми ведется наблюдение, должно быть равно числу каналов наблюдательного средства.

Пример, показывающий вид исходных данных для планирования и результата планирования, показан на рис. 1.

2. ЧИСЛЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАБЛЮДЕНИЯ

Численные параметры, которые используются для расчета критерия качества и анализа матриц наблюдения и видимости:

$t = 1 \dots T_{plan}$, T_{plan} – интервал планирования (промежуток времени, для которого составляется план наблюдений, обычно – сутки).

$i = 1 \dots I_{max}$ – количество видимых КА на интервале планирования T_{plan} .

$T_{vis\ i}$ – время видимости i -го КА, представляет собой сумму его свободного (бесконфликтного) $T_{vis.free\ i}$ и конфликтного $T_{vis.conf\ i}$ времени видимости $T_{vis\ i} = T_{vis.free\ i} + T_{vis.conf\ i} = \sum_{t=1}^{T_{plan}} V_{i, t}$. Время видимости показывает потенциальные возможности по наблюдению КА.

$I_{obs} \leq I_{max}$ – количество наблюдаемых КА на интервале планирования T_{plan} .

$T_{obs\ i}$ – время наблюдения за i -м КА, представляет собой сумму времени бесконфликтного $T_{obs.free\ i}$ и конфликтного $T_{obs.conf\ i}$ времени наблюдения. Эти величины показывают реализацию конкретного плана наблюдения, причем $T_{obs\ i} \leq T_{vis\ i}$.

w_i – приоритет (вес) КА, который показывает ценность (вклад) его наблюдения. Приоритет задается целым числом, лежащим в заданном диапазоне $\{w \in \mathbb{N} \mid 1 \leq w_i \leq w_{max}\}$; чем оно больше, тем выше приоритет КА (в большинстве реальных задач

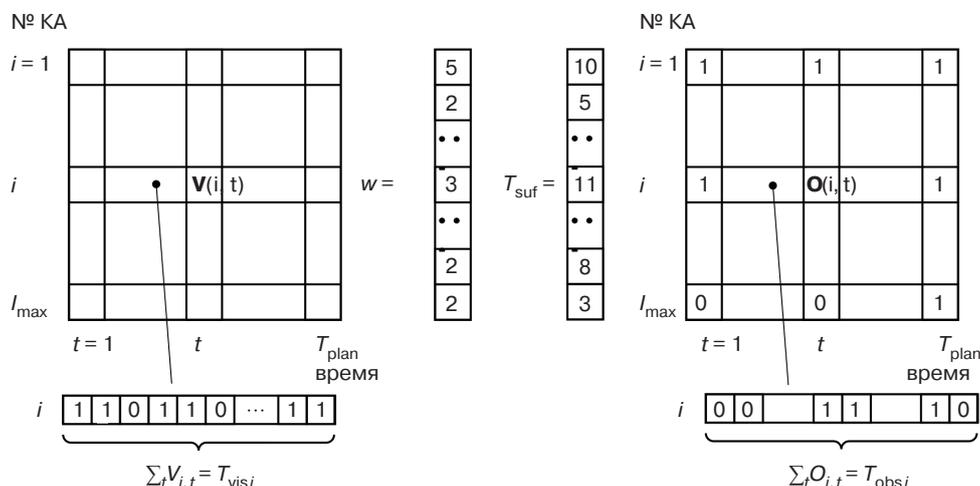


Рис. 1. Вид основных матриц и векторов при планировании наблюдений

достаточно задавать значения w_i от 1 до 5, этот диапазон используется в численных расчетах в данной работе).

$T_{\text{suf } i}$ – достаточное (непрерывное) время наблюдения КА. Определяется для каждого КА в зависимости от задачи наблюдения (обнаружение сигнала, оценка параметров сигнала, оценка параметров передаваемого потока информации и пр.), известных, прогнозируемых или рассчитанных статистических характеристик наблюдения (отношение сигнал/шум, вероятность наблюдения спутника). Наблюдение КА в течение (непрерывного) интервала времени $T_{\text{suf } i}$ обеспечивает с требуемой вероятностью необходимое качество оценки его параметров. Наблюдение на меньшем интервале времени не позволяет получить требуемое качество. Наблюдение на большем интервале избыточно.

$T_{\text{vis.s}}$ – общее (суммарное) время видимости (может наблюдаться хотя бы один из $i = 1 \dots I_{\text{max}}$ КА), определяется по матрице видимости $\mathbf{V}(i, t)$:

$$T_{\text{vis.s}} = \sum_{t=1 \dots T} T_{\text{vis.s } t} = \sum_{t=1 \dots T} \text{sign} \left[\sum_{i=1 \dots I_{\text{max}}} V_{i,t} \right]. \quad (1)$$

N_t – количество одновременно видимых КА в момент времени t :

$$N_t = \left[\sum_{i=1 \dots I_{\text{max}}} V_{i,t} \right]. \quad (2)$$

$T_{\text{obs.s}}$ – общее время наблюдения (хотя бы одного из $i = 1 \dots I_{\text{max}}$ КА), определяется по матрице наблюдения $\mathbf{O}(i, t)$:

$$T_{\text{obs.s}} = \sum_{t=1 \dots T} T_{\text{obs.s } t} = \sum_{t=1 \dots T} \text{sign} \left[\sum_i O_{i,t} \right]. \quad (3)$$

Анализ матрицы видимости $\mathbf{V}(i, t)$ позволяет интегрально определить время свободного и конфликтного наблюдения. Анализ соответствующей ей матрицы наблюдения $\mathbf{O}(i, t)$ позволяет определить, как метод планирования перераспределяет это время между КА. В качестве примера на рис. 2 показан результат планирования наблюдений однокабельным средством группировки КА при наличии бесконфликтного и конфликтного наблюдения.

Из показанной на рис. 2 матрицы наблюдений видно, что время свободного наблюдения для всех КА сохранилось. **Время свободного наблюдения** сохраняется, если только не используется **ресурсное ограничение времени наблюдения** $T_{\text{obs.s}} \leq T_{\text{res}}$, $t = 1 \dots T_{\text{plan}}$ для продления срока службы средств мониторинга или для использования части времени в других целях, например, для анализа окружающей обстановки (помеховых излучений – радиотехническими и радиолокационными средствами, астроклимата – оптическими средствами мониторинга). При отсутствии таких ограничений сохранение времени

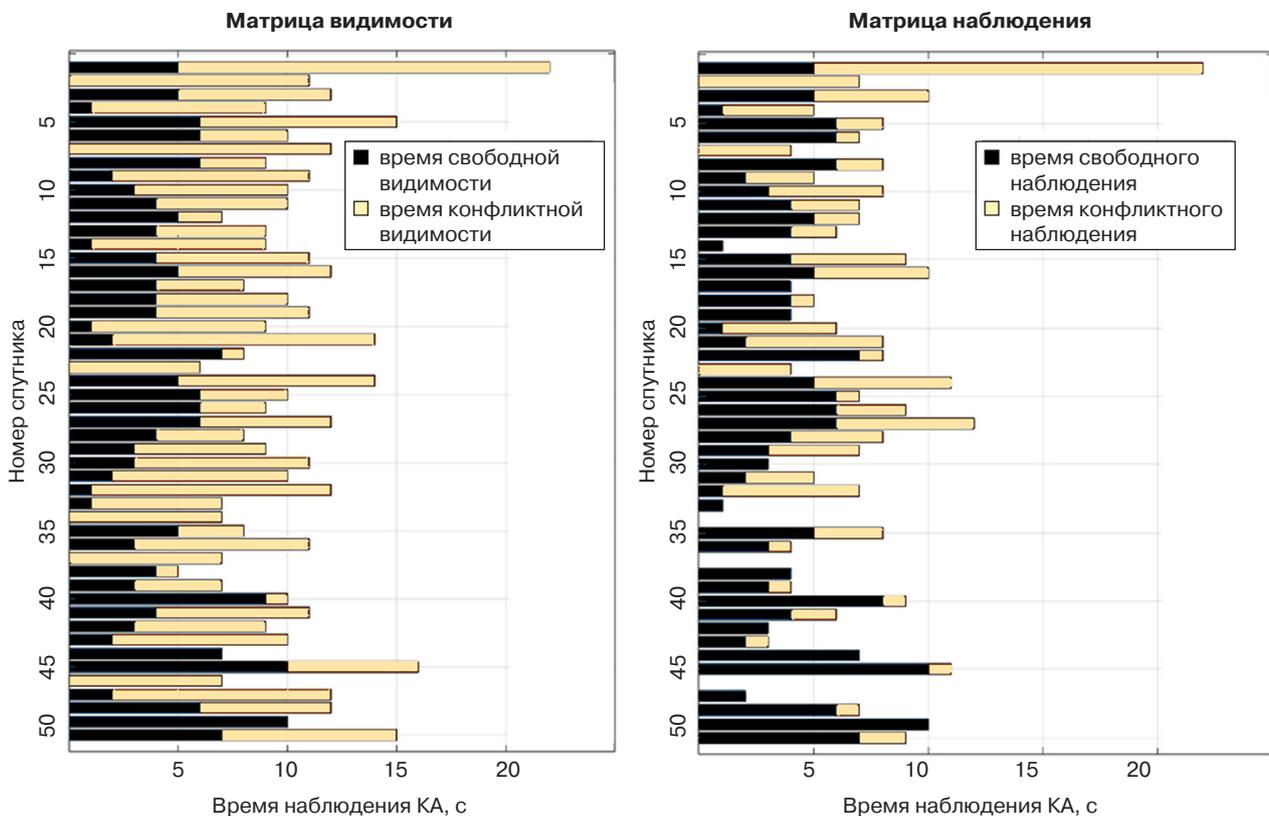


Рис. 2. Пример матрицы видимости (слева) и плана наблюдений (справа)

свободного (бесконфликтного) наблюдения – это один из методов проверки корректности алгоритма планирования $T_{vis, free\ i} = T_{obs, free\ i}$

Время конфликтного наблюдения перераспределяется между КА в соответствии с используемым методом планирования (вплоть до простейшего метода – прекращения наблюдений в случае конфликта). В рассматриваемом на рис. 2 примере приоритет отдается КА в начале списка (используется все возможное время конфликтного наблюдения), для остальных – время перераспределяется.

Общее время наблюдения при отсутствии ресурсного ограничения должно совпадать с общим временем видимости $T_{vis, s} = T_{obs, s}$, что необходимо использовать для проверки корректности алгоритма планирования.

3. КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Для сравнения различных методов планирования необходимо ввести численный показатель, основанный на численных, измеряемых параметрах плана наблюдений [13]. Так как в рассматриваемом случае видимость и результат планирования являются детерминированными функциями, качество планирования будем определять без использования вероятностных показателей. Однако учесть вероятностные параметры в рамках предлагаемого подхода несложно – достаточно в качестве значений элементов в ячейках поставить вероятности наблюдения КА, предварительно рассчитанные, либо определенные исходя из статистических данных [14].

3.1. Критерий «вес – время наблюдения»

Первый предлагаемый в работе критерий качества планирования введем с использованием приоритета КА и общего времени его наблюдения (без учета, на какое количество интервалов он разбит). Этот вариант можно использовать для случая, когда одного дискретного интервала во времени достаточно для оценки параметров КА с требуемым качеством. Критерий «вес – время наблюдения» зададим суммой вкладов от наблюдения отдельных КА Q_{wt_i} :

$$Q_{wt} = \frac{1}{I_{\max}} \sum_{i=1}^{I_{\max}} Q_{wt_i} = \frac{1}{I_{\max}} \sum_{i=1}^{I_{\max}} (a_i)^n \ln \left(\frac{T_{obs\ i}}{T_{suf\ i}} + 1 \right), \quad (4)$$

где

- $a_i = w_i / w_{\max}$ – относительный приоритет i -го КА, принимает значения в интервале (0; 1];
- w_i – приоритет i -го КА;
- w_{\max} – максимальный приоритет наблюдения из множества видимых КА;

- n – показатель степени относительного приоритета, позволяет варьировать вклад w_i ; $n = 1$ – линейная зависимость от приоритета КА, $n = 0$ – приоритет КА не учитывается;
- I_{\max} – количество видимых КА;
- $T_{obs\ i}$ – время наблюдения i -го КА, полученное в результате планирования;
- $T_{suf\ i}$ – время, достаточное для получения информации / оценок параметров необходимого качества для i -го КА.

Предложенный критерий «вес – время наблюдения» обладает следующими свойствами:

1. Если i -й КА не наблюдается (т.е. $T_{obs\ i} = 0$) на интервале планирования T_{plan} , но входит в множество видимых спутников I_{\max} , вклад от данного КА равен нулю:

$$Q_{wt_i} |_{T_{obs\ i}=0} = \left(\frac{w_i}{w_{\max}} \right)^n \ln(1) = 0. \quad (5)$$

2. Если время наблюдения i -го КА равняется достаточному ($T_{obs\ i} = T_{suf\ i}$), вклад от его наблюдения будет зависеть от приоритета КА:

$$Q_{wt_i} \approx 0.69 \left(\frac{w_i}{w_{\max}} \right)^n, \quad (6)$$

и для КА с максимальным приоритетом вклад будет равен 0.69. Такое же значение Q_{wt_i} будет для спутника с любым приоритетом при $n = 0$ и наблюдении в течение достаточного времени ($T_{obs\ i} = T_{suf\ i}$).

3. Вклад от наблюдения i -го КА имеет максимальное (ограниченное сверху) значение, когда время наблюдения за КА стремится к времени его видимости $T_{obs\ i} \rightarrow T_{vis\ i}$. Предел для постоянно видимых КА равен времени планирования $T_{obs\ i} \rightarrow T_{plan}$:

$$\max(Q_{wt_i}) = \left(\frac{w_i}{w_{\max}} \right)^n \ln \left(\frac{T_{vis\ i}}{T_{suf\ i}} + 1 \right). \quad (7)$$

Для КА с максимальным приоритетом (или для любого КА при отсутствии учета приоритета наблюдения, $n = 0$) $\max(Q_{wt_i}) = \ln \left(\frac{T_{vis\ i}}{T_{suf\ i}} + 1 \right)$.

График вклада наблюдения КА Q_{wt_i} как функция времени наблюдения $T_{obs\ i}$ относительно достаточного времени наблюдения $T_{suf\ i}$ при различном приоритете ($w_i = 1 \dots 5$) и степени его учета $n = 0, 0.5, 1, 2$ приведен на рис. 3.

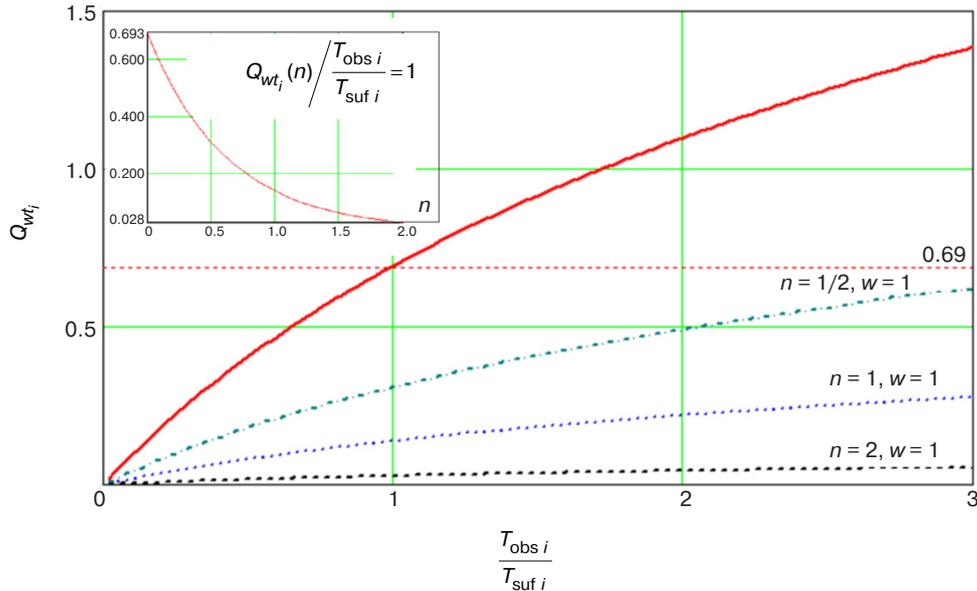


Рис. 3. Значение показателя качества Q_{wt_i} при наблюдении спутника в зависимости от параметров (n, w) и значение $Q_{wt_i}(n; w = 1)$ при $T_{obs\ i} / T_{suf\ i} = 1$

Анализ результатов численного расчета предложенного критерия «вес – время наблюдения» подтверждает приведенные выше свойства:

- Q_{wt_i} монотонно возрастает при увеличении времени наблюдения;
- при малом времени наблюдения относительно достаточного $T_{obs\ i} / T_{suf\ i} \rightarrow 0$ критерий «вес – время наблюдения» $Q_{wt_i} \rightarrow 0$;
- для КА с максимальным приоритетом $w_i = 5$ вклад, в зависимости от относительного времени наблюдения $T_{obs\ i} / T_{suf\ i}$, растет логарифмически, принимая в точке, где время наблюдения i -го КА равняется достаточному $T_{obs\ i} = T_{suf\ i}$, значение 0.69. Величина n не влияет на положение этого графика, т.к. $(a_i)^n = \left(\frac{w_{max}}{w_{max}}\right)^n = 1$;

- для КА с минимальным приоритетом ($w_i = 1, w_{max} = 5$) вклад при том же относительном времени наблюдения $T_{obs\ i} / T_{suf\ i}$ меньше и определяется степенью n , учитывающей вес приоритета КА: чем больше n , тем меньше вклад от наблюдения КА с низким приоритетом. В рассматриваемом примере в точке $T_{obs\ i} = T_{suf\ i}$ для $n = [0 \dots 2]$, $Q_{wt_i} = [0.69 \dots 0.028]$, график показан на вставке рис. 3.

3.2. Критерий «вес – структура наблюдения»

Для КА, параметры сигналов которых могут меняться с течением времени, большую ценность представляют непрерывные длительные интервалы

наблюдения (например, определить линейно изменяющуюся во времени частоту можно точнее по одному продолжительному временному интервалу, а не по совокупности коротких).

Для того, чтобы учесть структуру времени наблюдения, т.е. на сколько интервалов и какой длительности разбито общее время наблюдения КА $T_{obs\ i}$, предлагается ввести эквивалентное время наблюдения $T_{obs.eq\ i}$, которое вычисляется по формуле:

$$T_{obs.eq\ i} = \frac{\sum_{k=1}^{K_i} (T_{obs\ i_k})^2}{T_{obs\ i}}, \quad (8)$$

где K_i – число несмежных интервалов наблюдения i -го КА за период T_{plan} ; k – номер участка наблюдения i -го КА; $T_{obs\ i_k}$ – время наблюдения на k -м участке.

На рис. 4 показана зависимость значения эквивалентного времени наблюдения произвольного КА $T_{obs.eq}$ от величины непрерывного интервала его наблюдения $T_{obs\ k}$, приведенная к значению относительно полного времени наблюдения этого КА T_{obs} .

Свойства эквивалентного времени наблюдения, следующие из выражения (8) и подтверждающиеся графиком на рис. 5:

1. Для одного интервала наблюдения за КА ($K = 1$) эквивалентное время наблюдения равно самому времени наблюдения $T_{obs\ i}$:

$$T_{obs.eq\ i} = \frac{(T_{obs\ i_k})^2}{T_{obs\ i}} = T_{obs\ i}, \quad (9)$$

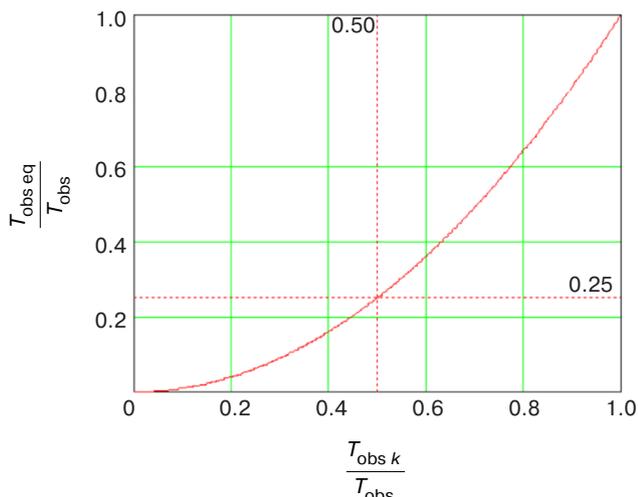


Рис. 4. Зависимость значений $T_{\text{obs eq}}$ от интервала наблюдения $T_{\text{obs } k}$ при нормировке на общее время наблюдения спутника T_{obs}

- При большом количестве временных интервалов наблюдения ($K_i \gg 1$) и одном «длинном» интервале $T_{\text{obs } i_k} \gg T_{\text{obs } i_j}$ эквивалентное время наблюдения КА определяется максимальным по длительности участком $\max(T_{\text{obs } i_k})$.
- При большом количестве участков $K_i \rightarrow \infty$ с одинаковым малым временем наблюдения $T_{\text{obs } i_k}$ эквивалентное время наблюдения стремится к нулю:

$$T_{\text{obs.eq } i} = \frac{\sum_{k=1}^{K_i \rightarrow \infty} (T_{\text{obs } i_k})^2}{T_{\text{obs } i}} \rightarrow 0. \quad (10)$$

Второй предлагаемый в работе критерий качества планирования «вес – структура наблюдения» использует в (4) вместо полного времени наблюдения i -го КА $T_{\text{obs } i}$ его эквивалентное время наблюдения $T_{\text{obs.eq } i}$:

$$\begin{aligned} Q_{ws} &= \frac{1}{I_{\text{max}}} \sum_{i=1}^{I_{\text{max}}} Q_{ws_i} = \frac{1}{I_{\text{max}}} \sum_{i=1}^{I_{\text{max}}} (a_i)^n \ln \left(\frac{T_{\text{obs.eq } i}}{T_{\text{suf } i}} + 1 \right) = \\ &= \frac{1}{I_{\text{max}}} \sum_{i=1}^{I_{\text{max}}} \left(\frac{w_i}{w_{\text{max}}} \right)^n \ln \left(\frac{\sum_{k=1}^K (T_{\text{obs } i_k})^2}{T_{\text{obs } i} T_{\text{suf } i}} + 1 \right), \quad (11) \end{aligned}$$

где учитывается относительный приоритет i -го КА $a_i^n = (w_i / w_{\text{max}})^n$ и отношение эквивалентного времени наблюдения i -го КА $T_{\text{obs.eq } i}$ к достаточному для получения оценок требуемого качества непрерывному интервалу $T_{\text{suf } i}$.

Критерий «вес – структура наблюдения» Q_{ws} обладает такими же свойствами, как и критерий «вес – время наблюдения» Q_{wt} с точностью до того, что время наблюдения необходимо заменить эквивалентным.

4. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ПЛАНИРОВАНИЯ

Для того чтобы оценить возможность применения предложенных критериев качества, используем несколько алгоритмов планирования, которые существенно различаются и для которых можно логически предсказать поведение предложенных критериев Q_{wt} (4) и Q_{ws} (11). Для этих алгоритмов планирования используем одну и ту же матрицу видимости, для которой рассчитаем матрицу наблюдения и предложенные критерии качества. Результаты поведения критериев, соответствие их логическим предположениям и достаточный численный разброс для различных алгоритмов планирования подтвердят возможность применения предложенных критериев качества.

Алгоритм 1 («первый по списку»)

В случае конфликтного наблюдения осуществляется безусловный переход к наблюдению за КА, который находится первым в списке. Очевидно, что такой алгоритм даст малое время (непрерывного) наблюдения за КА в конце списка. Если там расположены КА с высоким приоритетом, качество планирования по критерию Q_{wt} будет низким. Величина критерия будет существенно зависеть от того, КА с каким приоритетом расположены первыми в списке.

Для того, чтобы такой простой и нетребовательный к вычислительным ресурсам алгоритм планирования имел практический смысл, необходимо составлять список КА, помещая наиболее приоритетные с минимальным общим временем наблюдения вверх по списку.

Алгоритм 2 («безынерционный переход на приоритетный спутник»)

В случае конфликтного наблюдения (коллизии) осуществляется безусловный переход к наблюдению за КА, который имеет больший приоритет независимо от времени его наблюдения. Фактически, это «жадный» алгоритм, который максимизирует критерий качества на каждом шаге [15]. Очевидно, что такой алгоритм даст большее (по сравнению с алгоритмом 1) качество наблюдения для критерия (4) Q_{wt} «вес – время наблюдения»; для критерия Q_{ws}

вклад КА с меньшим приоритетом будет низким, т.к. при конфликтном наблюдении будут наблюдаться КА с высоким приоритетом. При одинаковом приоритете всех КА критерий Q_{ws} (11) «вес – непрерывное время наблюдения» будет таким же, как и для алгоритма 1.

Алгоритм 3 («инерционный переход на спутник с большим весом»)

Модификация алгоритма 2 учитывает время наблюдения i -го КА путем расчета коэффициента, равного отношению приоритета КА к времени, которое он уже наблюдался ($w_i/T_{obs\ i}$). В отличие от алгоритма 2, переход к наблюдению за новым, более приоритетным j -м КА, может не произойти, если время $T_{obs\ j} \gg T_{obs\ i}$. То есть формируется «инерция» наблюдения за КА, которая уменьшается при увеличении времени его наблюдения. Такой критерий должен привести к уменьшению коротких интервалов наблюдения за счет инерционности и к увеличению критерия качества (6) по сравнению с алгоритмами 1 и 2.

Алгоритм 4 («выравнивание времени наблюдения»)

В этом случае прекращается слежение за КА, если время его наблюдения превышает аналогичный параметр другого спутника. Алгоритм старается «выровнять» время наблюдения всех КА.

Для определения максимальных достижимых на матрице видимости показателей целесообразно использовать метод полного перебора по всем возможным вариантам решения задачи планирования. Однако для реальных условий (план на сутки, более

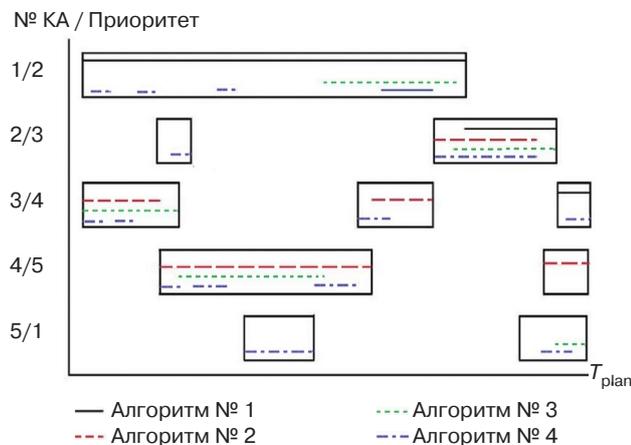


Рис. 5. Пример работы алгоритмов 1–4 на интервале планирования T_{plan} для 5 КА с заданным временем видимости и различным приоритетом наблюдаемости a_i

10000 пролетов КА) решение может быть получено только с применением квантовых вычислений [16]. Ограничение перечня спутников до наблюдаемых радиотехническими средствами РТУ МИРЭА [17], позволяет найти такое решение.

Иллюстрация принципа работы алгоритмов 1–4, для которых рассчитывается критерий качества планирования, показана на рис. 5.

В таблице приведены результаты расчета по предложенным критериям качества. В качестве исходных данных была сгенерирована матрица видимости КА, состоящая из 50 КА на дискретный интервал планирования $T_{plan} = 500$. Для столбцов таблицы курсивом выделены минимальные значения критериев качества, жирным – максимальные.

Таблица. Результаты численного моделирования

Название алгоритма	Q_{wt}		Q_{ws}	
	<i>n</i> = 0	<i>n</i> = 1	<i>n</i> = 0	<i>n</i> = 1
Алгоритм 1	0.382	0.255	0.219	0.148
Алгоритм 2	0.576	0.404	0.321	0.210
Алгоритм 3	0.618	0.530	0.370	0.295
Алгоритм 4	0.480	0.309	0.258	0.189

Результаты численного моделирования, подтверждают аналитические выводы и логические предположения:

- критерии Q_{wt} и Q_{ws} принимают максимальные значения для алгоритма 3 как при учете $n = 1$, так и без учета $n = 0$ приоритета КА, т.к. по своему принципу он обладает инерционностью, приводящей к формированию более длительных участков наблюдения, что подтверждается рис. 5;
- критерии Q_{wt} и Q_{ws} принимают минимальные значения для алгоритма 1 как при учете $n = 1$, так и без учета $n = 0$ приоритета КА, т.к. он позволяет наблюдать за спутниками в начале списка без учета их приоритета (в рассматриваемом случае он низкий), что подтверждается рис. 5;
- отношение минимального и максимального значения критериев Q_{wt} составляет 2.078 при учете приоритета КА $n = 1$ и 1.617 без учета приоритета $n = 0$, соответственно. Следовательно, учет приоритета увеличивает различие максимального и минимального значений критерия «вес – время наблюдения»;
- отношение минимального и максимального значения критериев Q_{ws} составляет 1.993 при учете приоритета КА и 1.689 без учета приоритета. Аналогично критерию Q_{wt} , учет приоритета увеличивает различие максимального и минимального значений критерия «вес – структура наблюдения».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В объективных условиях динамики вывода спутников на орбиту по отношению к увеличению количества и возможностей средств их мониторинга особенную важность приобретает задача планирования наблюдений. Для сравнения различных методов планирования наблюдений за КА в работе предложены 2 критерия качества: «вес – время наблюдения» и «вес – структура наблюдения». Критерии основаны на формировании величины, связанной с энергетическим отношением сигнал/шум, определяющей качество оценок параметров, учитывают приоритет спутников, а также структуру общего времени наблюдения (количество интервалов).

Для проверки используются 4 алгоритма планирования, которые дают предсказуемый результат относительного качества планирования по введенным критериям. Численные расчеты критериев качества подтвердили сделанные теоретически

предположения. Для одних и тех же условий наблюдения КА критерии качества плана, полученного 4 различными алгоритмами планирования, различаются более чем в 1.5 раза.

Дальнейшим развитием критериев является их конкретизация, например, для радиотехнических средств мониторинга, имеющихся в «Космоцентре» РТУ МИРЭА синтез оптимальных методов планирования наблюдений и их экспериментальное подтверждение.

Вклад авторов

А.В. Ксэндзук – постановка задачи; разработка критериев, основных соотношений и выводов.

И.А. Кузнецов – разработка программного обеспечения для проверки расчетов, анализ результатов моделирования.

Authors' contributions

A.V. Ksendzук – formulating the problem; developing the criteria, key relationships, and conclusions.

I.A. Kuznetsov – developing the software for verification of calculations; analysis of simulation results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu J., Yang X., Cheng H., et al. Progress of China's Space Debris Research. *Chinese J. Space Sci.* 2022;42(4):824–829. <https://doi.org/10.11728/cjss2022.04.yg26>
2. Cowles K. Site selection criteria for the optical atmospheric visibility monitoring telescopes. *The Telecommunications and Data Acquisition Report (TDA Progress Rep.)*. 1989;42–99:235–239.
3. Еленин Л.В., Молотов И.Е., Боровин Г.К. Эффективное планирование наблюдений космических объектов на орбитах различных типов. *Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*. 2018;72. 18 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-72>
4. Fedeler S.J., Holzinger M.J., Whitacre W. Optimality and Application of Tree Search Methods for POMDP-based Sensor Tasking. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*. Maui, Hawaii, USA. 2020. 24 p. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2020/Poster/Fedeler.pdf>
5. Schubert M., Keschull C., Gelhaus J., et al. Evaluating sensor tasking strategies for object cataloging in GEO. *Acta Astronautica*. 2024;228:7–16. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.11.026>
6. Dhingra N.K., DeJac C., Herz A., et al. Space domain awareness sensor scheduling with optimality certificates. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. 2023. 15 p. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2023/SDA/Dhingra.pdf>
7. Ksendzук A., Grigorev V. Satellite Radio Monitoring Stations Observation Planning: Time Alignment Observation Algorithm. In: *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. IEEE; 2021. P. 2–6. <https://doi.org/10.1109/EnT50460.2021.9681763>
8. Tian M., Ma G., Huang P., et al. Optimizing satellite ground station facilities scheduling for RSGS: a novel model and algorithm. *Int. J. Digital Earth*. 2023;16(1):3949–3972. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2259870>
9. Garcia-Piquer A., Morales J.C., Ribas I., et al. Efficient scheduling of astronomical observations – Application to the CARMENES radial-velocity survey. *Astronomy & Astrophysics*. 2017;604:A87. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628577>
10. Johnston M.D. Scheduling tools for astronomical observations. In: Boroson T.A., Davies J.K., Robson I. (Eds.). *New Observing Modes for the Next Century. Astronomical Society of the Pacific Conference Series (ASP)*, 1996;87:62–71. URL: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1996ASPC...87...62J/ADS_PDF
11. Григорьев В.С., Ксэндзук А.В. Оптимизационные методы составления расписания наблюдений за космическими аппаратами в околоземном пространстве наземными радиотехническими измерительными средствами. *Журнал радиоэлектроники*. 2023;7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.1>
12. *Теоретические основы радиолокации*; под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио; 1978. 607 с.
13. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. *Статистическая теория измерительных радиосистем*. М.: Радио и связь; 1981. 965 с.
14. Fürbacher A., Fruth T., Weibigke A., et al. Concept for generic agile, reactive optical link planning. *CEAS Space J.* 2025. 10 p. <https://doi.org/10.1007/s12567-025-00592-0>
15. Garcia A. Greedy algorithms: a review and open problems. *ArXiv Prepr.* arXiv:2408.08935 (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.08935>

16. Сигов А.С., Андрианова Е.Г., Жуков Д.О., Зыков С.В., Тарасов И.Е. Квантовая информатика: обзор основных достижений. *Russian Technological Journal*. 2019;7(1):5–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-5-37>
17. Ксендзук А.В., Замуруев С.Н. Перспективы создания радиотехнического комплекса мониторинга космического пространства на базе космоцентра МИРЭА. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («РАДИОИНФОКОМ-2022»): Сб. научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2022. С. 72–75. <https://www.elibrary.ru/knywzk>

REFERENCES

1. Liu J., Yang X., Cheng H., et al. Progress of China's Space Debris Research. *Chinese J. Space Sci.* 2022;42(4):824–829. <https://doi.org/10.11728/cjss2022.04.yg26>
2. Cowles K. Site selection criteria for the optical atmospheric visibility monitoring telescopes. *The Telecommunications and Data Acquisition Report (TDA Progress Rep.)*. 1989;42–99:235–239.
3. Elenin L.V., Molotov I.E., Borovin G.K. Effective planning of observations of space objects on different types of orbits. *Preprinty Instituta prikladnoi matematiki im. M.V. Keldysha RAN = Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*. 2018;72. 18 p. (in Russ.). <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-72>
4. Fedeler S.J., Holzinger M.J., Whitacre W. Optimality and Application of Tree Search Methods for POMDP-based Sensor Tasking. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*. Maui, Hawaii, USA. 2020. 24 p. Available from URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2020/Poster/Fedeler.pdf>
5. Schubert M., Kepschull C., Gelhaus J., et al. Evaluating sensor tasking strategies for object cataloging in GEO. *Acta Astronautica*. 2024;228:7–16. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.11.026>
6. Dhingra N.K., DeJac C., Herz A., et al. Space domain awareness sensor scheduling with optimality certificates. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. 2023. 15 p. Available from URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2023/SDA/Dhingra.pdf>
7. Ksendzук А., Grigorev V. Satellite Radio Monitoring Stations Observation Planning: Time Alignment Observation Algorithm. In: *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. IEEE; 2021. P. 2–6. <https://doi.org/10.1109/EnT50460.2021.9681763>
8. Tian M., Ma G., Huang P., et al. Optimizing satellite ground station facilities scheduling for RSGS: a novel model and algorithm. *Int. J. Digital Earth*. 2023;16(1):3949–3972. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2259870>
9. Garcia-Piquer A., Morales J.C., Ribas I., et al. Efficient scheduling of astronomical observations – Application to the CARMENES radial-velocity survey. *Astronomy & Astrophysics*. 2017;604:A87. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628577>
10. Johnston M.D. Scheduling tools for astronomical observations. In: Boroson T.A., Davies J.K., Robson I. (Eds.). *New Observing Modes for the Next Century. Astronomical Society of the Pacific Conference Series (ASP)*. 1996;87:62–71. Available from URL: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1996ASPC...87...62J/ADS_PDF
11. Grigorev V.S., Ksendzук A.V. Optimization methods for scheduling observations of spacecraft by ground-based radio measuring instrument. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2023;7 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.1>
12. Dulevich V.E. (Ed.). *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii (Theoretical Foundations of Radar)*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1978. 607 p. (in Russ.).
13. Fal'kovich S.E., Khomyakov E.N. *Statisticheskaya teoriya izmeritel'nykh radiosistem (Statistical Theory of Measurement Radio Systems)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1981. 965 p. (in Russ.).
14. Fürbacher A., Fruth T., Weibigke A., et al. Concept for generic agile, reactive optical link planning. *CEAS Space J*. 2025. 10 p. <https://doi.org/10.1007/s12567-025-00592-0>
15. García A. Greedy algorithms: a review and open problems. *ArXiv Prepr. arXiv:2408.08935* (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.08935>
16. Sigov A.S., Andrianova E.G., Zhukov D.O., Zykov S.V., Tarasov I.E. Quantum informatics: Overview of the main achievements. *Russian Technological Journal*. 2019;7(1):5–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-5-37>
17. Ksendzук A.V., Zamuruev S.N. Prospects for the creation of a radio engineering complex for monitoring outer space on the basis of the MIREA Space Center. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Information Communication Systems (RADIOINFOCOM-2022): Proceedings of the 6th Scientific and Technical Committee*. Moscow: RTU MIREA; 2022. P. 72–75 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/knywzk>

Об авторах

Ксендзук Александр Владимирович, д.т.н., заведующий кафедрой № 346 – радиоэлектронных систем, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ks_alex@mail.ru. Scopus Author ID 56628472300, SPIN-код РИНЦ 2389-6036, <https://orcid.org/0009-0001-7084-1433>, <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Ksendzук-2>

Кузнецов Иван Алексеевич, аспирант, ПАО «МАК «Вымпел» (125480, Россия, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, к. 1). E-mail: 0601ivankuznetsov@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-0045-6626>

About the Authors

Alexander V. Ksendzuk, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Radioelectronic Systems, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ks_alex@mail.ru. Scopus Author ID 56628472300, RSCI SPIN-code 2389-6036, <https://orcid.org/0009-0001-7084-1433>, <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Ksendzuk-2>

Ivan A. Kuznetsov, Postgraduate Student, Public Joint Stock Company VYMPEL Interstate Corporation (10-1, Geroyev Panfilovtsev ul., Moscow, 125480 Russia). E-mail: 0601ivankuznetsov@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-0045-6626>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 537.811

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-87-94>

EDN SPEPVZ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Аналитическая модель нормальной составляющей магнитной индукции постоянного магнита

М.М. Закатов[@]

Академия гражданской защиты МЧС России имени Д.И. Михайлика, Химки, 141435 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: zakatov46@mail.ru

• Поступила: 10.02.2025 • Доработана: 09.04.2025 • Принята к опубликованию: 21.07.2025

Резюме

Цели. В измерительной системе с индукционной передачей информации с перемещающейся конструкции на неподвижный приемник информационный сигнал, несущий информацию о параметрах перемещающейся конструкции, формируется магнитной системой, содержащей постоянный магнит, установленный на неподвижной части измерительной системы. Магнитное поле постоянного магнита (МППМ) определяет магнитный поток, и, следовательно, индукционный ток в другом элементе магнитной системы – проводящем витке, расположенном на перемещающейся конструкции. Для теоретического обоснования параметров измерительной системы, в т.ч. для оптимизации ее составных частей, необходима простая, удобная для применения аналитическая модель информационного сигнала (АМИС), что определяет требования к математическому описанию МППМ. Известные решения задач по расчету МППМ содержат обратные тригонометрические функции или представлены результатами численных расчетов, что затрудняет их использование для разработки АМИС измерительной системы. Целью данной статьи является получение точного решения задачи расчета МППМ и разработка на основании этого точного решения аналитической модели нормальной составляющей вектора магнитной индукции (НСВМИ) постоянного магнита, используемой для разработки АМИС.

Методы. Использовались методы математического анализа и метод эквивалентного соленоида.

Результаты. Получено точное решение задачи расчета НСВМИ МППМ, имеющего форму параллелепипеда, на основании которого получено выражение, аппроксимирующее формулу точного решения, – аналитическая модель НСВМИ.

Выводы. Полученная аналитическая модель НСВМИ может быть использована для теоретической разработки АМИС измерительной системы с индукционной передачей информации о параметрах перемещающейся конструкции на неподвижный приемник сигнала.

Ключевые слова: постоянный магнит, магнитная индукция, эквивалентный соленоид, нормальная составляющая, аналитическая модель

Для цитирования: Закатов М.М. Аналитическая модель нормальной составляющей магнитной индукции постоянного магнита. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):87–94. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-87-94>, <https://www.elibrary.ru/SPEPVZ>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analytical model for the normal component of magnetic induction of a permanent magnets

Mikhail M. Zakatov[@]

Dmitriy Mikhailik Academy of Civil Defence of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Khimki,
141435 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: zakatov46@mail.ru

• Submitted: 10.02.2025 • Revised: 09.04.2025 • Accepted: 21.07.2025

Abstract

Objectives. In a measuring system based on the inductive transmission of information from a moving structure to a stationary signal receiver, the signal carrying useful information about the parameters of the moving structure is formed by a magnetic system containing a permanent magnet mounted on the stationary part of the measuring system. The magnetic field of the permanent magnet (MFPM) determines the magnetic flux, and, consequently, the induction current in a conducting coil located on the moving structure. In order to theoretically justify the parameters of the measuring system including the optimization of its components, a simple and easy-to-use analytical model of the useful signal for determining the requirements for the mathematical description of the MFPM is required. The use of known solutions for developing an analytical model of the useful signal of the measuring system is complicated by the need to use inverse trigonometric functions or the results of numerical calculations. The present work sets out to obtain an exact solution to the problem of calculating the MFPM and on this basis to develop a simple, convenient analytical model of the normal component of the magnetic induction vector (NCMIV) of a permanent magnet used to develop an analytical model of the useful signal.

Methods. The equivalent solenoid method was used along with mathematical analysis approaches.

Results. An exact solution for calculating the normal component of the magnetic induction vector of the parallelepiped-shaped permanent magnet was obtained. Based on this, a straightforward and easy-to-use analytical model of the NCMIV was developed, which closely approximates the formula derived for the exact solution.

Conclusions. The developed analytical model of the NCMIV can be used for theoretical development of an analytical model of the useful signal of a measuring system with inductive transmission of information about the parameters of a moving structure to a stationary signal receiver.

Keywords: permanent magnet, magnetic induction, equivalent solenoid, normal component, analytical model

For citation: Zakatov M.M. Analytical model for the normal component of magnetic induction of a permanent magnet. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):87–94. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-87-94>, <https://www.elibrary.ru/SPEPVZ>

Financial disclosure: The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В задачах передачи информации о параметрах конструкции, меняющей свое положение относительно неподвижного приемника сигнала, в основном используется радиоканал (например, для передачи значений параметров газа в пневматической шине транспортного средства). При этом на конструкции размещаются измерительные преобразователи параметров, определяющих ее состояние,

в электрические сигналы, поступающие в радиопередатчик. На неподвижной части, например, на корпусе транспортного средства, по отношению к которому меняет свое положение колесо с пневматической шиной, размещается приемник радиосигнала.

Использование радиоканала для передачи информации обычно связано с трудностями, обусловленными ограничениями на использование электромагнитного излучения.

В измерительной системе с индукционной передачей информации о состоянии перемещающейся конструкции [1, 2] информационный сигнал, несущий информацию о состоянии конструкции, формируется магнитной системой, которая формализована следующим образом (рис. 1). На верхней грани постоянного магнита, имеющего форму параллелепипеда высотой H и основанием с размерами a и b , размещается прямоугольный проводящий виток 1. В плоскости, параллельной верхней грани постоянного магнита, движется со скоростью V относительно постоянного магнита конструкция с расположенным на ней витком 2, имеющим прямоугольную форму, так, что проекция (точка A) центра витка 2 (точка O_2) на ось Ox перемещается вдоль оси Ox . Расстояние от плоскости до верхней грани постоянного магнита равно d . Электрическое сопротивление витка 2 определяется параметром конструкции.

При перемещении витка 2 в магнитном поле постоянного магнита (МППМ) в витке 2 возникает индукционный электрический ток, сила которого зависит от скорости витка 2, электрического сопротивления витка 2, а также от нормальной составляющей вектора магнитной индукции (НСВМИ) МППМ, перпендикулярной плоскости витка 2. Индукционный электрический ток перемещающегося витка 2 создаст переменное магнитное поле в месторасположении витка 1. Электродвижущая сила витка 1, обусловленная магнитным потоком переменного магнитного поля индукционного тока перемещающегося витка 2, является информационным сигналом, содержащим

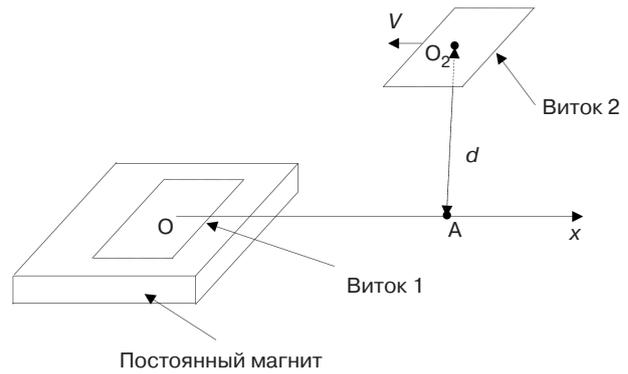


Рис. 1. Схема магнитной системы

информацию о параметре конструкции. Для определения характеристик магнитных полей различных магнитных систем развиты аналитические [3–11] и численные [12–24] методы расчетов характеристик. В данной статье для точного решения задачи распределения НСВМИ МППМ в плоскости, параллельной верхней грани постоянного магнита, применен метод эквивалентного соленоида. Полученные результаты использовались для разработки аналитической модели НСВМИ, которая может быть использована для разработки аналитических моделей магнитных потоков, создающих индукционные электрические токи в проводящих витках 1 и 2. Результаты расчетов распределения МППМ, изложенные в [11], дополнены расчетами распределения МППМ в геометрической области вблизи постоянного магнита.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Магнитное поле создается однородно намагниченным по оси Oz постоянным магнитом (рис. 2). Начало системы координат $Oxyz$ размещается в центре основания магнита. Используя рис. 2, рассчитаем нормированную НСВМИ МППМ $B_{zn}(x, y, z)$ в точке $M(x, y, z)$, расположенной в заданной плоскости $z \geq H$.

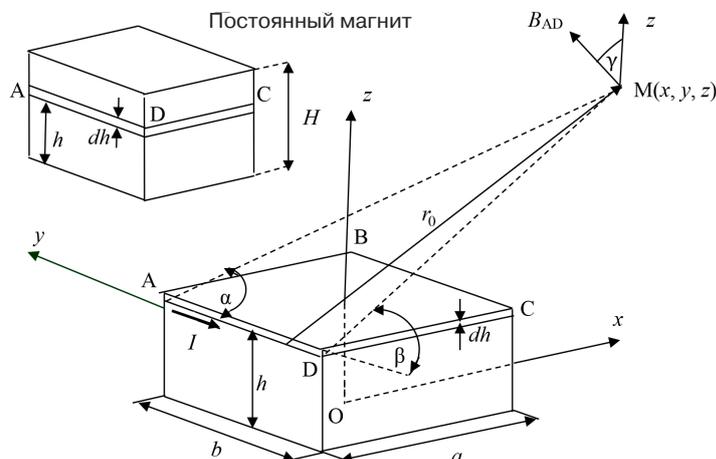


Рис. 2. Геометрическая схема расчета НСВМИ МППМ

В соответствии с методом эквивалентного соленоида [3–6] заменим постоянный магнит системой поверхностных электрических токов с линейной плотностью λ , текущих в плоскостях, перпендикулярных оси Oz . Тогда по полоске боковой поверхности постоянного магнита шириной dh , расположенной на высоте h от его основания, протекает поверхностный электрический ток силой $I = \lambda dh$. Периметр полоски образован отрезками AD, DC, CB, BA, где $|AD| = |CB| = b$, $|DC| = |BA| = a$.

Величина магнитной индукции $B_{AD}(x, y, z)$ тока I отрезка AD в точке $M(x, y, z)$ определяется соотношением [3]:

$$B_{AD}(x, y, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\cos \alpha - \cos \beta}{r_0}, \quad (1)$$

где r_0 – расстояние от точки $M(x, y, z)$ до отрезка AD.

Вектор магнитной индукции B_{AD} направлен под углом γ к оси Oz .

С использованием рис. 2 получены следующие соотношения:

$$-\cos \beta = \frac{y + \frac{b}{2}}{\sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{b}{2}\right)^2 + (z - h)^2}}, \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \frac{\frac{b}{2} - y}{\sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + (z - h)^2}}, \quad (3)$$

$$\cos \gamma = \frac{x + \frac{a}{2}}{\sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + (z - h)^2}}. \quad (4)$$

Нормальная составляющая вектора магнитной индукции B_{ADz} , создаваемая электрическим током отрезка AD, определяется формулой:

$$B_{ADz}(x, y, z) = B_{AD}(x, y, z) \cos \gamma. \quad (5)$$

Нормальные составляющие вектора магнитной индукции электрических токов отрезков DC, CB, BA определяются таким же образом.

Нормальная составляющая вектора магнитной индукции, создаваемая электрическим током I , протекающим по полоске шириной dh на высоте h постоянного магнита, является суммой НСВМИ электрических токов отрезков AD, DC, CB, BA:

$$B_{hz}(x, y, z) = B_{ADz}(x, y, z) + B_{DCz}(x, y, z) + B_{CBz}(x, y, z) + B_{BAz}(x, y, z). \quad (6)$$

В дальнейшем символами AD, DC, CB, BA будем обозначать боковые поверхности постоянного магнита, содержащие соответствующие отрезки.

С учетом (1)–(6) получим формулу для вычисления нормированной НСВМИ электрического тока боковой поверхности AD:

$$\begin{aligned} \frac{4\pi}{\mu_0 \lambda} \int_0^H B_{ADz}(x, y, z) dh = & \left(\arcsin \frac{\alpha_{11} z}{\sqrt{(\alpha_{11}^2 + \beta_1^2)(\beta_1^2 + z^2)}} - \arcsin \frac{\alpha_{11}(z - H)}{\sqrt{(\alpha_{11}^2 + \beta_1^2)(\beta_1^2 + (z - H)^2)}} \right) + \\ & + \left(\arcsin \frac{\alpha_{12} z}{\sqrt{(\alpha_{12}^2 + \beta_1^2)(\beta_1^2 + z^2)}} - \arcsin \frac{\alpha_{12}(z - H)}{\sqrt{(\alpha_{12}^2 + \beta_1^2)(\beta_1^2 + (z - H)^2)}} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\alpha_{11} = \frac{b}{2} - y$, $\alpha_{12} = \frac{b}{2} + y$, $\beta_1 = x + \frac{a}{2}$.

Нормированная НСВМИ МППМ $B_{z_n}(x, y, z)$ является суммой нормированных НСВМИ всех электрических токов боковых поверхностей постоянного магнита. С учетом (7) получим:

$$B_{z_n}(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 \left(\left(\arcsin \frac{\alpha_{i1}z}{\sqrt{(\alpha_{i1}^2 + \beta_i^2)(\beta_i^2 + z^2)}} - \arcsin \frac{\alpha_{i1}(z-H)}{\sqrt{(\alpha_{i1}^2 + \beta_i^2)(\beta_i^2 + (z-H)^2)}} \right) + \left(\arcsin \frac{\alpha_{i2}z}{\sqrt{(\alpha_{i2}^2 + \beta_i^2)(\beta_i^2 + z^2)}} - \arcsin \frac{\alpha_{i2}(z-H)}{\sqrt{(\alpha_{i2}^2 + \beta_i^2)(\beta_i^2 + (z-H)^2)}} \right) \text{sign}(\beta_i) \right), \quad (8)$$

где $\alpha_{11} = \frac{b}{2} - y$, $\alpha_{12} = \frac{b}{2} + y$, $\beta_1 = x + \frac{a}{2}$ (для AD); $\alpha_{21} = x + \frac{a}{2}$, $\alpha_{22} = \frac{a}{2} - x$, $\beta_2 = y + \frac{b}{2}$ (для DC); $\alpha_{31} = y + \frac{b}{2}$, $\alpha_{32} = \frac{b}{2} - y$, $\beta_3 = \frac{a}{2} - x$ (для CB); $\alpha_{41} = \frac{a}{2} - x$, $\alpha_{42} = \frac{a}{2} + x$, $\beta_4 = \frac{b}{2} - y$ (для BA).

Нормальная составляющая вектора магнитной индукции электрического тока боковой поверхности СВ меняет знак при $x > \frac{a}{2}$, так же, как и НСВМИ электрического тока боковой поверхности ВА при $y > \frac{b}{2}$. Изменение знаков НСВМИ учитывается функцией $\text{sign}(\beta_i)$.

$B_{z_n}(x, y, z)$ является четной функцией координат x и y , следовательно, расчет распределения $B_{z_n}(x, y, z)$ в заданной плоскости можно делать только для ее четверти, ограниченной неравенствами: $0 \leq x$, $0 \leq y$. Для получения более удобного для дальнейших исследований выражения $B_{z_n}(x, y, z)$ формула (8) была разложена в ряд Тейлора, анализ которого показал, что формулу (8) можно заменить простой, удобной для расчетов формулой – аналитической моделью НСВМИ:

$$B_{z_n,anal}(x, y, z) = \begin{cases} B_{z_n}(0, 0, z) \left[\left(\frac{y}{y_{max}} \right)^2 - 1 \right]^2 \left[\left(\frac{x}{x_{max}} \right)^2 - 1 \right]^2 & \text{при } |x| \leq x_{max}, |y| \leq y_{max}, \\ 0 & \text{при } |x| > x_{max}, |y| > y_{max}, \end{cases} \quad (9)$$

где x_{max}, y_{max} – «размеры» магнитного поля в плоскости $z = \text{const}$, т.е. координаты x_{max}, y_{max} , зависящие от координаты z , которые подбираются так, чтобы в области $|x| \geq x_{max}, |y| \geq y_{max}$ плоскости $z = \text{const}$ НСВМИ МППМ становилась равной нулю.

На рис. 3 приведены графики зависимостей нормированной НСВМИ МППМ $B_{z_n}(x, y, z)$ в плоскости $z = 13$ мм в зависимости от координаты x при различных значениях координаты y , при следующих параметрах постоянного магнита: $a = b = 16$ мм, $H = 8$ мм. Значения $B_{z_n}(x, y, z)$ для графиков 1, 2, 3 рассчитаны по точной формуле (8), а для графиков 4, 5, 6 – по формуле (9).

Анализ показал, что отличие результатов расчетов по точной формуле (8) от результатов расчетов по аппроксимирующей формуле (9) значительно для точек плоскости с координатами $x \geq 6$ мм, $y \geq 6$ мм, при которых относительная погрешность δ расчетов нормированной НСВМИ МППМ по аналитической модели принадлежит отрезку $15\% \leq \delta \leq 33\%$.

Для точек плоскости с координатами $x \leq 6$ мм, $y \leq 6$ мм относительная погрешность δ составила менее 15%, причем для точек плоскости, ограниченных неравенством $r \leq 4$ мм, где r – расстояние от начала системы координат до точки плоскости, относительная погрешность составила $\delta \leq 3.8\%$; для точек плоскости, ограниченных неравенством $r \leq 2$ мм, относительная погрешность составила $\delta \leq 2.6\%$.

Параметры информационного сигнала измерительной системы: амплитуда, форма зависимости

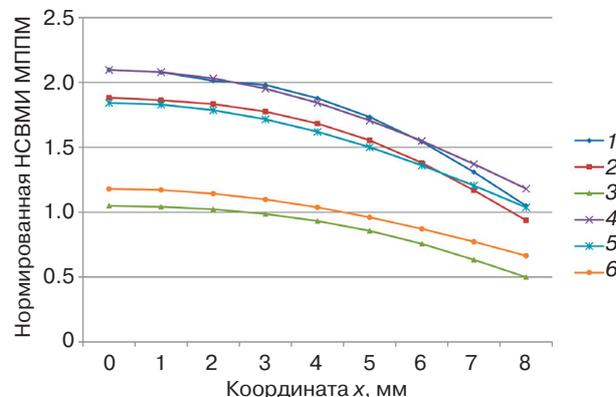


Рис. 3. Графики нормированной НСВМИ МППМ:
 1 – $B_{z_n}(x, 0, 13)$, 2 – $B_{z_n}(x, 4, 13)$,
 3 – $B_{z_n}(x, 8, 13)$, 4 – $B_{z_n,anal}(x, 0, 13)$,
 5 – $B_{z_n,anal}(x, 4, 13)$, 6 – $B_{z_n,anal}(x, 8, 13)$

от времени на интервале его длительности, определяются скоростью изменения магнитных потоков в витках 1 и 2 при нахождении центра витка 2 над центром сечения постоянного магнита. В этом случае погрешность расчетов параметров информационного сигнала наименьшая, потому что магнитные потоки и скорость их изменений определяются в основном центральной частью распределения НСВМИ МППМ – в точках плоскости с координатами, ограниченными неравенствами $x \leq 6$ мм, $y \leq 6$ мм.

При больших значениях координат НСВМИ МППМ – периферийная часть МППМ, быстро уменьшается, а скорость изменения магнитных потоков, определяемая периферийной частью МППМ, меньше скорости изменения магнитных потоков, определяемой центральной частью МППМ.

Проведенные оценки погрешностей расчетов НСВМИ по аппроксимирующей формуле (9) показали возможность использования аналитической модели НСВМИ для разработки аналитической модели информационного сигнала измерительной системы с погрешностью расчетов значений информационного сигнала, не превышающей 15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное следование позволяет сделать следующие выводы:

1. Методом эквивалентного соленоида получена точная аналитическая формула для расчета НСВМИ МППМ, имеющего форму параллелепипеда, перпендикулярной к заданной плоскости, параллельной торцу магнита.
2. Получено выражение аналитической модели НСВМИ, позволяющее относительно просто вычислять магнитные потоки в витках 1 и 2.
3. Обоснована возможность использования аналитической модели НСВМИ для теоретической разработки аналитической модели информационного сигнала измерительной системы с индукционной передачей сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закатов М.М. Теоретические основы информационной системы с индукционной передачей сигнала. *Радиопромышленность*. 2001;1:29–39.
2. Закатов М.М. *Пассивный измеритель давления и температуры воздуха в шине колеса автомобиля*: пат. 2509656 РФ. Заявка № 2012140219/11; заявл. 20.09.2012, опубл. 20.03.2014. Бюл. 8.
3. Сивухин Д.В. *Общий курс физики: в 5 т. Т. 3. Электричество*. М.: Физматлит; 2004. 656 с.
4. Кустов М.С., Друина Д.В., Михайлова О.О., Поляков И.Г. Расчет магнитных полей однородно намагниченных тел методами эквивалентного соленоида и магнитных зарядов. *Вестник ТвГУ. Серия «Физика»*. 2010;8:17–35.
5. Erlichson H. The magnetic field of a circular turn. *Am. J. Phys.* 1989;57(7):607–608. <https://doi.org/10.1119/1.15955>
6. Воронцов А.А., Слесарев Ю.Н., Карпухин Э.В. Математическое моделирование магнитных полей двухкоординатных магнитоотрицательных наклономеров, содержащих постоянный магнит в форме прямоугольного параллелепипеда. *Вестник Тамбовского ГТУ*. 2013;19(1):25–29.
7. Воронцов А.А., Слесарев Ю.Н., Карпухин Э.В. Математическое моделирование магнитных полей двухкоординатных магнитоотрицательных наклономеров, содержащих кольцевой или сплошной постоянный магнит. *Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского*. 2012;30:467–472.
8. Ravaud R., Lemarquand G., Depollier C., et al. Analytical calculation of the magnetic field created by permanent-magnet rings. *IEEE Transact. Magnet.* 2008;44(8):1982–1989. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.923096>
9. Вагин Д.В., Герасименко Т.Н., Поляков П.А. Точное аналитическое выражение для индукции магнитного поля образца прямоугольной формы. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия*. 2008;6:53–55.
10. Xiao-Fan G., Yong Y., Xiao-Jing Z. Analytic expression of magnetic field distribution of rectangular permanent magnets. *Appl. Math. Mech.* 2004;25:297–306. <https://doi.org/10.1007/BF02437333>
11. Артамонов А. Н., Ерженин Н.Р., Закатов М.М. Аналитическая модель нормальной составляющей вектора магнитной индукции. В сб.: *Материалы XXVII Международной научно-практической конференции «Предупреждение, спасение, помощь»*. Химки; 2017. С. 5–9.
12. Резинкина М.М. Выбор параметров тонких электромагнитных экранов для снижения уровней магнитной индукции. *Журн. техн. физики*. 2014;84(2):1–7.
13. Резинкина М.М. Численный расчет магнитного поля и магнитного момента ферромагнитных тел сложной пространственной конфигурации. *Журн. техн. физики*. 2009;79(8):8–17.
14. Слесарев Ю.Н., Мартенс-Атюшева К.Ю., Родионов С.В. Исследование математических моделей магнитных полей двухкоординатных магнитоотрицательных наклономеров. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2016;2(18):290–298.

15. Бульжев Е.М., Меньшов Е.Н., Джавахия Г.А. Моделирование поля постоянного магнита *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011;13(4):106–110.
16. Черкасова О.А. Исследование магнитного поля постоянного магнита с помощью компьютерного моделирования. *Гетеромагнитная микроэлектроника*. 2014;17:112–120.
17. Матюк В.Ф., Осипов А.А., Стрелюхин А.В. Распределение намагниченности вдоль цилиндрического стержня, находящегося в продольном постоянном однородном магнитном поле. *Электротехника*. 2009;8:37–46.
18. Андреева Е.Г., Татевосян А.А., Семина И.А. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа. *Омский научный вестник*. 2010;1(87):110–113.
19. Лагутин А.С., Григорьев Г.Ю. Магнитная система поляризатора ядер ксенона. *Прикладная физика*. 2023;3:92–95.
20. Алиевский Б.Л., Орлов В.Л. *Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек*. М.: Энергоатомиздат; 1983. 112 с.
21. Camacho J.M., Sosa V. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. *Revista Mexicana de Física E*. 2013;59(1):8–17. <https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.21.020701>
22. Семькина И.Ю., Завьялов В.М., Дубков Е.А., Углова М.Б. Анализ распределения индукции магнитного поля в окрестностях катушки прямоугольного профиля системы беспроводной передачи энергии. В сб.: *Перспективные технологии и материалы: Материалы Международной научно-практической конференции*. Севастополь. 2022. С. 235–239.
23. Li B., Zhang J., Zhao X., Liu B., Dong H. Research on air gap magnetic field characteristics of trapezoidal Halbach permanent magnet linear synchronous motor based on improved equivalent surface current method. *Energies*. 2023;16(2):793–805. <https://doi.org/10.3390/en16020793>
24. Осипов В.В., Орлов А.Н., Лисенков В.В., Максимов Р.Н., Шитов В.А. Распределение магнитного поля в зазоре между двумя постоянными магнитами: расчетные и экспериментальные данные и их приложения. *Приборы и техника эксперимента*. 2023;6:111–118. <https://doi.org/10.31857/S003281622306006X>

REFERENCES

1. Zakatov M.M. Theoretical foundations of an information system with inductive signal transmission. *Radiopromyshlennost' = Radio Industry*. 2001;1:29–39 (in Russ.).
2. Zakatov M.M. *Passive Automotive Tire Air Pressure and Temperature Meter*: RF Pat. 2509656. Publ. 20.03.2014 (in Russ.).
3. Sivukhin D.V. *Obshchii kurs fiziki: Elektrichestvo (General Course of Physics: in 5 v. V. 3. Electricity)*. Moscow: Fizmatlit; 2004. 656 p. (in Russ.).
4. Kustov M.S., Druina D.V., Mikhailova O.O., Polyakov I.G. Magnetic field calculation for uniformly magnetized bodies by the methods of equivalent solenoid and magnetic charges. *Vestnik TvGU. Seriya: Fizika = Bulletin of TvGU. Series: Physics*. 2010;8:17–35 (in Russ.).
5. Erlichson H. The magnetic field of a circular turn. *Am. J. Phys.* 1989;57(7):607–608. <https://doi.org/10.1119/1.15955>
6. Vorontsov A.A., Slesarev Yu.N., Karpushin E.V. Mathematical modeling of magnetic fields of two-axis magnetostrictive inclinometers containing constant magnet shaped as rectangular parallelepiped. *Vestnik TGTU = Transactions of the TSTU*. 2013;19(1):25–29 (in Russ.).
7. Vorontsov A.A., Slesarev Yu.N., Karpushin E.V. Mathematical modeling of magnetic fields of two-coordinate magnetostrictive tiltmeters containing a ring or solid permanent magnet. *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo*. 2012;30:467–472 (in Russ.).
8. Ravaut R., Lemarquand G., Depollier C., et al. Analytical calculation of the magnetic field created by permanent-magnet rings. *IEEE Transact. Magnet.* 2008;44(8):1982–1989. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.923096>
9. Vagin D.V., Gerasimenko T.N., Polyakov P.A. Exact analytical expression for magnetic field induction of rectangular shape sample. *Moscow Univ. Phys.* 2008;63(6):422–422. <https://doi.org/10.3103/S0027134908060131>
[Original Russian Text: Vagin D.V., Gerasimenko T.N., Polyakov P.A. Exact analytical expression for magnetic field induction of rectangular shape sample. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya*. 2008;6:53–55 (in Russ.).]
10. Xiao-Fan G., Yong Y., Xiao-Jing Z. Analytic expression of magnetic field distribution of rectangular permanent magnets. *Appl. Math. Mech.* 2004;25:297–306. <https://doi.org/10.1007/BF02437333>
11. Artamonov A.N., Erzhenin N.R., Zakatov M.M. Analytical model of the normal component of the magnetic induction vector. In: *Proceedings of the 27th International Scientific-Practical Conference "Prevention. Salvation. Help."* Khimki; 2017. P. 5–9 (in Russ.).
12. Rezinina M.M. Parameters of thin electromagnetic shields that provide a decrease in magnetic induction. *Tech. Phys.* 2014;59(2):155–161. <https://doi.org/10.1134/S1063784214020194>
[Original Russian Text: Rezinina M.M. Parameters of thin electromagnetic shields that provide a decrease in magnetic induction. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2014;84(2):1–7 (in Russ.).]
13. Rezinina M.M. Numerical calculation of the magnetic field and magnetic moment of ferromagnetic bodies of complex spatial configuration. *Tech. Phys.* 2009;54(8):1092–1101. <https://doi.org/10.1134/S1063784209080027>
[Original Russian Text: Rezinina M.M. Numerical calculation of the magnetic field and magnetic moment of ferromagnetic bodies of complex spatial configuration. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2009;79(8):8–17 (in Russ.).]

14. Slesarev Yu.N., Martens-Atyusheva K.Yu., Rodionov S.V. Research of mathematical models of magnetic fields of two-coordinate magnetostriction tiltmeters. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*. 2016;2(18):290–298 (in Russ.).
15. Bulyzhev E.M., Menshov E.N., Dzhavakhiya G.A. Modeling the field permanent magnet. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(4):106–110 (in Russ.).
16. Cherkasova O.A. Research of the magnetic field of the permanent magnet by means of computer modeling. *Geteromagnitnaya mikroelektronika = Heteromagnetic Microelectronics*. 2014;17:112–120 (in Russ.).
17. Matyuk V.F., Osipov A.A., Strelyukhin A.V. Magnetization distribution along the cylindrical rod in longitudinal constant uniform magnetic field. *Russ. Electr. Eng.* 2009;80(8):450–458. <https://doi.org/10.3103/S1068371209080082>
[Original Russian Text: Matyuk V.F., Osipov A.A., Strelyukhin A.V. Magnetization distribution along the cylindrical rod in longitudinal constant uniform magnetic field. *Elektrotehnika*. 2009;8:37–46 (in Russ.).]
18. Andreeva E.G., Tatevosyan A.A., Semina I.A. Research of the axisymmetric model of an open-type magnetic system. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2010;1(87):110–113 (in Russ.).
19. Lagutin A.S., Grigoriev G.Yu. Magnetic system of the xenon core polarizer. *Prikladnaya fizika = Appl. Phys.* 2023;3:92–95 (in Russ.).
20. Alievskii B.L., Orlov V.L. *Raschet parametrov magnitnykh polei osesimmetrichnykh katushek (Calculation of Magnetic Field Parameters of Axisymmetric Coils)*. Moscow: Energoatomizdat; 1983. 112 p. (in Russ.).
21. Camacho J.M., Sosa V. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. *Revista Mexicana de Fisica E*. 2013;59(1):8–17. <https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.21.020701>
22. Semykina I.Yu., Zav'yalov V.M., Dubkov E.A., Uglova M.B. Analysis of the magnetic field induction distribution in the vicinity of a rectangular coil profile of a wireless power transmission system. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Advanced Technologies and Materials"*. Sevastopol. 2022. P. 235–239 (in Russ.).
23. Li B., Zhang J., Zhao X., Liu B., Dong H. Research on air gap magnetic field characteristics of trapezoidal Halbach permanent magnet linear synchronous motor based on improved equivalent surface current. *Energies*. 2023;16(2):793–805. <https://doi.org/10.3390/en16020793>
24. Osipov V.V., Orlov A.N., Lisenkov V.V., et al. Distribution of the Magnetic Field in the Gap between Two Permanent Magnets: Calculated and Experimental Data and Their Applications. *Instrum. Exp. Tech.* 2023;66(6):995–1002. <https://doi.org/10.1134/S0020441223060064>
[Original Russian Text: Osipov V.V., Orlov A.N., Lisenkov V.V., Maksimov R.N., Shitov V.A. Distribution of the Magnetic Field in the Gap between Two Permanent Magnets: Calculated and Experimental Data and Their Applications. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2023;6:111–118 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S003281622306006X>]

Об авторе

Закатов Михаил Михайлович, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент, кафедра механики и инженерной графики, ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика» (ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России») (141435, Россия, Московская обл., г.о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1). E-mail: zakatov46@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0006-1249-8039>

About the Author

Mikhail M. Zakatov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1, Sokolovskaya ul., mkr. Novogorsk, Khimki, Moscow oblast, 141435 Russia). E-mail: zakatov46@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0006-1249-8039>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 538.93

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-95-103>

EDN YKANQQ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой на основе гироида

А.И. Попов[@],
А.В. Еремин

Самарский государственный технический университет, Самара, 443100 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: popov.ai@samgtu.ru

• Поступила: 27.12.2024 • Доработана: 10.03.2025 • Принята к опубликованию: 23.07.2025

Резюме

Цели. Трижды периодические минимальные поверхности – это непересекающиеся поверхности с нулевой средней кривизной, состоящие из повторяющихся в трех направлениях декартовой системы координат элементов. Использование конструкций, основанных на минимальных поверхностях, в теплотехническом оборудовании связано с их преимуществами перед классическими решетчатыми и сотовыми конструкциями, часто применяемыми на практике. Целью работы является исследование теплопереноса при фильтрационном течении несжимаемой жидкости в пористой среде с упорядоченной макроструктурой на основе трижды периодической минимальной поверхности (гироида).

Методы. Для решения задачи теплопереноса в пористой среде применяется метод конечных разностей. Для реализации алгоритма метода конечных разностей разработано программное обеспечение *Heat Transfer Solver* на языке программирования Python.

Результаты. В рамках настоящего исследования разработано программное обеспечение на языке программирования Python для численного решения методом конечных разностей задачи теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой. Функционал программы позволяет исследовать динамику процесса теплопереноса и влияние различных параметров на распределение температуры. При помощи данной программы изучен процесс теплопереноса в пористой среде на основе гироида. Получены графические зависимости температуры твердотельного каркаса и жидкости, а также теплового потока от координаты в различные моменты времени. Определены характерные временные интервалы, в которых наблюдается наибольшее абсолютное значение градиента температур.

Выводы. Результаты работы, включающие как разработанное программное обеспечение, так и зависимости температур, могут найти применение в ряде инженерных задач, где важным является прогнозирование температурного распределения в пористых материалах при различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: пористая среда, течение жидкости, теплообмен, трижды периодическая минимальная поверхность, гироид, метод конечных разностей

Для цитирования: Попов А.И., Еремин А.В. Исследование теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой на основе гироида. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):95–103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-95-103>, <https://www.elibrary.ru/YKAHQQ>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Heat transfer in a porous medium having an ordered gyroid-based macrostructure

Andrey I. Popov [®],
Anton V. Eremin

Samara State Technical University, Samara, 443100 Russia

[®] *Corresponding author, e-mail: popov.ai@samgtu.ru*

• Submitted: 27.12.2024 • Revised: 10.03.2025 • Accepted: 23.07.2025

Abstract

Objectives. Triply periodic minimal surfaces are non-intersecting surfaces with zero mean curvature, consisting of elements repeating in three directions of the Cartesian coordinate system. The use of structures based on minimal surfaces in heat engineering equipment is associated with their advantages over classical lattice and honeycomb structures, often used in practice. The aim of the work is to study heat transfer during filtration flow in a porous medium of an incompressible fluid having an ordered macrostructure based on gyroid triply periodic minimal surface.

Methods. In order to solve the problem of heat transfer in a porous medium, the finite difference method is used. As a means of implementing the finite difference method algorithm, the *Heat Transfer Solver* software was developed in the Python programming language.

Results. The described software program was used to obtain a numerical solution of the heat transfer problem in a porous medium with an ordered macrostructure using the finite difference method. The program functionality enables the investigation of the heat transfer process dynamics and the influence of various parameters on the temperature distribution. The program was used to study the heat transfer process in a porous medium based on gyroid triply periodic minimal surface. Graphical dependencies of the solid framework and fluid temperatures, as well as the heat flux on the coordinate at different time steps, were obtained. Characteristic time intervals with the highest absolute temperature gradient values were identified.

Conclusions. The results of the work, including both the developed software and the obtained temperature dependencies, can be used in a number of engineering problems where it is important to predict the temperature distribution in porous materials under various operating conditions.

Keywords: porous medium, fluid flow, heat transfer, triply periodic minimal surface, gyroid, finite difference method

For citation: Popov A.I., Eremin A.V. Heat transfer in a porous medium having an ordered gyroid-based macrostructure. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):95–103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-95-103>, <https://www.elibrary.ru/YKAHQQ>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной задачей в теоретической и прикладной теплотехнике является повышение энергетической эффективности теплотехнического оборудования [1], которое широко используется в различных отраслях промышленности. Одним из методов интенсификации теплообмена является применение пористых материалов в конструкции теплообменных устройств [2], катализаторов [3] и т.д. Повышение площади поверхности теплообмена и турбулизация потока являются основными причинами использования пористых материалов в тракте теплообменников.

Большинство применяемых на практике пористых материалов обладают стохастической структурой, или, иными словами, случайной формой и размерами пор. Однако существуют целые классы пористых материалов с упорядоченной структурой, к которым, например, относятся решетчатые и сотовые конструкции [4, 5], а также конструкции на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП). Такие поверхности являются предметом большого числа исследований [6–11] ввиду своих превосходных прочностных свойств при высоком значении пористости, что позволяет проектировать легкие, но при этом прочные конструкции. Одним из преимуществ пористых материалов с ТПМП-структурой также является возможность варьирования их свойств (теплофизических, механических и др.) путем изменения характерных геометрических параметров минимальных поверхностей [8].

Несмотря на вышеуказанные преимущества, при использовании пористых ТПМП-материалов в конструкции теплотехнического оборудования можно столкнуться с рядом трудностей ввиду отсутствия математических моделей, описывающих процессы переноса (тепла, массы, импульса), поскольку это влечет за собой большие затраты времени и ресурсов на изготовление опытных образцов и проведение натурных экспериментов. В связи с этим важной задачей является математическое моделирование тепломассопереноса в пористых средах, структура которых основана на ТПМП.

Для решения задач тепломассопереноса применяются как численные, так и аналитические методы [12–14]. Аналитические методы, например, метод разделения переменных и метод интегральных преобразований позволяют получать точные решения в частных случаях. Однако такие методы применимы только к ограниченному числу задач с определенными ограничениями и условиями. В связи с этим при решении сложных задач (с нелинейными свойствами или сложной геометрией) на практике часто применяются численные методы (метод конечных разностей, метод конечных

элементов и др.) [15, 16], позволяющие находить приближенные решения с заданной точностью.

В настоящей работе при помощи метода конечных разностей решена одномерная задача теплопереноса в пористой среде, структура которой основана на ТПМП вида гироид, при течении несжимаемой жидкости.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается теплообмен в пористой среде со структурой, основанной на гироиде [17, 18], при низкой скорости течения жидкости, характерной для фильтрационных течений. Схема задачи изображена на рис. 1. На рис. 1а изображена элементарная ячейка гироида, характерными геометрическими параметрами которой являются толщина стенки δ и длина ребра куба a , в который вписана ячейка. При варьировании данных параметров изменяется пористость материала, что оказывает влияние как на гидродинамические характеристики потока, так и на интенсивность теплоотдачи.

Пористая среда, через которую протекает жидкость, изображена на рис. 1б. Решетка ТПМП образуется путем копирования элементарной ячейки (рис. 1а) в ортогональных направлениях декартовой системы координат с периодом равным a .

Для описания теплообмена при течении жидкости через пористую среду воспользуемся двухтемпературной моделью, предложенной Wakao N. и Kagei S. [19]. Двухтемпературная модель позволяет описывать каждый компонент пористой среды (твердое тело и жидкость) с использованием отдельных уравнений энергии для каждой фазы, что дает возможность более точно описывать процесс теплообмена, в особенности при отсутствии локального равновесия.

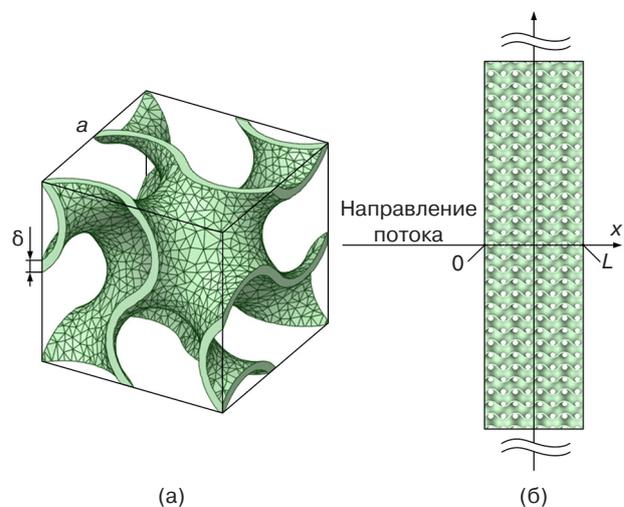


Рис. 1. Схема задачи: (а) элементарная ячейка гироида, (б) пористая ТПМП-среда.

x – координата, L – толщина пористого материала

Математическая постановка задачи, включающая основные дифференциальные уравнения, а также начальные и граничные условия, имеет вид:

$$(1-\phi)(\rho c_p)_T \frac{\partial T_T(x,t)}{\partial t} = \lambda_{эфф.т} \frac{\partial^2 T_T(x,t)}{\partial x^2} + \alpha_{т.ж} (T_ж(x,t) - T_T(x,t)), \quad (1)$$

$$(0 < x < L, t > 0);$$

$$\phi(\rho c_p)_ж \left[\frac{\partial T_ж(x,t)}{\partial t} + u \frac{\partial T_ж(x,t)}{\partial x} \right] = \lambda_{эфф.ж} \frac{\partial^2 T_ж(x,t)}{\partial x^2} + \alpha_{т.ж} (T_T(x,t) - T_ж(x,t)), \quad (2)$$

$$(0 < x < L, t > 0);$$

$$T_T(x,0) = T_ж(x,0) = T_0; \quad (3)$$

$$-\lambda_T \frac{\partial T_T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 (T_1 - T_T(0,t)); \quad (4)$$

$$\lambda_T \frac{\partial T_T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_2 (T_2 - T_T(L,t)); \quad (5)$$

$$T_ж(0,t) = T_1; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_ж(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad (7)$$

где t – время; $T_T(x,t)$, $T_ж(x,t)$ – функции температур твердотельного каркаса и жидкости соответственно; ϕ – пористость; u – скорость потока жидкости; $(\rho c_p)_T$, $(\rho c_p)_ж$ – плотность и теплоемкость твердого материала и жидкости соответственно; $\lambda_{эфф.т}$, $\lambda_{эфф.ж}$ – эффективная теплопроводность твердотельного каркаса и жидкости; λ_T – теплопроводность твердого материала; T_0 – начальная температура; T_1 , T_2 – температуры окружающих сред до и после пористой зоны; $\alpha_{т.ж}$ – коэффициент теплоотдачи между жидкостью и твердотельным каркасом; α_1 – коэффициент теплоотдачи на границе твердотельного каркаса и окружающей среды в точке $x=0$; α_2 – коэффициент теплоотдачи на границе твердотельного каркаса и окружающей среды в точке $x=L$.

Стоит отметить, что задача теплопереноса рассматривается отдельно от задачи переноса массы в пористой среде, и, соответственно, в систему уравнений не включены уравнения сохранения массы и импульса. Это связано с тем, что в некоторых частных случаях динамика течения может оказывать малое влияние на тепловые эффекты. Кроме

того, свойства жидкости и твердого тела изменяются незначительно в диапазоне рассматриваемых температур, поэтому функции для описания зависимости свойств соответствующих фаз от температуры также не включены в постановку задачи.

В качестве начального условия как для твердого тела, так и для жидкости принята одинаковая температура T_0 . На границах твердотельного каркаса (в точках $x=0$ и $x=L$) задается граничное условие 3-го рода. Температура жидкости в точке $x=0$ имеет постоянное значение, которое соответствует температуре окружающей среды на входе в пористую зону. Поскольку нет явных данных о температуре жидкости в точке $x=L$, предположим, что тепловой поток на границе равен нулю.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Решение задачи (1)–(7) осуществляется методом конечных разностей. Для этого введем в рассмотрение пространственно-временную сетку, где N – количество шагов по координате, а M – по времени:

$$x^i = i\Delta x, \quad i \in [0, N],$$

$$t^n = n\Delta t, \quad n \in [0, M],$$

где Δx , Δt – шаги по координате и времени соответственно.

Конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений (1), (2) и краевых условий (3)–(7) следующая:

$$(1-\phi)(\rho c_p)_T \left[\frac{T_T^{n+1,i} - T_T^{n,i}}{\Delta t} \right] = \lambda_{эфф.т} \left[\frac{T_T^{n,i-1} - 2T_T^{n,i} + T_T^{n,i+1}}{\Delta x^2} \right] + \alpha_{т.ж} (T_ж^{n,i} - T_T^{n,i}); \quad (8)$$

$$\phi(\rho c_p)_ж \left[\frac{T_ж^{n+1,i} - T_ж^{n,i}}{\Delta t} + u \frac{T_ж^{n,i+1} - T_ж^{n,i}}{\Delta x} \right] = \lambda_{эфф.ж} \left[\frac{T_ж^{n,i-1} - 2T_ж^{n,i} + T_ж^{n,i+1}}{\Delta x^2} \right] + \alpha_{т.ж} (T_T^{n,i} - T_ж^{n,i}); \quad (9)$$

$$T_T^{0,i} = T_ж^{0,i} = T_0; \quad (10)$$

$$-\lambda_T \frac{T_T^{n,1} - T_T^{n,0}}{\Delta x} = \alpha_1 (T_1 - T_T^{n,0}); \quad (11)$$

$$\lambda_T \frac{T_T^{n,N} - T_T^{n,N-1}}{\Delta x} = \alpha_2 (T_2 - T_T^{n,N}); \quad (12)$$

$$T_ж^{0,i} = T_1; \quad (13)$$

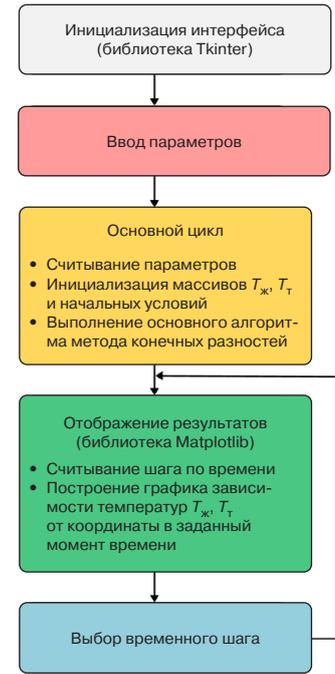
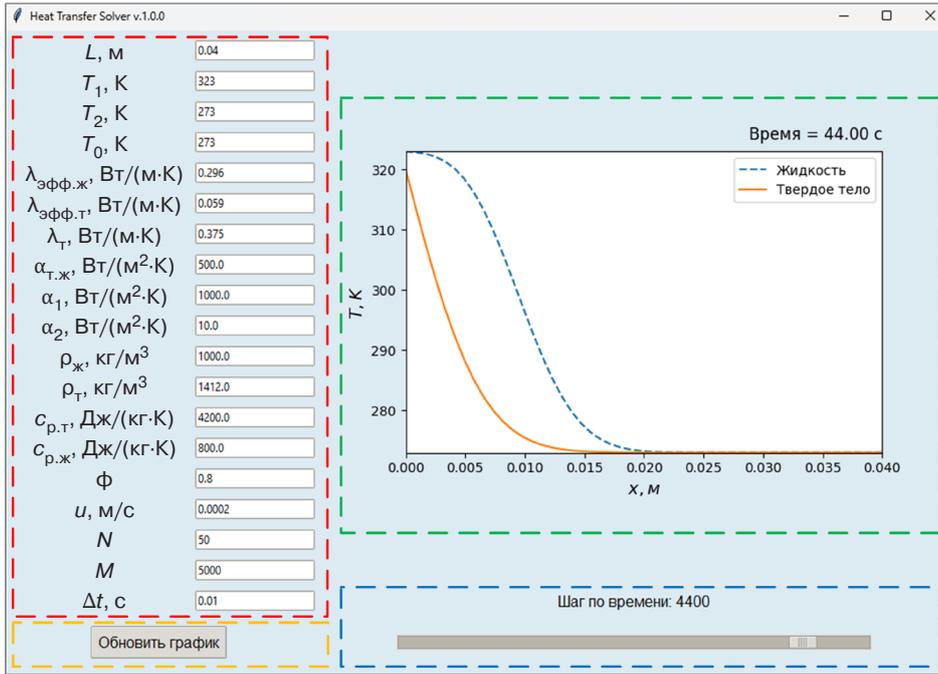


Рис. 2. Интерфейс и алгоритм разработанной программы

$$\frac{T_{\text{ж}}^{n,N} - T_{\text{ж}}^{n,N-1}}{\Delta x} = 0. \quad (14)$$

Задача решается в соответствии с явной схемой для получения значений температур $T_{\text{ж}}$ и $T_{\text{т}}$ в каждом узле сетки на каждом временном шаге. Явная схема была выбрана благодаря ее простой реализации и достаточной точности для рассматриваемой задачи. При этом устойчивость решения обеспечивается подбором шага по времени Δt в зависимости от Δx в соответствии с критерием Куранта.

Для реализации алгоритма решения поставленной задачи методом конечных разностей разработано программное обеспечение на языке программирования Python. Графический интерфейс программы представлен на рис. 2. Для его построения использовалась библиотека Tkinter. В основном цикле программы можно выделить следующие этапы:

1. Ввод основных параметров задачи через специальные текстовые поля. Функционал программы позволяет вручную задавать как теплофизические свойства исследуемых материалов, так и размер пространственно-временной сетки.
2. Считывание параметров, инициализация массивов для $T_{\text{ж}}$, $T_{\text{т}}$ и выполнение основного цикла метода конечных разностей. Конечно-разностная схема для основных дифференциальных уравнений (8), (9) и граничных условий (11), (12), (14) на языке программирования Python представлена на рис. 3.
3. Визуализация результатов, включающая построение графика изменения температуры твердотельного каркаса и жидкости в пределах рассматриваемой области. Для отображения интерактивного графика изменения температуры в пористой среде использовалась библиотека Matplotlib.

```

for n in range(1, M):
    for i in range(1, N - 1):
        T_s[n, i] = ((1 / ((1 - phi) * p_s * co_s)) *
                    (((T_s[n - 1, i - 1] - 2 * T_s[n - 1, i] + T_s[n - 1, i + 1]) / dx ** 2) * k_es +
                     h_sf * (T_f[n - 1, i] - T_s[n - 1, i])) * dt + T_s[n - 1, i])

        T_f[n, i] = (((k_ef * ((T_f[n - 1, i - 1] - 2 * T_f[n - 1, i] + T_f[n - 1, i + 1]) / dx ** 2) +
                     h_sf * (T_s[n - 1, i] - T_f[n - 1, i])) / (phi * p_f * co_f)) - u * (T_f[n - 1, i] -
                     T_f[n - 1, i - 1]) / dx) * dt + T_f[n - 1, i]

    T_s[n, 0] = (h_ext1 * dx * T_ext1 + k_s * T_s[n, 1]) / (k_s + h_ext1 * dx)
    T_s[n, -1] = (k_s * T_s[n, -2] + h_ext2 * dx * T_ext2) / (k_s + h_ext2 * dx)
    T_f[n, -1] = T_f[n, -2]
    
```

Рис. 3. Конечно-разностная схема на языке программирования Python

Пользователь имеет возможность управлять отображением графика через слайдер, изменяя временной шаг и мгновенно обновляя графики температурных полей. Это позволяет исследовать динамику процесса теплопереноса и влияние различных параметров на распределение температуры.

Программа была протестирована на корректность путем сравнения численных решений с известными аналитическими решениями для частных случаев задачи. Исходный код, а также исполняемый файл программы представлены на платформе Mendeley Data¹ [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При помощи разработанной программы была решена задача теплопереноса в пористой среде, структура которой основана на гироиде. Получены графические зависимости изменения температуры твердотельного каркаса и жидкости. В частности, представлен график зависимости температуры жидкости и твердотельного каркаса от координаты в различные моменты времени (рис. 4). Данный график был получен при следующих константах и значениях теплофизических свойств твердотельного каркаса и жидкости, а также граничных и начальных условиях: $c_{p,T} = 800$ Дж/(кг·К), $\rho_T = 1412$ кг/м³, $\lambda_T = 0.375$ Вт/(м·К), $c_{p,j} = 4200$ Дж/(кг·К), $\rho_j = 1000$ кг/м³, $\lambda_j = 0.6$ Вт/(м·К), $\lambda_{эфф,j} = 0.296$ Вт/(м·К), $\lambda_{эфф,T} = 0.059$ Вт/(м·К), $\phi = 0.8$, $L = 0.04$ м, $T_0 = 273$ К, $T_1 = 323$ К, $T_2 = 273$ К, $\alpha_1 = 1000$ Вт/(м²·К), $\alpha_2 = 10$ Вт/(м²·К), $\alpha_{T,j} = 500$ Вт/(м²·К), $u = 0.0002$ м/с. Коэффициенты эффективной теплопроводности твердой и жидкой фазы в пористом материале со структурой, основанной на гироиде, определялись в соответствии с методикой, представленной в [21].

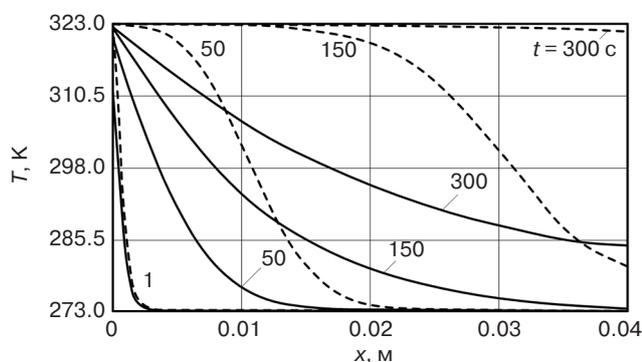


Рис. 4. График распределения температуры в пористой среде:
----- твердотельный каркас; - - - - жидкость

¹ <https://data.mendeley.com/datasets/kcn33tr7sb/2>. Дата обращения 23.07.2025. / Accessed July 23, 2025.

Из графика на рис. 4 видно, что при заданных условиях температуры жидкости и твердого каркаса значительно отличаются во всем диапазоне пространственной координаты, что подчеркивает важность использования двухтемпературной модели для точного описания распределения температур в пористых средах.

График на рис. 5 демонстрирует изменение температуры в различных точках пористого материала, а именно, в начале, в середине и в конце рассматриваемой области. Из анализа данного графика можно заключить, что при заданных условиях теплообмена температура жидкости значительно быстрее достигает максимального значения, заданного граничным условием ($T_1 = 323$ К). При $t > 300$ с температурные кривые жидкости и твердотельного каркаса начинают сближаться, что свидетельствует о снижении абсолютного значения градиента температур и приближении к термодинамическому равновесию в системе.

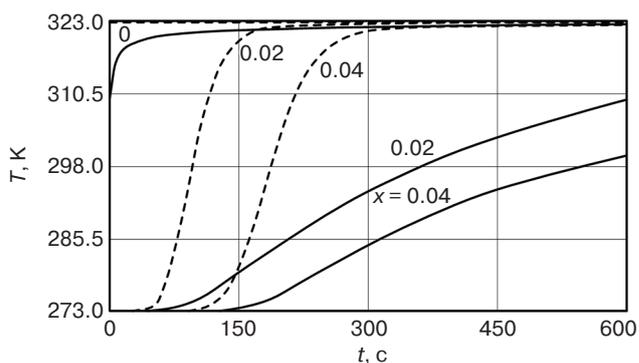


Рис. 5. График изменения температуры в пористой среде во времени:
----- твердотельный каркас; - - - - жидкость

На рис. 6 представлен график распределения теплового потока, определяемого в соответствии с законом Ньютона – Рихмана ($|q| = \alpha_{T,j}(T_j - T_T)$), в пористом материале по координате. На ранних этапах процесса ($t \approx 10$ с) распределение теплового потока имеет выраженный пик вблизи левой границы области, что связано с большим абсолютным значением градиента температуры, вызванным принятием граничного условия 1-го рода в точке $x = 0$. По мере увеличения времени ($10 \text{ с} < t < 200 \text{ с}$) наблюдается рост теплового потока со смещением пикового значения к правой границе области. Наибольшая эффективность процесса отмечается в момент времени $t \approx 200$ с, за которым следует постепенное снижение интенсивности теплообмена, поскольку температура жидкости к этому моменту имеет максимально возможное значение во всем диапазоне x , что также видно на рис. 3.

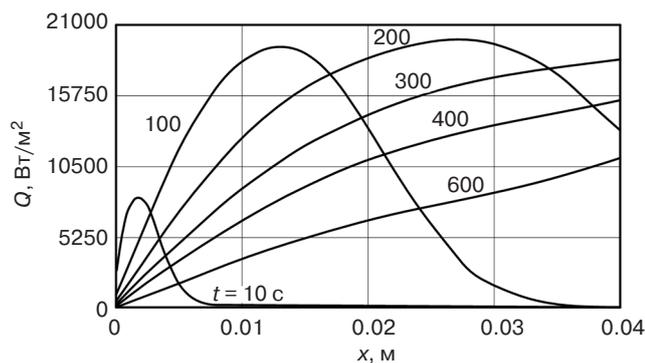


Рис. 6. График распределения теплового потока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлено исследование теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой, основанной на гироиде, при фильтрационном течении. Для математического моделирования исследуемого процесса использовалась двухтемпературная модель Wakao N. и Kagei S.

Для численного решения поставленной задачи теплопереноса в пористой среде (1)–(7) методом конечных разностей была разработана программа на языке программирования Python. Функционал разработанной программы предусматривает построение графика температуры твердотельного каркаса и жидкости, а встроенный в него слайдер временного шага позволяет визуализировать изменение температурных кривых, что важно для исследования динамики процесса теплопереноса. Главным преимуществом программы является возможность быстро, в отличие от прямых методов моделирования (например, методом конечных элементов в *ANSYS*²), получить решение поставленной задачи, что достигается за счет отсутствия необходимости в построении вычислительной геометрии и расчетной сетки.

Пористые материалы со структурой на основе ТПМП, таких как гироид, могут быть использованы в проектировании теплообменников, катализаторов и других устройств, где важно минимизировать массу конструкции без ущерба для ее прочности

и эффективности. Моделирование теплопереноса в пористых ТПМП с использованием разработанной программы позволяет быстро прогнозировать их поведение в реальных условиях эксплуатации, что важно для ряда инженерных задач в энергетике, химической промышленности, машиностроении и других отраслях.

Результаты данной работы могут стать базисом для дальнейших научных исследований в области моделирования тепломассопереноса в пористых средах. В перспективе возможно расширение модели и программы за счет учета уравнения движения жидкости в пористой среде, что позволит определять как профиль скорости, так и потери давления. Также перспективным направлением может стать разработка аналогичных моделей для других видов минимальных поверхностей, что позволит подбирать структуры с необходимыми характеристиками по теплопередаче, прочности и массе в зависимости от поставленных инженерных задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет Российского научного фонда, грант № 23-79-10044, <https://rscf.ru/project/23-79-10044/>.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-79-10044, <https://rscf.ru/project/23-79-10044/>.

Вклад авторов

А.И. Попов – проведение исследования, написание рукописи, разработка программы, оформление рисунков, редактирование статьи.

А.В. Еремин – постановка задачи, привлечение финансирования, редактирование статьи.

Authors' contributions

A.I. Popov – researching, writing the manuscript, developing of the program, visualization, and editing the article.

A.V. Eremin – task statement, funding acquisition, and editing the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (Обзор). *Теплоэнергетика*. 2012;1:3–14.
2. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Шакурова Р.З., Голубев Я.П. Обзор применения высокопористых ячеистых теплообменников. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(1):165–194. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194>

² <https://www.cadferm-cis.ru/> (in Russ.). Дата обращения 21.07.2025. / Accessed July 21, 2025.

3. Кугатов П.В. Использование пористых углеродных материалов в качестве носителей для катализаторов. *Башкирский химический журнал*. 2011;18(1):98–105.
4. Тестоедов Н.А., Наговицин В.Н., Пермяков М.Ю. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2016;17(1):200–211.
5. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ*. 2023;25(1):82–104. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104>
6. Брагин Д.М., Еремин А.В., Попов А.И., Шульга А.С. Метод определения коэффициента эффективной теплопроводности пористого материала на основе минимальной поверхности типа Schoen's I-WP(R). *Вестник ИГЭУ*. 2023;2:61–68. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2023.2.061-068>
7. Зинина С.А., Попов А.И., Еремин А.В. Численное решение нелинейной задачи теплопроводности в пористой пластине с упорядоченной макроструктурой. *Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика*. 2024;1:53–67. <https://doi.org/10.26456/vtppmk702>
8. Попов А.И. Разработка тепловой изоляции с упорядоченной структурой, основанной на ТПМП Неовиуса. *Вестник ИГЭУ*. 2022;6:58–68.
9. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R.K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices. *Adv. Eng. Mater.* 2019;21(10):1900524. <https://doi.org/10.1002/adem.201900524>
10. Schoen A.H. Reflections concerning triply-periodic minimal surfaces. *Interface Focus*. 2012;2(5):658–668. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2012.0023>
11. Abueidda D.W., Bakir M., Al-Rub R.K.A., Bergström J.S., Sobh N.A., Jasiuk I. Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Materials & Design*. 2017;122(9):255–267. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.018>
12. Карташов Э.М. Математические модели теплопроводности с двухфазным запаздыванием. *Инженерно-физический журнал*. 2016;89(2):338–349.
13. Карташов Э.М., Кротов Г.С. Аналитическое решение однофазной задачи Стефана. *Математическое моделирование*. 2008;20(3):77–86.
14. Карташов Э.М. Аналитические подходы к исследованиям нестационарной теплопроводности для частично ограниченных областей. *Теплофизика высоких температур*. 2020;58(3):402–411. <https://doi.org/10.31857/S0040364420030084>
15. Коренченко А.Е., Жукова А.А. Испарение жидкой лежащей капли в условиях вынужденной конвекции. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):57–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-57-66>
16. Глинский И.А., Зенченко Н.В., Мальцев П.П. Тепловое моделирование терагерцового квантового-каскадного лазера на основе наногетероструктуры GaAs/AlGaAs. *Rossiiskii Tekhnologicheskii Zhurnal*. 2016;4(3):27–36. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-3-27-36>
17. Hayashi K., Kishida R., Tsuchiya A., Ishikawa K. Superiority of triply periodic minimal surface gyroid structure to strut-based grid structure in both strength and bone regeneration. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2023;15(29):34570–34577. <https://doi.org/10.1021/acsmi.3c06263>
18. Chouhan G., Bala Murali G. Designs, advancements, and applications of three-dimensional printed gyroid structures: A review. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024;238(2):965–987. <https://doi.org/10.1177/09544089231160030>
19. Wakao N., Kagei S. *Heat and Mass Transfer in Packed Beds*. Taylor & Francis; 1982. 364 p.
20. Popov A.I. Heat Transfer Solver. V. 1. *Mendeley Data*. 2024. <https://www.doi.org/10.17632/kcn33tr7sb.1>
21. Bragin D.M., Popov A.I., Eremin A.V. The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2024;231:125863. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125863>

REFERENCES

1. Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V. Industrial application of heat transfer enhancement: The modern state of the problem (a Review). *Therm. Eng.* 2012;59(1):1–12. <https://doi.org/10.1134/S0040601512010119> [Original Russian Text: Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V. Industrial application of heat transfer enhancement: The modern state of the problem (a Review). *Teploenergetika*. 2012;1:3–14 (in Russ.).]
2. Solovev S.A., Soloveva O.V., Shakurova R.Z., Golubev Ya.P. Overview of the application of open cell foam heat exchangers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2024;26(1):165–194 (in Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194>
3. Kugatov P.V. Use of porous carbon materials as carriers for catalysts. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal = Bashkir Chemical Journal*. 2011;18(1):98–105 (in Russ.).
4. Testoevov N.A., Nagovitsin V.N., Permyakov M.Yu. Spacecraft application of three layer honeycomb structures. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal = Siberian Aerospace Journal*. 2016;17(1):200–211 (in Russ.).
5. Solovev S.A., Soloveva O.V., Shakurova R.Z. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2023;25(1):82–104 (in Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104>

6. Bragin D.M., Eremin A.V., Popov A.I., Shulga A.S. Method to determine effective thermal conductivity coefficient of porous material based on minimum surface Schoen's I-WP(R) type. *Vestnik IGEU*. 2023;2:61–68 (in Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2023.2.061-068>
7. Zinina S.A., Popov A.I., Eremin A.V. Numerical solution of the nonlinear problem of thermal conductivity in a porous plate with an ordered macrostructure. *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika = Herald of Tver State University. Ser.: Appl. Math.* 2024;1:53–67. <https://doi.org/10.26456/vtpmk702>
8. Popov A.I. Development of thermal insulation with ordered structure based on Neovius TPMS. *Vestnik IGEU*. 2022;6:58–68 (in Russ.).
9. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R.K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices. *Adv. Eng. Mater.* 2019;21(10):1900524. <https://doi.org/10.1002/adem.201900524>
10. Schoen A.H. Reflections concerning triply-periodic minimal surfaces. *Interface Focus*. 2012;2(5):658–668. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2012.0023>
11. Abueidda D.W., Bakir M., Al-Rub R.K.A., Bergström J.S., Sobh N.A., Jasiuk I. Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Materials & Design*. 2017;122(9):255–267. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.018>
12. Kartashov E.M. Mathematical models of heat conduction with two-phase lag. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2016;89(2):346–356. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1385-9>
[Original Russian Text: Kartashov E.M. Mathematical models of heat conduction with two-phase lag. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2016;89(2):338–349 (in Russ.).]
13. Kartashov E.M., Krotov G.S. Analytical solution of single-phase Stefan problem. *Math. Models Comput. Simul.* 2009;1(2):180–188. <https://doi.org/10.1134/S2070048209020021>
[Original Russian Text: Kartashov E.M., Krotov G.S. Analytical solution of single-phase Stefan problem. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2008;20(3):77–86 (in Russ.).]
14. Kartashov E.M. Analytical approaches to the analysis of unsteady heat conduction for partially bounded regions. *High Temp.* 2020;58(3):377–385. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20030086>
[Original Russian Text: Kartashov E.M. Analytical approaches to the analysis of unsteady heat conduction for partially bounded regions. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2020;58(3):402–411 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0040364420030084>]
15. Korenchenko A.E., Zhukova A.A. Evaporation of a liquid sessile droplet subjected to forced convection. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):57–66 <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-57-66>
16. Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Maltsev P.P. Thermal modelling of terahertz Quantum-cascade laser based on nanoheterostructures GaAs/AlGaAs. *Rossiiskii Tekhnologicheskii Zhurnal*. 2016;4(3):27–36 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-3-27-36>
17. Hayashi K., Kishida R., Tsuchiya A., Ishikawa K. Superiority of triply periodic minimal surface gyroid structure to strut-based grid structure in both strength and bone regeneration. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2023;15(29):34570–34577. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c06263>
18. Chouhan G., Bala Murali G. Designs, advancements, and applications of three-dimensional printed gyroid structures: A review. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024;238(2):965–987. <https://doi.org/10.1177/09544089231160030>
19. Wakao N., Kagei S. *Heat and Mass Transfer in Packed Beds*. Taylor & Francis; 1982. 364 p.
20. Popov A.I. Heat Transfer Solver. V. 1. *Mendeley Data*. 2024. <https://www.doi.org/10.17632/kcn33tr7sb.1>
21. Bragin D.M., Popov A.I., Eremin A.V. The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2024;231:125863. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125863>

Об авторах

Попов Андрей Игоревич, к.т.н., старший преподаватель, кафедра «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244). E-mail: popov.ai@samgtu.ru. Scopus Author ID 57216363622, SPIN-код РИНЦ 5560-6869, <https://orcid.org/0000-0001-5014-8167>

Еремин Антон Владимирович, д.т.н., доцент, проректор по интеграционным проектам, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244). E-mail: a.v.eremin@list.ru. Scopus Author ID 56395547000, ResearcherID D-6936-2014, SPIN-код РИНЦ 3892-0775, <https://orcid.org/0000-0002-2614-6329>

About the Authors

Andrey I. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Industrial Heat Power Engineering, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya ul., Samara, 443100 Russia). E-mail: popov.ai@samgtu.ru. Scopus Author ID 57216363622, RSCI SPIN-code 5560-6869, <https://orcid.org/0000-0001-5014-8167>

Anton V. Eremin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department of Industrial Heat Power Engineering, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya ul., Samara, 443100 Russia). E-mail: a.v.eremin@list.ru. Scopus Author ID 56395547000, ResearcherID D-6936-2014, RSCI SPIN-code 3892-0775, <https://orcid.org/0000-0002-2614-6329>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 621.372.8
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-104-118>
EDN ZTAAYP



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование теплофизических процессов в нефтяном пласте при прогреве в остановленной скважине

С.Е. Савотченко^{1, 2, @}, В.А. Захаров²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, 117997 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: savotchenkose@mail.ru

• Поступила: 15.07.2024 • Доработана: 08.12.2024 • Принята к опубликованию: 23.07.2025

Резюме

Цели. Выявление закономерностей теплофизических процессов в пластах является важной и актуальной задачей нефтедобывающей отрасли. Одним из способов повышения эффективности нефтеотдачи в условиях трудноизвлекаемых запасов является тепловое воздействие на пласт. При нагреве остановленной скважины в пласте формируются нестационарные тепловые потоки, поэтому в вопросах оптимизации добывающих технологий таких процессов широко применяется построение адекватных математических моделей. Цель работы – развитие возможностей применения методов математического моделирования и установление на их основе зависимостей распределения нестационарных полей теплофизических характеристик в пласте при нагревании скважины от ее параметров и свойств сред.

Методы. Используются теория тепло- и массопереноса, методы математической физики, аналитические и численные методы, алгоритмы, методы компьютерного моделирования и разработки приложений, современные языки программирования и их библиотеки.

Результаты. Проведено теоретическое описание пласта, насыщенного нефтью, водой и парогазовой смесью. Получена замкнутая система уравнений тепло- и массопереноса при учете диффузионно-капельных и тепловых потоков и фазовых превращений. Сформулирована математическая постановка модели, представляющая собой начально-краевую задачу для уравнений, связывающих температуру, насыщенность и давление компонентов насыщающей жидкости в пласте. Разработаны численные алгоритмы решения такой задачи и проведена их программная реализация. Разработано приложение для компьютерной реализации модели с удобной визуализацией результатов расчетов, состоящей из нескольких компонентов (модулей). С использованием разработанного программного обеспечения проведены численные эксперименты для изучения того, как различные факторы, такие как свойства скелета пласта и насыщающей жидкой фазы, характеристики нагревателя, влияют на теплофизические процессы в пласте.

Выводы. Разработанная модель позволяет наглядно описать нестационарные распределения теплофизических характеристик, формируемых тепловым и диффузионно-капельным потоками в пласте в процессе прогрева остановленной скважины. Полученные результаты расширяют представления о закономерностях теплофизических процессов и свойствах насыщающей фазы в пласте при тепловом воздействии.

Ключевые слова: теплофизические процессы, теплоперенос, массоперенос, тепловой поток, диффузионно-капельный поток, уравнение теплопроводности, уравнение теплопереноса, теплопроводность, тепловое воздействие на пласт, прогрев скважины

Для цитирования: Савотченко С.Е., Захаров В.А. Моделирование теплофизических процессов в нефтяном пласте при прогреве в остановленной скважине. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):104–118. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-104-118>, <https://www.elibrary.ru/ZTAAYP>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Modeling of thermophysical processes in an oil reservoir during heating in a stopped well

Sergey E. Savotchenko^{1, 2, @}, Vasily A. Zakharov²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, 117997 Russia

@ Corresponding author, e-mail: savotchenkose@mail.ru

• Submitted: 15.07.2024 • Revised: 08.12.2024 • Accepted: 23.07.2025

Abstract

Objectives. An important and urgent task of the oil producing industry is the identification of patterns of thermophysical processes in reservoirs. One approach to improving the efficiency of oil recovery in conditions of hard-to-recover reserves involves thermal action on the reservoir. The construction of mathematical models for describing such processes to optimize production technologies is based on the formation of nonstationary heat flows in the reservoir when a stopped well is heated. The application of mathematical modeling methods considered in the work forms a basis for calculating the distribution dependencies of nonstationary fields of thermophysical characteristics in the reservoir when heating the well to its parameters and the properties of the environments.

Methods. The work is based on heat- and mass-transfer theory along with mathematical physics, analytical and numerical methods, as well as algorithms, computer modeling approaches, and the development of applications using modern programming languages and their libraries.

Results. A formation saturated with oil, water, and a steam–gas mixture is theoretically described. A closed system of heat and mass transfer equations is obtained taking into account diffusion-droplet and heat flows and phase transformations. A formulated mathematical statement of the model comprises an initial–boundary value problem for equations relating the temperature, saturation, and pressure of the components of the saturating fluid in the formation. Numerical algorithms for solving are developed and their software implementation carried out. An application developed for computer implementation of the model provides convenient visualization of the calculation results consisting of several components (modules). Numerical experiments were carried out using the developed software to study how various factors, such as the properties of the formation sketch and the saturating liquid phase and heater characteristics, affect the thermophysical processes in the formation.

Conclusions. The developed model can be used to clearly describe nonstationary distributions of thermophysical characteristics formed by thermal and diffusion-droplet flows in the reservoir during heating of a shut-up well. The obtained results expand current understandings of the regularities of thermophysical processes and the properties of the saturating phase in the reservoir under thermal influence.

Keywords: thermophysical processes, heat transfer, mass transfer, heat flow, diffusion-droplet flow, heat equation, heat transfer equation, thermal conductivity, thermal impact on the formation, oil well heating

For citation: Savotchenko S.E., Zakharov V.A. Modeling of thermophysical processes in an oil reservoir during heating in a stopped well. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):104–118. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-104-118>, <https://www.elibrary.ru/ZTAAYP>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка математических моделей теплофизических процессов в пласте остается одной из актуальных задач, стоящих в нефтедобывающей отрасли и направленных на повышение эффективности нефтеотдачи, особенно в условиях трудно извлекаемых запасов [1]. Поскольку тепловое воздействие на пласт является одним из эффективных способов увеличения нефтеотдачи в таких условиях [2–4], то получение различной информации о закономерностях теплопереноса в пласте на основе математических моделей является важным направлением исследований [5, 6]. Нестационарные тепловые потоки в пласте формируются при нагреве остановленной скважины. Когда тепловое воздействие заканчивается, начинается процесс остывания пласта. Необходимость описания таких процессов обусловлена потребностями максимизации выработки нефти [7, 8]. Для разработки эффективных стратегий необходимо понимать динамику изменения температуры, насыщенности и давления в пласте [9]. Основным инструментом таких исследований является математическое моделирование, позволяющее построить модель, учитывающую сложное взаимодействие физических процессов, и использование которой может помочь оптимизировать процесс добычи нефти [10, 11]. Формулировка математических моделей теплофизических процессов основана на системе уравнений теплопереноса, использующихся во многих теплофизических задачах и теории теплопроводности [12, 13].

Математическому моделированию теплофизических процессов, происходящих в нефтедобывающих скважинах и пластах, посвящено много работ [14–16]. Такие исследования активно продолжают в течение последних лет с использованием численных методов и компьютерного моделирования [17, 18]. В частности, в [19] изучены закономерности неизотермической фильтрации газа в скважине в процессе создания низкотемпературных газовых залежей, когда термобарические условия пласта приближаются к равновесным условиям гидратообразования. Рассматриваемый метод позволяет прогнозировать исследование и эксплуатацию скважин при разработке низкотемпературных газовых залежей, определять динамику возможного

гидратообразования в призабойной зоне и влияние этого процесса на работу скважин.

В [20] проведено численное исследование температурного поля в многопластовой скважине при движении газированной нефти, где учитывались эффекты Джоуля – Томсона и теплоты разгазирования. Было установлено, что положение границы области разгазирования нефти в стволе скважины можно оценить с помощью рассчитанного распределения температуры.

В [21] предложена и исследована аналитическими методами модель, описывающая формирование температурного поля в пласте при совместном притоке к скважине пластовой воды и газированной нефти. Было установлено, что время наблюдения величины максимального снижения температуры определяется радиусом зоны разгазирования и скоростью конвективного теплопереноса (что зависит от удельного дебита нефти и воды), и это время может быть использовано для оценки таких параметров. Показано, что с ростом водонасыщенности закономерно снижается влияние охлаждающего эффекта разгазирования нефти.

В [22] установлены условия наблюдения немонотонного изменения температуры во времени, когда на выходе газожидкостной смеси из пористой среды в течение некоторого времени наблюдается снижение температуры, затем ее рост.

В [23] предложена математическая модель, которая описывает формирование температурного поля в радиально-симметричном нагреваемом пласте с высоковязкой нефтью через горизонтальную скважину. Авторами продемонстрирована возможность дальнейшей эксплуатации скважины для добычи нефти с пониженной вязкостью. Сформулирована математическая постановка на основе системы уравнений, описывающих процесс теплопереноса для оценки характерных диапазонов проникновения фильтрационных и температурных волн для рассматриваемых периодов времени.

В [24] приведены алгоритм и программный комплекс расчета и моделирования процесса вытеснения нефти при нагнетании горячей воды, позволяющие получить температурные поля в пласте в различные моменты времени, а также определять нефтеотдачу пласта с учетом влияния тепловых характеристик жидконасыщенных горных пород.

В [25] предложены математическая модель пароциклического воздействия на пласт, учитывающая массовую долю пара в теплоносителе и уравнение состояния для воды. Модель основана на использовании соотношений теплового баланса для каждого этапа пароциклического воздействия. В рамках предложенной модели температура пара в продуктивном интервале, начальная пластовая температура и тепловой поток определялись по данным кратковременных динамических температурных исследований, а расход нефти – по формуле Дюпюи для зонально-неоднородного пласта. В результате моделирования авторами определены оптимальные времена этапов пароциклического воздействия и максимальная накопленная добыча нефти. Также показано, что оптимальное время закачки теплоносителя в пласт и время выдержки скважины на конденсацию пара возрастают при увеличении мощности пласта, расхода теплоносителя и массовой доли пара в нем.

Важность проводимых исследований теплофизических процессов в пластах и скважинах обусловлена тем, что понимание их закономерностей ложится в основу технологий скважинных методов теплового воздействия на пласт, направленных на повышение эффективности извлечения нефти. Для описания нестационарных распределений температурного поля и давления в пластах и скважинах широко применяются численные методы и компьютерное моделирование. Однако, несмотря на глубокую разработанность данной проблемы, остается незатронутым ряд вопросов, требующих более детального изучения методами математического моделирования.

В данной работе представлены результаты разработки и компьютерной реализации модели, которая описывает нестационарный процесс распределения тепловых потоков в пласте при постоянном тепловом воздействии в остановленной скважине (в которой добыча временно прекращена). На основе разработанной компьютерной реализации модели изучены закономерности и механизмы влияния теплофизических параметров пласта на нестационарное распределение температуры, насыщенности и давления в нем.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИ

В элементе объема пласта, насыщенного нефтью, водой и парагазовой смесью, находящимися в термодинамическом равновесии, в начальный момент времени температура T , давление p и насыщенность θ распределены равномерно. Если пренебречь сжимаемостью скелета пласта и гравитационными эффектами, то уравнение неразрывности для каждого

компонента насыщающей жидкой фазы можно записать в виде [16, 26–30]:

$$m \frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = -\operatorname{div} J_{\theta} + I, \quad (1)$$

где m – пористость среды, ρ – плотность компонента, t – время, θ – объемная насыщенность компонентом смеси элемента объема пласта:

$$\theta = \frac{V}{mV_e},$$

V – объем компонента насыщающей жидкой фазы в элементе объема пласта; V_e – объем элемента пласта; J_{θ} – диффузионно-капельная составляющая массовой плотности потока, переносимого молекулярной теплопроводностью элемента объема пласта; I – объемная мощность источника компонента жидкости.

В соответствии с законом Фика диффузионно-капельная составляющая массовой плотности потока представима в виде:

$$J_{\theta} = -a(\nabla\theta + \delta\nabla T), \quad (2)$$

где a – коэффициент диффузионно-капельного массопереноса компонента насыщающей жидкой фазы, δ – ее термоградиентный коэффициент, ∇ – символ набла ($\nabla\theta$ – градиент насыщенности, ∇T – градиент температуры).

Мощность источника представима в виде:

$$I = \varepsilon m \frac{\partial\theta}{\partial t}, \quad (3)$$

где ε – коэффициент фазового перехода, представляющий собой отношение приращения насыщенности компонента жидкости, полученное при фазовом переходе, к полному приращению насыщенности компонента жидкости, учитывающее также и диффузионные, капельные и конвективные процессы.

Уравнение тепломассопереноса с учетом (3) можно записать в виде [16, 26–30]:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = -\operatorname{div} J + \varepsilon q m \frac{\partial\theta}{\partial t}, \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость элемента объема пласта, J – плотность потока тепла, q – удельная теплота фазового перехода.

В соответствии с законом Фурье плотность потока тепла представима в виде:

$$J = -\lambda \nabla T, \quad (5)$$

где λ – эффективная теплопроводность элемента объема пласта.

Необходимо к приведенным уравнениям добавить уравнение состояния смеси [16, 26–29]:

$$\rho\theta = \frac{pM}{zRT}(1 + \theta), \quad (6)$$

где M – молярная масса смеси, R – универсальная газовая постоянная, z – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение парогазовой смеси от идеального газа.

С точностью до членов 1-го порядка малости [16]:

$$\nabla(\rho\theta) \approx \rho_e \beta \frac{\partial p}{\partial t},$$

где β – коэффициент упругости парогазовой смеси, ρ_e – плотность скелета пласта, и можно записать уравнение неразрывности, замыкающее систему уравнений для температуры и насыщенности, в виде:

$$\beta \frac{\partial p}{\partial t} = -\varepsilon \frac{\rho}{\rho_e} \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (7)$$

Система уравнений (1)–(7) составляет теоретическую основу моделирования теплофизических процессов в пласте.

Следует отметить, что значения введенных выше коэффициента диффузионно-капельного массопереноса, термоградиентного коэффициента, коэффициента фазового перехода определяются из экспериментов. В общем случае эти коэффициенты могут зависеть как от температуры, так и от насыщенности. Однако существуют экспериментально установленные диапазоны температур и насыщенностей для ряда водонасыщенных определенных сред (пески, песчаники, глины, керамики), когда указанные коэффициенты являются практически постоянными.

К примеру, в интервале температур 293–423 К коэффициент фазового перехода ε является постоянным [16]. При увеличении насыщенности в интервале 0.3–0.4 его значение линейно уменьшается от 1.0 до 0.3, но при дальнейшем увеличении насыщенности он остается постоянным. Термоградиентный коэффициент δ ведет себя полностью аналогично коэффициенту фазового перехода в зависимости от температуры и насыщенности, в частности, его стабилизированное значение в ряде сред составляет $(0.2–0.5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Коэффициент диффузионно-капельного массопереноса a в рассматриваемом температурном диапазоне возрастает примерно в 1.5 раза в одних средах (песках, песчаниках), однако в ряде других (керамике, глинах) он от температуры не зависит. Его стабилизированные значения в песчаных средах составляют $(1.8–8.8) \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$, а в керамике и глинах – $(4.4–8.9) \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$.

Допущение о постоянности этих коэффициентов при теоретическом моделировании справедливо в случае малоинтенсивных процессов, при которых за малые промежутки времени температура и насыщенности меняются незначительно. Возможен также такой подход, при котором в ходе построения модели изучаемые процессы тепло- и массопереноса разбиваются на отдельные участки, в каждом из которых рассматриваемые коэффициенты считаются постоянными.

2. ФОРМУЛИРОВКА МОДЕЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе будем рассматривать стационарное тепловое воздействие на пласт скважинным нагревателем. Будем рассматривать пласт как непрерывную, однородную, термически изотропную среду с постоянными эффективными значениями теплофизических коэффициентов для расчета распространения тепла в пласте при нагреве остановленной скважины. Если при описании теплофизических процессов не учитывать неоднородность пласта, процессы испарения и диффузионно-капиллярного массопереноса насыщающей среды, то могут наблюдаться значительные расхождения между снятыми со скважин наблюдаемыми данными и расчетными значениями. Были отмечены заметные расхождения между расчетными температурами на забое скважины и значениями, зафиксированными на месторождениях. Отмечалось, что наблюдаемые различия в дебите скважины и периоде охлаждения пласта после обработки между расчетными и фактическими значениями, которые, как правило, оказывались больше расчетных. Следовательно, влияние фазовых переходов и диффузионно-капиллярных эффектов на распространение тепла по всему нагреваемому пласту является существенным в ряде случаев.

Предлагается модель однородного термически изотропного коллектора с бесконечной толщиной и простиранием, доступ к которому осуществляется через скважину нулевого диаметра. Считаем, что в скважину помещен нагреватель с нулевым диаметром и конечной длиной h . Пусть однокомпонентная жидкость, находящаяся в термодинамическом равновесии с содержащимся в ней паром и неразстворимым в жидкости газом, заполняет резервуар до насыщения. Скважина считается остановленной и ее начальная температура (T_0), давление (p_0) и насыщенность жидкостью (θ_0) после этого равномерно распределяются.

На стенке нагревателя в начальный момент времени $t = 0$ скачкообразно формируется удельный тепловой поток N , значение которого затем поддерживается постоянным. Вследствие формирования

такого стационарного потока температура T повышается, и жидкость начинает испаряться. В свою очередь, повышение температуры и интенсификация испарения приводят к росту парциального и общего давления p и понижению насыщенности жидкой фазы θ .

При формулировке модели учитываются также следующие допущения. Пласт имеет высокую степень насыщенности. Диффузионно-капиллярный массоперенос жидкости и пара существенно преобладает над конвективным переносом, вследствие чего последним можно пренебречь. Коэффициенты диффузионно-капиллярного массопереноса можно считать постоянными в течение всего времени нагрева и однородно распределенными всюду в рассматриваемой области формирования тепловых потоков. Также будем считать, что теплопотери выше и ниже интервала установки нагревателя можно пренебречь в силу их малости по сравнению с мощностью поддерживаемого теплового потока. Длина нагревателя считается настолько большой, что его размеры оказывают влияние на распространение тепла в средней части интервала прогрева. Сформулированные допущения предполагают, что реализуется нагрев мелкопористого коллектора. Также можно считать, что в средней части интервала нагрева рассматриваемые теплофизические характеристики радиально и осесимметрично распределены в плоскости, что фактически сводит математическую постановку задачи к одномерной, в которой необходимо определить их нестационарные радиальные распределения.

Такая модель позволяет более точно прогнозировать распространение тепла в коллекторе, в т.ч. фазовые переходы и диффузионно-капиллярные эффекты. В результате можно с большей точностью оценить температурное поле, дебит скважины после обработки и продолжительность охлаждения пласта.

В результате таких допущений теплофизические характеристики пласта можно считать зависящими от радиуса r и времени t : $T = T(r, t)$, $p = p(r, t)$, $\theta = \theta(r, t)$. Их значения в начальный момент времени считаются постоянными: $T(r, 0) = T_0$, $p(r, 0) = p_0$, $\theta(r, 0) = \theta_0$.

Для удобства математической формулировки модели введем такие безразмерные параметры, как безразмерная температура:

$$T^* = \frac{T - T_0}{T}$$

безразмерная насыщенность жидкой фазы:

$$\theta^* = \frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0};$$

безразмерное давление, возникающее в результате испарения насыщающей жидкости:

$$p^* = \frac{p - p_0}{p_0};$$

безразмерный радиус:

$$R = \frac{r}{h};$$

безразмерное время (число Фурье):

$$Fo = \frac{\chi t}{h^2},$$

где коэффициент температуропроводности (считается постоянной величиной):

$$\chi = \frac{\lambda}{c\rho_e}.$$

С учетом принятых допущений, приведенных выше, система уравнений тепло- и массопереноса (1), (4), (7) может быть записана в безразмерном виде:

$$\frac{\partial T^*}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T^*}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T^*}{\partial R} + \varepsilon \Pi_1 \frac{\partial \theta^*}{\partial R}, \quad (8)$$

$$\frac{1}{Lu} \frac{\partial \theta^*}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta^*}{\partial R} + \Pi_2 \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T^*}{\partial R} \right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial Fo} = - \frac{\varepsilon}{\Pi_3} \frac{\partial \theta^*}{\partial Fo}, \quad (10)$$

где $Fo > 0$, $R > 0$ – безразмерные время и радиус, а Π_1 , Π_2 , Π_3 , Lu – безразмерные коэффициенты, описанные ниже. Эти величины характеризуют влияние массопереноса на распределение тепловых потоков и наоборот – влияние температуры на распределение насыщенности. В частности, критерий Лыкова, определяемый как

$$Lu = \frac{a}{\chi\rho_e},$$

характеризует интенсивность диффузионно-капельного массопереноса относительно диффузионного переноса тепла. Если $Lu > 1$, то тепловое поле за счет диффузионно-капельного массопереноса распространяется быстрее, чем за счет молекулярной теплопроводности. В водонасыщенных песчаных и глинистых средах его значения находятся в диапазоне 0–3, а нефтеводонасыщенных песках $Lu \approx 1$.

Коэффициент Π_1 , определяемый как

$$\Pi_1 = \frac{mqr\Delta\theta}{c\Delta T},$$

характеризует соотношение между количествами теплоты, затраченной на испарение насыщающей

жидкости и на нагревание пласта (ΔT и $\Delta \theta$ – малые изменения температуры и насыщенности в элементе объема пласта, соответственно). В водонасыщенных песчаных и глинистых средах его значения находятся в диапазоне 0.3–12.

Коэффициент Π_2 , определяемый как

$$\Pi_2 = \delta \frac{\Delta T}{\Delta \theta},$$

характеризует прирост насыщенности $\Delta \theta$ за счет изменения температуры на величину ΔT . В водонасыщенных песчаных и глинистых средах его значения находятся в диапазоне 0.1–0.9.

Коэффициент Π_3 , определяемый как

$$\Pi_3 = \beta \frac{\rho_e \Delta p}{\rho \Delta \theta},$$

характеризует прирост насыщенности $\Delta \theta$ за счет изменения давления на величину Δp . В водонасыщенных песчаных и глинистых средах его значения находятся в диапазоне 0.2–0.7.

Уравнения (8)–(10) дополняются начальными условиями:

$$T^*|_{Fo=0} = 0, \quad \theta^*|_{Fo=0} = 0, \quad p^*|_{Fo=0} = 0, \quad (11)$$

а также краевыми условиями на оси скважины:

$$\left. \frac{\partial T^*}{\partial R} \right|_{R=0} = -\frac{N}{2\pi\lambda}, \quad \left. \frac{\partial \theta^*}{\partial R} \right|_{R=0} = 0, \quad (12)$$

и на бесконечности:

$$T^*|_{R \rightarrow \infty} = 0, \quad \theta^*|_{R \rightarrow \infty} = 0, \quad p^*|_{R \rightarrow \infty} = 0. \quad (13)$$

Здесь тепловой поток на оси нагревателя считается постоянным, так что $N/\lambda = \text{const}$. В (12) условие для производной насыщенности соответствует тому, что на оси скважины поддерживается постоянно сохраняющееся максимальное значение насыщенности.

Таким образом, начально-краевая задача (8)–(13) представляет собой математическую формулировку модели теплофизических процессов в пласте нефти при прогреве остановленной скважины. Для ее решения разработан численный алгоритм и реализующий его программный комплекс (приложение).

3. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ

Для компьютерной реализации модели разработан алгоритм решения начально-краевой задачи для системы уравнений (8)–(10) с граничными условиями (11)–(13) с использованием конечно-разностных аппроксимаций частных производных.

Реализовывались как явная, так и неявная схема с анализом условий устойчивости.

Компьютерная реализация модели проведена на языке программирования Python, с использованием библиотек NumPy (для работы с массивами данных и решения системы уравнений), Dash (для визуализации результатов расчетов). Разработанное приложение состоит из следующих основных компонентов: модуль ввода данных, модуль решения системы уравнений, модуль вывода и визуализации решений.

Модуль решения системы дифференциальных уравнений, описывающий тепловое воздействие на пласт, реализуется с использованием конечно-разностных схем.

Приложение также содержит подсистему обработки данных, необходимую для преобразования данных, полученных из модуля решения уравнений. Вначале генерируются явный и неявный объекты для представления стратегий решения уравнений. Далее для каждого объекта вызывается метод решения, который, использует подходящую технику для решения системы уравнений. В программе имеется возможность вывода графиков, отображающих результаты расчетов по явной и неявной схемам. На каждом графике показаны кривые температуры, насыщенности и давления. Переключение между изучением кривых и сопоставлением данных для схем позволяет пользователю лучше понять процессы, происходящие при тепловом воздействии на пласт.

С помощью элементов управления приложения пользователь может просматривать и анализировать результаты решения уравнений с использованием явного и неявного методов в режиме реального времени. Такие элементы позволяют устанавливать несколько констант, включая шаги и ограничения интегрирования для временных и пространственных переменных. Используя выпадающий список, пользователь может выбрать выходные функции (температуру, насыщенность и давление), а интерактивные «ползунки» позволяют настраивать значения управляющих параметров. Также можно выбрать конкретное значение для другой переменной и выбрать, по какой переменной (временной или пространственной) будет строиться график распределения теплофизических характеристик. Программа предоставляет пользователю гибкость в настройке параметров, что достигается за счет размещения панели с элементами управления в левой части главной страницы, и того, что все настройки сосредоточены в одном экранном месте.

Набор «ползунков» и выпадающих меню является компонентом панели настроек. При желании можно указать переменную (временную или

географическую), которая будет служить основой для оси абсцисс графиков. Имеется возможность использовать «ползунки» для изменения числовых значений 3 управляющих параметров, которые влияют на процесс. Другой «ползунок» позволяет выбрать значение пространственной или временной переменной для визуализации. Инструмент интерфейса приложения позволяет изучить поведение распределения (температуры, насыщенности или давления) на основе временных или пространственных переменных. Для достижения этой цели может быть выведен график со значениями исследуемой функции, отложенными по оси ординат, и временной или пространственной переменной, отложенной по оси абсцисс. В этом случае «ползунок» на панели настроек можно использовать для фиксации определенного значения другой переменной. Выводимые графики показывают, как изменяются функции давления, насыщенности и температуры в зависимости от пространственной переменной, когда временная переменная зафиксирована. Это позволяет сосредоточиться на изучении того, как одна переменная, такая как время или пространственная координата, влияет на фиксированные параметры, которые определяются другой.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате численного моделирования с помощью разработанного программного комплекса получены кривые радиального распределения (рис. 1)

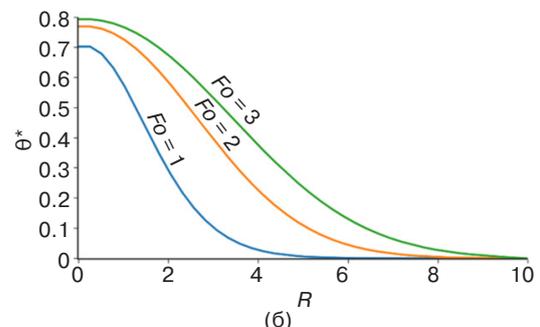
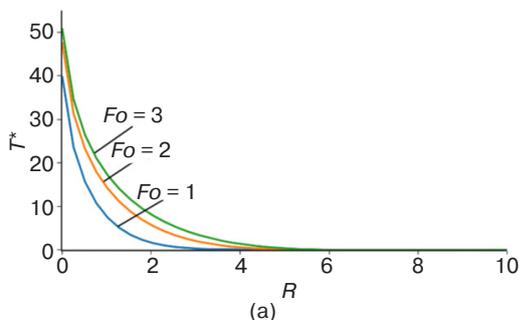


Рис. 1. Радиальные распределения температуры (а) и насыщенности (б) при $\Pi_1 = 10$, $\Pi_2 = 0.1$, $\Pi_3 = 0.5$, $Lu = 1$, $e = 0.28$, $l = 2.49$ Вт/(м·К), $N = 1000$ Вт/м

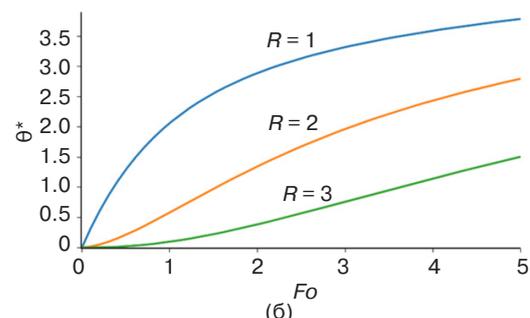
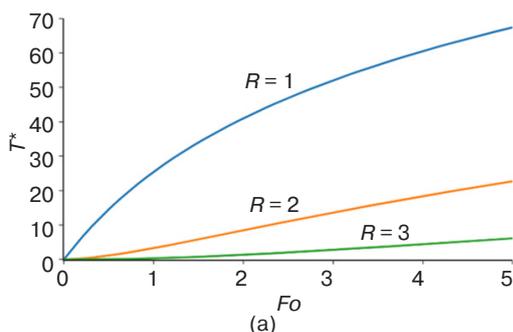


Рис. 2. Кривые кинетики температуры (а) и насыщенности (б) при значениях параметров, как на рис. 1

и временные зависимости (рис. 2) температуры и насыщенности (в силу уравнения (10) отдельный анализ давления не имеет смысла, т.к. соответствующие зависимости аналогичны насыщенности).

Зависимости этих величин от радиуса (рис. 1) позволяют выявить особенности пространственного распределения теплофизических характеристик. В частности, с увеличением расстояния от центра температура, насыщенность и давление уменьшаются с постепенным замедлением. Однако эти радиальные зависимости температуры и насыщенности носят различный характер. Температура достаточно быстро спадает при малых радиусах. Затем ее спад замедляется и постепенно прекращается, достигая уже при сравнительно небольших значениях отношения радиуса к длине нагревателя равновесного значения. Насыщенность (и давление, по аналогии) при малых радиусах начинает медленно убывать, затем быстро спадать, и наконец, на больших расстояниях она достигает равновесного значения и перестает меняться. Данное различие обусловлено тем, что тепловой поток на оси нагревателя поддерживается постоянным, а градиент насыщенности на этой оси отсутствует.

Зависимости этих величин от времени (рис. 2) позволяют выявить особенности кинетики теплофизических процессов. В частности, с течением времени температура, насыщенность и давление растут с постепенным замедлением. Однако при различных радиусах эти зависимости носят различный

характер. При малых радиусах и малых временах наблюдается резкое повышение температуры, насыщенности и давления, затем скорость роста этих величин быстро замедляется. При больших значениях радиуса температура, насыщенность и давление сначала практически не меняются, а затем начинают медленно расти, постепенно набирая скорость роста. Таким закономерностям соответствуют выпуклые вверх участки кинетических кривых (при $R = 1$) и вогнутые (при $R = 2$ и 3) на рис. 2.

Параметры Π_1 и Π_2 являются наиболее важными в рассматриваемой модели. Они влияют на функции насыщенности θ^* и температуры T^* . Варьирование этих параметров фактически означает перебор различных сред залегания пласта. Поэтому они выбираются в качестве управляющих теплофизических параметров модели, позволяющих оценить характеристики процессов в различных грунтах.

Если принять $\Pi_1 = \Pi_2 = 0$, то это будет соответствовать отсутствию учета массопереноса в теплофизической задаче. В [16] указано, что учет массопереноса приводит к возрастанию радиуса теплового влияния, что, в свою очередь, приводит к более высоким расчетным значениям продолжительности остывания пласта и приросту дебита после обработки. В соответствии с условием сохранения теплового баланса увеличение радиуса теплового влияния приводит к снижению температуры на стенке и в непосредственной близости от скважины.

Передача тепла через пористую среду контролируется параметром Π_1 , отражающим влияние градиента насыщенности на изменение температуры. Он участвует в уравнении (8), описывающем изменение температуры. Увеличение скорости изменения температуры может быть результатом увеличения теплового потока, проходящего через пористую среду, о чем свидетельствует более высокое значение Π_1 . Влияние градиента насыщения на изменение температуры тем сильнее, чем выше значение Π_1 .

На величину насыщенности более существенно влияет параметр Π_2 . Кроме того, Π_2 влияет на температурные изменения. Коэффициент Π_2 , связанный

с влиянием температурного градиента на изменение насыщенности, входит в уравнение для насыщенности (9). Влияние температурного градиента на изменение насыщенности тем больше, чем выше значение Π_2 .

Таким образом, в модели параметры Π_1 и Π_2 определяют степень взаимосвязи температуры T^* и насыщенности θ^* . При моделировании охлаждения после выключения нагревателя они позволяют изменять и регулировать степень связи между этими 2 переменными.

Результаты проведенной серии численных экспериментов позволили выявить закономерности влияния управляющих параметров на пространственные распределения и кинетики теплофизических характеристик. Влияние параметра Π_1 на температуру и насыщенность проиллюстрировано на рис. 3 и 4. Повышение значения Π_1 приводит к более ощутимому изменению распределения насыщенности по радиальной координате, чем температуры. С точки зрения структуры модели это связано с тем, что Π_1 является частью коэффициента в уравнении (1) для производной от насыщенности θ^* по радиальной координате R . Радиальное распределение насыщенности смещается более плавно на больших расстояниях от скважины и более круто вблизи нее (малые значения радиальной координаты R) по мере увеличения Π_1 . Градиент насыщения оказывает большее влияние на колебания температуры при увеличении Π_1 , что может привести к более быстрому изменению температуры в областях с сильным градиентом насыщенности. С физической точки зрения перебор значений Π_1 соответствует перебору различных месторождений, в которых отличаются плотность и пористость грунта и нефти.

Результаты моделирования, приведенные на рис. 3, показывают, что тысячекратное увеличение значения параметра Π_1 приводит к очень незначительному снижению температуры (рис. 3а) и незначительному повышению насыщенности (рис. 3б) в зависимости от расстояния от оси нагревателя в фиксированный момент времени. Следовательно,

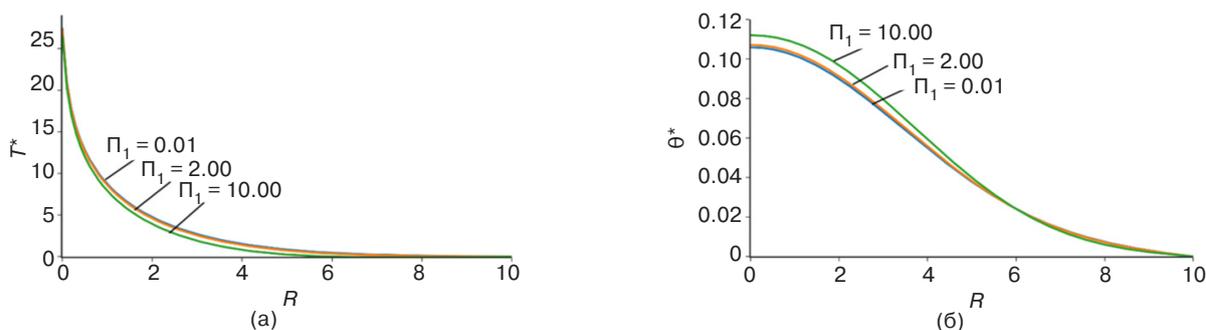


Рис. 3. Радиальные распределения температуры (а) и насыщенности (б) при различных значениях параметра Π_1 и фиксированных $Fo = 2$ (остальные значения параметров – такие же, как на рис. 1)

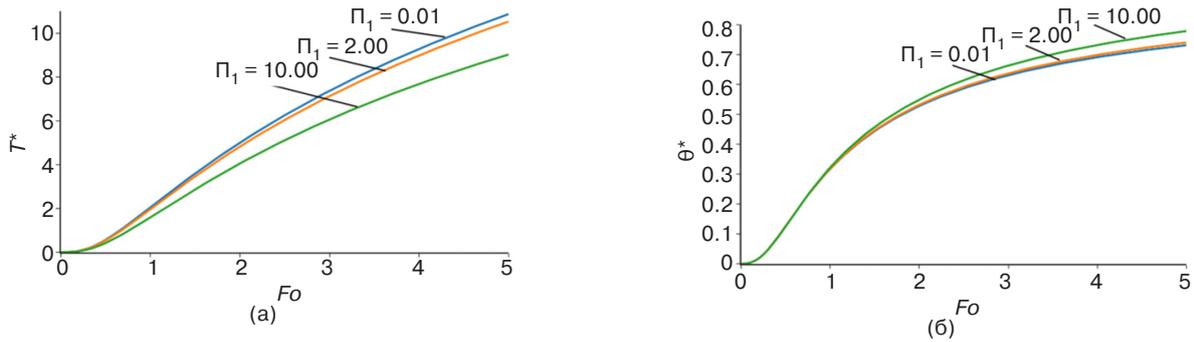


Рис. 4. Кривые кинетики температуры (а) и насыщенности (б) при различных значениях параметра Π_1 и фиксированных $R = 2$ (остальные значения параметров – такие же, как на рис. 1)

полученные результаты свидетельствуют о том, что пористость и плотность грунтов и жидкой фазы пласта слабо влияют на пространственно-радиальное распределение температуры, насыщенности и давления в пласте.

Полученные в результате моделирования кривые кинетики, приведенные на рис. 4, показывают, что тысячекратное увеличение значения параметра Π_1 приводит к незначительному снижению температуры (рис. 4а) и незначительному повышению насыщенности (рис. 4б) на фиксированном расстоянии от оси нагревателя. Разница увеличивается с ростом времени. Следовательно, влияние пористости и плотности грунтов и жидкой фазы пласта на кинетику температуры, насыщенности и давления в пласте начинает быть ощутимым при больших временах.

С физической точки зрения перебор значений Π_2 соответствует перебору различных значений термоградиентного коэффициента δ , который характеризует перенос (поток) влаги в жидкой фазе нефтеносного пласта. Результаты моделирования, приведенные на рис. 5, показывают, что тысячекратное увеличение значения параметра Π_2 приводит к очень незначительному снижению температуры (рис. 5а), но к существенному повышению насыщенности и давления (рис. 5б) в зависимости от расстояния от оси нагревателя в фиксированный

момент времени. Повышение значения Π_2 приводит к тому, что радиальное распределение температуры T^* и насыщенности θ^* изменится быстрее. Распределения T^* и θ^* смещаются более плавно на больших расстояниях от скважины и более резко – вблизи нее по мере увеличения Π_2 . При малых значениях Π_2 насыщенность меняется слабо, но при значениях термоградиентного коэффициента, соответствующих водонасыщенным пескам и глинам, насыщенность жидкой фазы нефтяного пласта начинает сильно зависеть от расстояния от оси нагревателя.

Влияние термоградиентного коэффициента, позволяющее оценить эффект переноса влаги в жидкой фазе пласта под действием градиента температуры в неизотермических условиях, на кинетику температуры и насыщенности показано на рис. 6. Рост термоградиентного коэффициента в интервале, соответствующем водонасыщенным пескам и глинам, приводит к ощутимому снижению температуры и повышению насыщенности жидкой фазы нефтяного пласта в таких грунтах.

Влияние коэффициента упругости парогазовой смеси в пласте и отношения плотностей скелета и жидкой фазы характеризуется вариацией значения параметра Π_3 . Его влияние важно и ощутимо, в первую очередь, на давление (рис. 7). Результаты моделирования показывают, что повышение значения

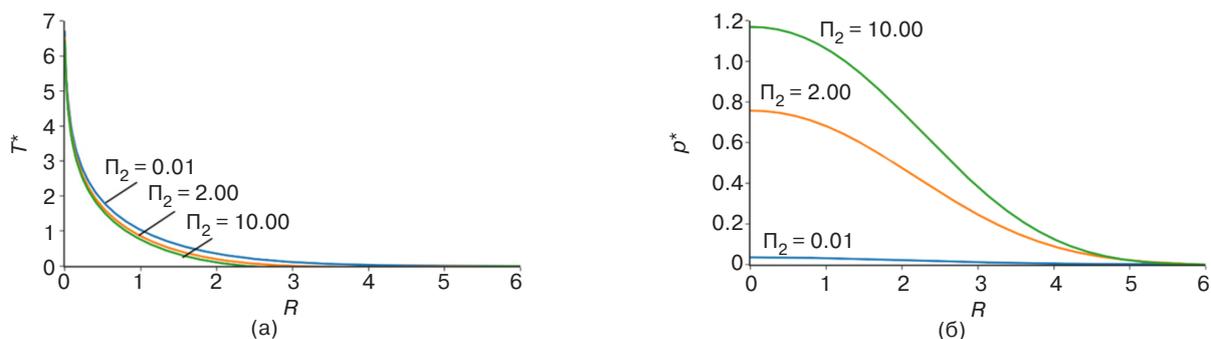


Рис. 5. Радиальные распределения температуры (а) и насыщенности (б) при различных значениях параметра Π_2 и фиксированных $Fo = 2$ (остальные значения параметров – такие же, как на рис. 1)

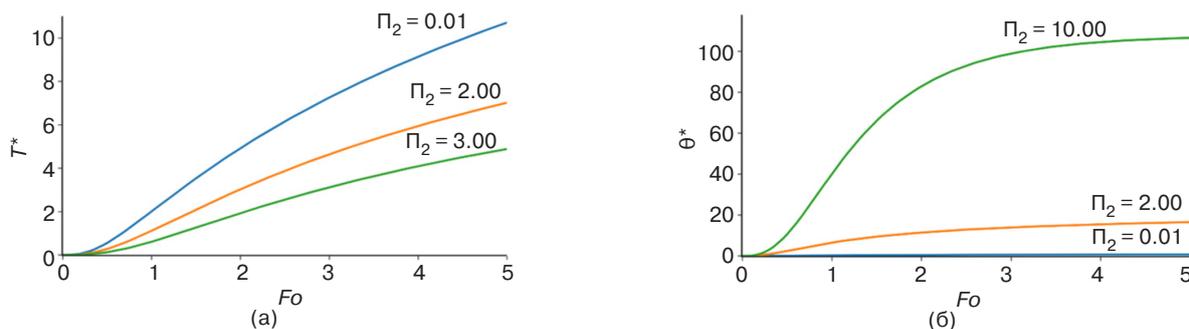


Рис. 6. Кривые кинетики температуры (а) и насыщенности (б) при различных значениях параметра Π_2 и фиксированных $R = 2$ (остальные значения параметров – такие же, как на рис. 1)

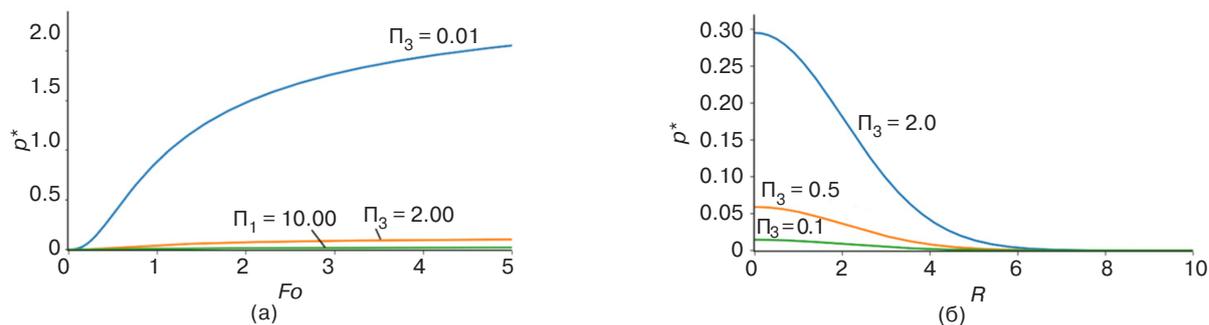


Рис. 7. Кривые кинетики (а) и радиального распределения давления (б) при различных значениях параметра Π_3 и фиксированных $R = 2$ (а), $Fo = 2$ (б) (остальные значения параметров как на рис. 1)

параметра Π_3 приводит в целом к понижению давления. Это снижение при малых временах практически незаметно, однако оно становится сильно заметным при больших временах на фиксированном расстоянии от оси нагревателя (рис. 7а). Такое же существенное снижение при увеличении коэффициента упругости парогазовой смеси наблюдается на малых расстояниях от оси нагревателя в фиксированный момент времени (рис. 7б). На больших расстояниях от оси нагревателя изменение параметра Π_3 перестает оказывать влияние на давление в пласте.

Влияние интенсивности диффузионно-капиллярного массопереноса относительно диффузионного переноса тепла в пласте характеризуется

вариацией критерия Лыкова Lu . Зависимости кинетики и радиального распределения насыщенности при варьировании критерия Лыкова Lu представлена на рис. 8. Результаты моделирования показывают, что увеличение значения критерия Лыкова уже при малых временах приводит к резкому росту насыщенности (рис. 8а). Повышение интенсивности диффузионно-капиллярного массопереноса относительно диффузионного переноса тепла в пласте приводит к повышению насыщенности в фиксированный момент времени при малых расстояниях от оси нагревателя (рис. 8б). На больших расстояниях от оси нагревателя изменение рассматриваемой интенсивности не оказывает влияние на насыщенность.

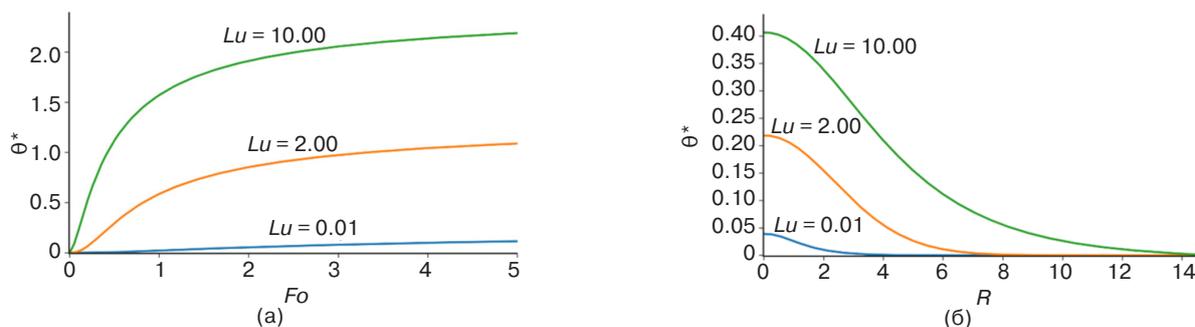


Рис. 8. Кривые кинетики (а) и радиального распределения (б) насыщенности при различных значениях параметра Lu и фиксированных $R = 2$ (а), $Fo = 2$ (б) (остальные значения параметров – такие же, как на рис. 1)

Отметим, что на температурные профили вариация критерия Лыкова практически не оказывает влияния. Незначительное снижение на доли единицы (в безразмерных температурных единицах T^*) наблюдалось только при достаточно больших временах (порядка 5 единиц в безразмерных единицах времени Fo).

Также следует отметить, что такой параметр модели, как тепловой поток на оси нагревателя, определяемый согласно (12) отношением N/λ , влияет на величину теплофизических характеристик только как числовой множитель, т.е. температура, насыщенность и давление прямо пропорциональны удельному тепловому потоку на оси нагревателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена математическая модель, которая описывает закономерности теплофизических процессов в пласте при нагревании с учетом диффузионно-капиллярного массопереноса жидкости и пара. Модель обеспечивает описание происходящих физических явлений и учитывает сложное взаимодействие процессов теплопереноса, изменения насыщенности жидкой фазы и давления.

Для компьютерной реализации модели было разработано программное обеспечение с использованием библиотек Python (Pandas, Dash, NumPy) с целью удобства визуализации и анализа результатов моделирования. В программу входят различные модули численного решения теплофизической начально-краевой задачи, позволяющие выбирать алгоритмы решения по явной или неявной схемам, шаги дискретизации и другие параметры для оптимизации вычислительной процедуры. Программное обеспечение содержит удобный пользовательский интерфейс для ввода параметров, отображения результатов в виде таблиц и графиков, возможности экспорта данных.

С использованием разработанного программного обеспечения были проведены численные эксперименты для изучения того, как различные факторы, такие как свойства пласта, характеристики нагревателя, начальные и граничные условия, влияют на процесс остывания пласта. Результаты были проанализированы и интерпретированы. В частности, установлено, что профиль пространственного распределения температуры достаточно быстро спадает при малых радиусах с последующим замедлением убывания и выхода на равновесное значение. Профили пространственного распределения насыщенности и давления при малых радиусах убывают и на больших расстояниях достигают равновесных значений. С течением времени рассматриваемые

теплофизические характеристики монотонно возрастают.

Показано, что пористость и плотность грунтов и жидкой фазы пласта слабо влияют на пространственные распределения температуры, насыщенности и давления в пласте. Также установлено, что влияние пористости и плотности грунтов и жидкой фазы пласта на кинетику данных теплофизические характеристики начинает быть ощутимым при больших временах.

Результаты моделирования показали, что при малых значениях термоградиентного коэффициента насыщенность меняется слабо, но при его значениях, соответствующих водонасыщенным пескам и глинам, насыщенность жидкой фазы нефтяного пласта начинает сильно зависеть от расстояния от оси нагревателя. Рост этого коэффициента в данном интервале приводит к ощутимому снижению температуры и повышению насыщенности жидкой фазы нефтяного пласта в таких грунтах.

Установлено, что увеличение коэффициента упругости парогазовой смеси приводит к понижению давления на малых расстояниях от оси нагревателя, однако на больших расстояниях давление перестает меняться. Увеличение интенсивности диффузионно-капиллярного массопереноса относительно диффузионного переноса тепла в пласте приводит к резкому росту насыщенности на малых расстояниях от оси нагревателя, однако на больших расстояниях насыщенность перестает меняться.

Результаты данной работы могут быть полезными для нефтедобывающей отрасли, поскольку понимание закономерностей теплофизических процессов в пласте при нагревании позволит создавать более эффективные методы управления процессом добычи, что повысит ее рентабельность. Предложенная модель и ее анализ также расширяют представления о возможностях применения математического и компьютерного моделирования процессов в нефтедобывающей отрасли.

Вклад авторов

С.Е. Савотченко – постановка задачи, формулировка модели, вывод уравнений, анализ результатов, написание статьи.

В.А. Захаров – дискретизация модели, разработка алгоритма численного метода, разработка программы, проведение компьютерных экспериментов, визуализация.

Authors' contributions

S.E. Savotchenko – problem statement, formulating the model, deriving equations, analyzing the results, writing the text of the article.

V.A. Zakharov – discretization of the model, developing the algorithm for a numerical method, developing the software for the model, computer experiments, and visualization.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гильманов А.Я., Ковальчук Т.Н., Скобликов Р.М., Фёдоров А.О., Ходжиев Ё.Н., Шевелёв А.П. Анализ влияния теплофизических параметров пласта и флюида на процесс пароциклического воздействия на нефтяные пласты. *Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2023;9(3–35):6–27. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-3-6-27>
2. Загривный Э.А., Рудаков В.В., Батаев С.Н. Электротермический комплекс для тепловых методов добычи высоковязкой нефти. *Записки Горного института*. 2004;158:226–229.
3. Аминев Д.А., Кравченко М.Н. Методы теплового воздействия на пласт на этапе прогрева скважины с понижением давления. В сб.: *СНК-2020: материалы Юбилейной LXX открытой международной студенческой научной конференции Московского Политеха*. Москва. 2020. С. 198–201.
4. Думанский Ю.Г., Хлебников П.А., Мокропуло И.П., Гилаев Г.Г. Добыча высоковязких нефтей методом теплового воздействия на пласты на месторождении Оха. В сб.: *Освоение ресурсов трудноизвлекаемых и высоковязких нефтей: сборник трудов конференции*. 1997. С. 142–165.
5. Лапатын В.В. Анализ эффективности теплового воздействия на пласт с высоковязкой нефтью с помощью пары одновременно работающих горизонтальных скважин. *Актуальные проблемы социально-гуманитарного и научно-технического знания*. 2023;4(35):18–20.
6. Усманов А.Р. Тепловые методы воздействия на пласт. *Академический журнал Западной Сибири*. 2018;14(6–77):141–142.
7. Гиззатуллина А.А. Тепловое воздействие на высоковязкую нефть в пласте с помощью пары горизонтальных скважин работающих одновременно. В сб.: *XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов конференции в 4 томах*. Т. 2. 2019. С. 1178–1179. <https://www.elibrary.ru/qfwigl>
8. Салаватов Т.Ш., Мамедов Ф.Ф. Перспективы использования установок альтернативных источников энергии с целью теплового воздействия на пласт и призабойную зону. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*. 2019;4:37–44.
9. Янгиров Р.Р. Динамика температурного поля в пласте при тепловом воздействии на продуктивный пласт на примере русского месторождения. В сб.: *Западно-Сибирский нефтегазовый конгресс: Сборник научных трудов XIII Международного научно-технического конгресса студенческого отделения общества инженеров-нефтяников – Society of Petroleum Engineers (SPE)*. 2019. С. 181–183. <https://www.elibrary.ru/zgqxbb>
10. Игтисамова Г.Р., Габдуллина Г.И. Расчет параметров кустовой насосной станции с автономным энерго-обеспечением и тепловым, водогазовым воздействием на пласт. В сб.: *Актуальные вопросы высшего образования – 2020: Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием)*. 2020. С. 230–237. <https://www.elibrary.ru/dfeidr>
11. Гиззатуллина А.А., Фаткуллин А.А., Абдулманов А.А. Математическое моделирование теплового воздействия на высоковязкую нефть в пласте через горизонтальную скважину. В сб.: *Современные технологии в нефтегазовом деле – 2020: сборник трудов международной научно-технической конференции*. 2020. С. 45–49. <https://www.elibrary.ru/fvllkz>
12. Карташов Э.М., Кудинов В.А. *Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости*. М.: URSS; 2018. 656 с.
13. Карташов Э.М. Модельные представления теплового удара в динамической термоупругости. *Russ. Technol. J.* 2020;8(2):85–108. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-85-108>
14. Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Дыбленко В.М., Симкин Э.М. Расчет основных показателей процесса высокочастотного нагрева призабойной зоны нефтяных скважин. *Изв. вузов. Серия Нефть и газ*. 1977;6:15–21. <https://elibrary.ru/nzemgp>
15. Сургучев М.Л., Симкин Э.М., Жданов С.А. Влияние методов теплофизического воздействия на призабойные зоны на увеличение нефтеотдачи пласта. *Нефтяное хозяйство*. 1977;10:48–50.
16. Вахитов Г.Г., Симкин Э.М. *Использование физических полей для извлечения нефти из пластов*. М.: Недра; 1985. 231 с.
17. Дуркин С.М., Меньшикова И.Н. Оценка влияния способа учета пород-неколлекторов на процесс теплового воздействия на пласт при численном моделировании. *Инженер-нефтяник*. 2017;3:38–41. <https://elibrary.ru/zhneuf>
18. Диева Н.Н., Кравченко М.Н., Набиуллина А.А. Обоснование на основе численного моделирования выбора методов теплового воздействия на керогеносодержащие пласты. В сб.: *Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири: Материалы 2-й Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов, посвященной 85-летию академика А.Э. Конторовича*. 2019. С. 37–39. <https://elibrary.ru/mukjjh>
19. Тупышев М.К. Динамика гидратообразования в призабойной зоне скважин при разработке низкотемпературных газовых залежей. *Георесурсы, геэнергетика, геополитика*. 2010;2(2):20. <https://elibrary.ru/sikwul>
20. Шарафутдинов Р.Ф., Канафин И.В., Хабилов Т.Р. Численное исследование температурного поля в скважине с многопластовой системой при движении газированной нефти. *Прикладная механика и техническая физика*. 2019;60(5–357):125–135. <https://doi.org/10.15372/PMTF20190512>
21. Рамазанов А.Ш., Паршин А.В. Температурное поле в нефте-водонасыщенном пласте с учетом разгазирования нефти. *Нефтегазовое дело*. 2006;1:22. <https://elibrary.ru/twwnpx>
22. Рамазанов А.Ш., Паршин А.В. Аналитическая модель температурных изменений при фильтрации газированной нефти. *Теплофизика высоких температур*. 2012;50(4):606–608. <https://elibrary.ru/kovvto>
23. Шагапов В.Ш., Тазетдинов Б.И. Моделирование динамики образования и разложения газогидратных частиц при их всплытии в воде. *Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия*. 2013;9-2(110):133–139. <https://elibrary.ru/txwiiiv>
24. Рамазанова Э.Н., Аливердиев А.А., Григорьев Е.Б., Заричняк Ю.П., Алиев Р.М., Бейбалаев В.Д. Температурное поле нефтяного пласта с учетом влияния тепловых методов воздействия и теплопроводности горных пород. *Вести газовой науки*. 2023;2(54):68–73. <https://elibrary.ru/wrwwep>

25. Гильманов А.Я., Шевелёв А.П., Лагунов П.С., Гуляев П.Н., Петухов А.С., Лютоев П.А. Влияние теплофизических свойств пласта и флюида на технологические параметры пароциклического воздействия. *Инженерно-физический журнал*. 2023;96(5):1323.
26. Ефимцев С.В., Нустров В.С., Охезин С.П., Подоплелов В.В. Некоторые задачи фильтрации в деформируемых средах. *Известия УрГУ. Серия Математика и механика*. 2003;5(26):66–76. <https://elibrary.ru/vlomwf>
27. Макарычев С.В., Мазиров М.А. *Теплофизика почв: методы и свойства*. Суздаль; 1996. Т. 1. 231 с.
28. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. *Методы интенсификации и моделирования теплообменных процессов*. М.: Теплотехник; 2011. 287 с.
29. Голдобин Д.С., Краузин П.В. Насыщение затопленных почв двухкомпонентной смесью газов. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2013;4:33–41.
30. Goldobin D.S., Krauzin P.V. Formation of bubbly horizon in liquid-saturated porous medium by surface temperature oscillation. *Phys. Rev. E*. 2015;92(6):063032(1–8). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.92.063032>

REFERENCES

1. Gilmanov A.Ya., Kovalchuk T.N., Skoblikov R.M., Fedorov A.O., Khodzhiyev Ye.N., Shevelev A.P. Analysis of the influence of thermophysical parameters of the reservoir and fluid on the process of cyclic steam stimulation. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika = Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2023;9(3–35):6–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-3-6-27>
2. Zagrivnyi E.A., Rudakov V.V., Bataev S.N. Electro thermal complex for thermal methods of extraction of high-viscosity oil. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2004;158:226–229 (in Russ.).
3. Aminev D.A., Kravchenko M.N. Methods of thermal impact on the reservoir at the stage of well heating with pressure reduction. In: *SNK-2020: Proceedings of the Anniversary 70th Open International Student Scientific Conference of the Moscow Polytech*. Moscow. 2020. P. 198–201 (in Russ.).
4. Dumanskii Yu.G., Khlebnikov P.A., Mokropulo I.P., Gilaev G.G. Production of highly viscous oils by the method of thermal impact on reservoirs at the Okha field. In: *Development of Resources of Hard-to-Recover and High-Viscosity Oils: Conference Proceedings*. 1997. P. 142–165 (in Russ.).
5. Lapatin V.V. Analysis of the efficiency of thermal impact on a reservoir with highly viscous oil using a pair of simultaneously operating horizontal wells. *Aktual'nye problemy sotsial'no-gumanitarnogo i nauchno-tekhnicheskogo znaniya = Actual Problems of Social, Humanitarian and Scientific-Technical Knowledge*. 2023;4(35):18–20 (in Russ.).
6. Usmanov A.R. Thermal methods of influence on the formation. *Akademicheskii zhurnal Zapadnoi Sibiri = Academic Journal of West Siberia*. 2018;14(6–77):141–142 (in Russ.).
7. Gizzatullina A.A. Thermal impact on highly viscous oil in the reservoir using a pair of horizontal wells operating simultaneously. In: *12th All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics: Conference Proceedings in 4 v. V. 2*. 2019. P. 1178–1179 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/qfwigl>
8. Salavatov T.Sh., Mamedov F.F. The prospects of using devices of alternative energy sources towards thermal treatment of formation and bottomhole zone. *Azerbaijdzhanskoe neftyanoe khozyaistvo = Azerbaijan Oil Industry*. 2019;4:37–44 (in Russ.).
9. Yangirov R.R. Dynamics of the temperature field in the reservoir during thermal impact on the productive reservoir on the example of the Russian field. In: *West Siberian Oil and Gas Congress: Collection of Scientific Papers of the 13 International Scientific and Technical Congress of the Student Section of the Society of Petroleum Engineers (SPE)*. 2019. P. 181–183 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/zgqxbb>
10. Igtisanova G.R., Gabdullina G.I. Calculation of the parameters of the kust pump station with autonomous energy provision and heat, water-gas reservoir stimulation. In: *Actual Issues of Higher Education – 2020: Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference (with International Participation)*. 2020. P. 230–237 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/dfeidr>
11. Gizzatullina A.A., Fatkullin A.A., Abdulmanov A.A. Mathematical modeling of heat influence on a high-viscous oil in a layer through a horizontal well. In: *Contemporary technologies in the oil and gas industry – 2020: Collection of Works of the International Scientific and Technical Conference*. 2020. P. 45–49 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/fvllkz>
12. Kartashov E.M., Kudinov V.A. *Analiticheskaya teoriya teploprovodnosti i prikladnoi termouprugosti (Analytical Theory of Heat Conduction and Applied Thermoelasticity)*. Moscow: URSS; 2018. 656 p. (in Russ.).
13. Kartashov E.M. Model representations of heat shock in terms of dynamic thermal elasticity. *Russ. Technol. J*. 2020;8(2): 85–108 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-85-108>
14. Sayakhov F.L., Fatykhov M.A., Dyblenko V.M., Simkin E.M. Calculation of the main indicators of the process of high-frequency heating of the bottomhole zone of oil wells. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya Neft' i gaz = Oil and Gas Studies*. 1977;6:15–21 (in Russ.). <https://elibrary.ru/nzemgp>
15. Surguchev M.L., Simkin E.M., Zhdanov S.A. Influence of methods of thermophysical impact on bottomhole zones on increasing oil recovery. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 1977;10:48–50 (in Russ.).
16. Vakhitov G.G., Simkin E.M. *Ispol'zovanie fizicheskikh polei dlya izvlecheniya nefiti iz plastov (The Use of Physical Fields to Extract Oil from Reservoirs)*. Moscow: Nedra; 1985. 231 p. (in Russ.).
17. Durkin S.M., Menshikova I.N. Assessment of the impact of method of accounting of non-reservoir rocks in the process of thermal stimulation by numerical simulation. *Inzhener-neftyanik*. 2017;3:38–41 (in Russ.). <https://elibrary.ru/zhneuf>

18. Dieva N.N., Kravchenko M.N., Nabiullina A.A. Justification based on numerical modeling of the choice of thermal impact methods on kerogen-containing reservoirs. In: Actual Problems of Oil and Gas Geology in Siberia: *Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific Conference of Young Scientists and Students Dedicated to the 85th Anniversary of Academician A.E. Kontorovich*. 2019. P. 37–39 (in Russ.). <https://elibrary.ru/mukjjh>
19. Tupysev M.K. Dynamics of hydrate formation in near-wellbore zone of wells while the development of low-temperature gas deposits. *Georesursy, Geoenergetika, Geopolitika*. 2010;2(2):20 (in Russ.). <https://elibrary.ru/sikwul>
20. Sharafutdinov R.F., Kanafin I.V., Khabirov T.R. Numerical Investigation of the temperature field in a multiple-zone well during gas-cut oil motion. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2019;60(5):889–898. <https://doi.org/10.1134/S0021894419050122>
[Original Russian Test: Sharafutdinov R.F., Kanafin I.V., Khabirov T.R. Numerical Investigation of the temperature field in a multiple-zone well during gas-cut oil motion. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2019;60(5–357):125–135 (in Russ.). <https://doi.org/10.15372/PMTF20190512>]
21. Ramazanov A.Sh., Parshin A.V. Temperature distribution in oil-water-saturated reservoir with account of oil degassing. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*. 2006;1:22 (in Russ.). <https://elibrary.ru/twvwnpx>
22. Ramazanov A.S., Parshin A.V. Analytical model of temperature variations during the filtration of gas-cut oil. *High Temp.* 2012;50(4):567–569. <https://doi.org/10.1134/S0018151X12040189>
[Original Russian Test: Ramazanov A.Sh., Parshin A.V. Analytical model of temperature variations during the filtration of gas-cut oil. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2012;50(4):606–608 (in Russ.). <https://elibrary.ru/kovvto>]
23. Shagapov V.Sh., Tazetdinov B.I. Modeling the dynamics of formation and decomposition of gas hydrate particles during their surfacing in water. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya = Vestnik of Samara University. Natural Science Series*. 2013;9-2(110):133–139 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rxwivv>
24. Ramazanova E.N., Aliverdiev A.A., Grigor'ev E.B., Zarichnyak Yu.P., Aliev R.M., Beibalaev V.D. Temperature field of an oil reservoir considering the effect of thermal methods of impact and thermal conductivity of rocks. *Vesti gazovoi nauki*. 2023;2(54):68–73 (in Russ.). <https://elibrary.ru/wrwwep>
25. Gil'manov A.Y., Shevelev A.P., Lagunov P.S., et al. Influence of the Thermophysical Properties of the Reservoir and Fluid on the Technological Parameters of the Cyclic Steam Stimulation. *J. Eng. Phys. Thermophy.* 2023;96(5):1311–1319. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02797-8>
[Original Russian Test: Gil'manov A.Ya., Shevelev A.P., Lagunov P.S., Gulyaev P.N., Petukhov A.S., Lyutov P.A. Influence of the Thermophysical Properties of the Reservoir and Fluid on the Technological Parameters of the Cyclic Steam Stimulation. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2023;96(5):1323–1331 (in Russ.).]
26. Efimtsev S.V., Nustrov B.C., Okhezin S.P., Podoplelov V.V. Some problems of filtration in deformable media. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika i mekhanika*. 2003;5(26):66–76 (in Russ.).
27. Makarychev S.V., Mazirov M.A. *Teplofizika pochv: metody i svoystva (Thermal Physics of Soils: Methods and Properties)*. Suzdal; 1996. V. 1. 231 p. (in Russ.).
28. Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M. *Metody intensivatsii i modelirovaniya teplomassoobmennykh protsessov (Methods of Intensification and Modeling of Heat and Mass Transfer Processes)*. Moscow: Teplotekhnik; 2011. 287 p. (in Russ.).
29. Goldobin D.S., Krauzin P.V. Saturation of aquifers with two-component gas mixture. *Vestnik PNIPU. Mekhanika = PNRPU Mechanics Bulletin*. 2013;4:33–41 (in Russ.).
30. Goldobin D.S., Krauzin P.V. Formation of bubbly horizon in liquid-saturated porous medium by surface temperature oscillation. *Phys. Rev. E*. 2015;92(6):063032(1–8). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.92.063032>

Об авторах

Савотченко Сергей Евгеньевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры высшей математики, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); профессор кафедры высшей математики и физики, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе» (МГРИ) (117997, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23). E-mail: savotchenkose@mail.ru. Scopus Author ID 6603577988, SPIN-код РИНЦ 2552-4344, <https://orcid.org/0000-0002-7158-9145>

Захаров Василий Александрович, аспирант, кафедра высшей математики и физики, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе» (МГРИ) (117997, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23). E-mail: vasilyblack10@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0008-1978-2993>

About the Authors

Sergey E. Savotchenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor, High Mathematics Department, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Professor, Department of Higher Mathematics and Physics, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI) (23, Miklukho-Maklaya ul., Moscow, 117997 Russia). E-mail: savotchenkose@mail.ru. Scopus Author ID 6603577988, RSCI SPIN-code 2552-4344, <https://orcid.org/0000-0002-7158-9145>

Vasily A. Zakharov, Postgraduate Student, Department of Higher Mathematics and Physics, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI) (23, Miklukho-Maklaya ul., Moscow, 117997 Russia). E-mail: vasilyblack10@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0008-1978-2993>

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств.
Управление в организационных системах
Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries.
Management in organizational systems

УДК 005.7+621.5+621.316.7

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-119-132>

EDN TQKWPM



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оценка проекта на основе теории нечетких множеств и концепции нечеткой логики. Метод и методика

В.В. Сидорин [®]

Институт испытаний и сертификации вооружения и военной техники, Москва, 111524 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: wwsid@yandex.ru

• Поступила: 14.02.2025 • Доработана: 14.04.2025 • Принята к опубликованию: 24.07.2025

Резюме

Цели. Цель работы – разработка метода и методики оценки проектной деятельности, включая научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Актуальность разработки обусловлена потребностью в аналитической оценке проекта по его основным показателям (уникальности результатов и требуемым ресурсам), учитывающей как требования заказчика, так и возможности предполагаемых исполнителей для принятия согласованного решения по его постановке. В настоящее время основой известных методов оценки планируемого проекта является экономическая эффективность. При этом подходы к оценке проекта заказчика и исполнителя различны и противоречивы. Заказчик в своих требованиях к проекту и затратам ресурсов минимизирует риски недостижения цели проекта. Исполнитель те же риски минимизирует увеличением запрашиваемых временных и материальных ресурсов, а также своими требованиями к результатам проекта, в основе которых – его возможности их выполнить. Объединить различные подходы к оценке для обоснованного и согласованного принятия решений относительно возможности и целесообразности постановки и выполнения проекта позволяет концепция нечетких множеств.

Методы. В основе разработанного метода и методики оценки проектов – теория нечетких множеств и концепция нечеткой логики с моделированием оценок параметров проекта с помощью функций принадлежности.

Результаты. Разработаны метод и реализующая его методика оценки проекта, учитывающие требования заказчика и возможности предполагаемого исполнителя для обоснованного принятия решений в отношении его постановки.

Выводы. Применение метода позволяет сбалансированно установить оптимальные требования и условия для осуществления проекта. В отличие от экспертных методов представленные аналитический метод и методика обеспечивают более высокую объективность обобщенной оценки, обоснованность и эффективность в принятии и реализации управленческих решений. Универсальность критериев и процедур методики содержит в себе возможность ее применения в оценках различных видов и по различным направлениям проектной деятельности, включая научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.

Ключевые слова: проект, теория нечетких множеств, лингвистические переменные, функции принадлежности, фаззификация, дефаззификация

Для цитирования: Сидорин В.В. Оценка проекта на основе теории нечетких множеств и концепции нечеткой логики. Метод и методика. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):119–132. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-119-132>, <https://www.elibrary.ru/TQKWPM>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Evaluation of the project based on the theory of fuzzy sets and the concept of fuzzy logic. Method and methodology

Viktor V. Sidorin @

Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Moscow, 111524 Russia
© Corresponding author, e-mail: wwsid@yandex.ru

• Submitted: 14.02.2025 • Revised: 14.04.2025 • Accepted: 24.07.2025

Abstract

Objectives. The work sets out to develop a method and methodology for evaluating project activities, including research and development work. The development of this method and its associated methodology is relevant due to the need to provide an analytical assessment of a project based on its main performance indicators, such as the uniqueness of the results and the resources required to produce them. This assessment must take into account both the requirements of the customer and the capabilities of the prospective performers to make an informed decision on its formulation. Currently, the best-known methods for evaluating a planned project are based on economic efficiency. However, the approaches taken by customers and contractors are often different and sometimes contradictory. For example, a customer may minimize the risk of failing to achieve the project goal by setting appropriate requirements and resource costs, while a contractor minimizes the same risks by increasing the requested time and material resources, as well as by adjusting the requirement criteria for the project results, which are based on their ability to fulfill them. The concept of fuzzy sets allows various assessment approaches to be combined to provide informed and coordinated decision-making regarding the feasibility and expediency of setting up and executing a project.

Methods. The developed method and methodology for project evaluation are based on the theory of fuzzy sets and the concept of fuzzy logic, using membership functions to model project parameter estimates.

Results. The project assessment method and implementation methodology were developed, taking into account customer requirements and the capabilities of the potential contractor, to enable rational decision-making regarding its formulation.

Conclusions. The method may be applied to establish the optimal requirements and conditions for project implementation in a balanced manner. In contrast to expert methods, the presented analytical method and methodology provide a higher objectivity of the generalized assessment, validity, and effectiveness in making and implementing managerial decisions. The methodology's universal criteria and procedures make it suitable for application to various kinds of assessment and in various areas of project activity, including research and development work.

Keywords: project, theory of fuzzy sets, linguistic variables, membership functions, fuzzification, defuzzification

For citation: Sidorin V.V. Evaluation of the project based on the theory of fuzzy sets and the concept of fuzzy logic. Method and methodology. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):119–132. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-119-132>, <https://www.elibrary.ru/TQKWPM>

Financial disclosure: The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Проект как вид деятельности отличают от деятельности операционной три характерные особенности: его цель, заключающаяся в получении уникального, нового, ранее не создававшегося результата, ограниченные сроки и ограниченные ресурсы. Отсутствие или ограниченность априорной информации, предшествующего опыта выполнения подобных работ, создания аналогичного или близкого по свойствам продукта представляют собой факторы риска недостижения цели проекта. Риски относятся как к деятельности исполнителя проекта, так и его заказчика [1–3]. Следствие реализации риска недостоверной оценки своих возможностей исполнителем – недостижение поставленной цели, невыполнение проекта. Минимизируя свои риски, исполнитель склонен завysить требования к ресурсам и срокам выполнения работ по проекту, занижить уровень требований к уровню разработки [4–6]. Заказчик, рискуя своими ресурсами, стремится получить требуемый результат меньшим объемом ресурсов, чем требует исполнитель, и в более сжатые сроки. Сблизить позиции исполнителя и заказчика может объективная оценка проекта, учитывающая при этом и требования заказчика, и возможности исполнителя.

Преодолеть конфликт интересов взаимодействующих сторон позволит решение, принимаемое на основе оценки методом, совмещающим оценки одного и того же объекта обеими сторонами. Такая возможность содержится в подходе, основанном на теории нечеткой логики и нечетких множеств, что позволяет использовать и обрабатывать большие объемы информации методами и средствами цифровых информационных технологий и получать множество вариантов решений для различных критериев оценки.

Необходимость обращения к методологии нечеткой логики обусловлена потребностью в получении аналитическими методами более достоверных результатов оценки, чувствительных к изменениям в оцениваемых объектах проектной деятельности. Это и отдельные проекты, и программы, и портфели проектов, а также научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, аванпроекты. Результаты оценки аналитическими методами предполагаемой для выполнения проектной деятельности по ее трем атрибутам – критериям и характерным признакам могут

стать критерием и основанием для принятия совместного решения о возможности постановки и выполнения проектной деятельности взаимодействующими сторонами – заказчиком и исполнителем.

Достоверность оценок определяет адекватность принимаемых решений и эффективность управления проектами. Для этого результаты оценки должны быть чувствительны к изменениям параметров проекта, приводящих или ведущих к отклонениям от установленных для них целей. Это обуславливает требования к составу, качественным и количественным показателям, по которым оценивается проект. Методами, основанными на измерительной информации, или на информации, полученной экспертными методами, дать такую оценку не всегда представляется возможным [7–11].

1. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТА НА ОСНОВЕ ИХ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Цель и назначение метода – установление возможности осуществления проектной деятельности на основе прогнозной ее оценки по трем параметрам: новизне и оригинальности результатов, планируемых для получения при выполнении проекта, достаточности выделенных ресурсов и сроков для выполнения работ по проекту, оптимальности их использования и планирования. Общее для этих оценок каждой из взаимодействующих сторон – заказчика и исполнителя, – их неоднозначность, возможность множественности вариантов реагирования на них, различное восприятие их значимости, и, соответственно, принятие различных по своей эффективности решений. Объединить различные оценки для обоснованного и согласованного принятия решений относительно возможности и целесообразности постановки и выполнения проекта позволяет концепция нечетких множеств. В основе представленного метода – моделирование функциями принадлежности к тому или иному нечеткому множеству оценок проекта заказчиком и исполнителем для получения обобщенной его оценки.

Результатом применения метода должна стать оценка проекта по степени его соответствия требованиям заказчика и возможностям исполнителя для последующего принятия решения о целесообразности его

постановки и выполнения, удовлетворяющая обе взаимодействующие стороны. Ориентация на привлечение технологий искусственного интеллекта к управлению проектом на всех его этапах, начиная с установления возможности его выполнения и выбора оптимальных научных технических и организационных решений, требует разработки математических моделей каждого из этапов проектной деятельности [12–14].

Теория нечетких множеств позволяет структурировать критериальные параметры и характеристики проекта, не имеющие единой для участников проекта шкалы оценок и критериев, и которые по-разному могут восприниматься обеими взаимодействующими сторонами – исполнителями и заказчиком проекта. Не имеющая единой однозначно воспринимаемой шкалы оценок этих параметров потребность в их оценке может с помощью положений теории нечетких множеств быть восполнена установлением их принадлежности или непринадлежности к категории «Соответствует требованиям и удовлетворяет участников». Задача получения такой оценки может быть решена моделированием оценивания проекта в виде нечеткой системы, связывающей влияние оценок проекта по его новизне, оригинальности, достаточности ресурсов и сроков выполнения работ на соответствие требованиям заказчика и возможностям исполнителя. Такое моделирование включает три этапа: формулирование ментальной модели проекта, на ее основе – вербальной модели проекта и затем – разработку нечеткой лингвистической модели проекта. Входные параметры такой нечеткой модели могут быть получены тремя способами: экспертной оценкой параметров моделируемого проекта, построением самоадаптирующихся нечетких моделей на основе измерений входов и выходов системы, построением самоорганизующихся и самоадаптирующихся нечетких моделей на основе измерений входов и выходов системы¹ [15, 16].

Ментальная модель проекта – это видение деятельности по созданию нового уникального продукта в ограниченные сроки с ограниченными ресурсами. Описывающая ее в четких терминах основных свойств и отличительных признаков вербальная модель с целью информационного взаимодействия участников проекта затем преобразуется в нечеткую лингвистическую модель проекта.

Нечеткая лингвистическая система и ее модель должны обеспечить согласованность двух факторов – требований заказчика и возможностей исполнителя. В основе оценки – модель совместной оценки заказчиком и предполагаемым исполнителем прогнозируемых результатов проекта методами нечеткой логики.

Взаимодействующие стороны – заказчик с одной стороны и организация-исполнитель – с другой рассматриваются как нечеткая система [17–19]. Входы для анализа в нечеткой модели – прогнозируемые каждой из взаимодействующих сторон параметры проекта: степень оригинальности научных, технических или иных планируемых результатов проекта, уровень достаточности ресурсного обеспечения работ по проекту, достаточность времени на выполнение работ по проекту. Выход анализа – обобщенная оценка соответствия проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя. Ее получение требует решения задачи объединения двух независимых оценок каждой из взаимодействующих сторон. На основе полученной таким образом оценки принимается решение о постановке работ по проекту.

Структура и содержание метода прогнозной оценки проекта для принятия решений о постановке и управлению проектом на основе теории нечетких множеств, нечеткой логики и нечеткого моделирования его характеристик включает следующие этапы (рис. 1):



Рис. 1. Этапы метода оценки степени соответствия предполагаемого к выполнению проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя

¹ Dadone P. *Design Optimization of Fuzzy Logic Systems*: Ph. Dissertation. Blacksburg, Virginia; 2001. 197 p.

1. Постановка задачи – оценка возможности выполнения проекта и получение нового оригинального научного, технического или иного результата, удовлетворяющего заказчика. Определение и установление входов – четких величин, характеризующих деятельность исполнителя, необходимых для его оценки методом нечеткой логики.
2. Фаззификация – переход к нечеткости, приведение входных четких величин – прогнозируемой степени оригинальности результата проекта, уровня достаточности ресурсов, и оптимальности планирования работ по срокам выполнения этапов проекта к нечетким лингвистическим переменным. Формулирование лингвистических переменных и составление функции (функций) принадлежности для них. Описание лингвистических переменных функциями принадлежности.
3. Выбор системы правил обращения с лингвистическими переменными с целью формулирования нечеткого логического вывода.
4. Преобразование лингвистических переменных с помощью системы правил и получение нечеткого логического вывода.
5. Дефаззификация – обратный переход от нечеткого логического вывода к четкой величине – выходному параметру, т.е. к обобщенной оценке планируемого для выполнения проекта.
6. Получение выхода – степени соответствия проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя, удовлетворяющей обе стороны.

Один из параметров-атрибутов проекта – уникальность полученного результата, новизна, исключительная оригинальность (не имеет аналогов или принципиально их превосходит благодаря принципиально новым решениям в выполнении требований заказчика). В качестве единицы измерения уникальности проекта в методе принято отношение числа оригинальных технических, научных или иных решений к общему их числу в проекте – величина α из множества возможных значений A : $\alpha \in A$. Соответствующая ему лингвистическая переменная – «Уникальность проекта».

Второй параметр проекта β – временной интервал, планируемый для выполнения проекта и его распределение по этапам проекта. Входные четкие данные – соотношение сроков, запрашиваемых потенциальным исполнителем проекта, и сроков, устанавливаемых заказчиком проекта. Градации для оценки степени соответствия требованиям по лингвистической переменной – различная степень достаточности (недостаточности) времени для выполнения проекта. Для оценки по лингвистическому параметру «Достаточность времени на выполнение проекта» применяется шкала со значениями от 0.0 до 1.0, где 0.0 – полная недостаточность

установленных сроков, а 1.0 – полное соответствие потребностям исполнителей и заказчика.

Третья четкая входная величина γ – соотношение ресурсов (объема и видов), запрашиваемых предполагаемым исполнителем проекта и выделяемых заказчиком проекта. Соответствующий ей лингвистический параметр «Достаточность ресурсов» устанавливает шкалу нечеткой оценки уровня обеспеченности проекта ресурсами и оптимальности их распределения по этапам проекта. Единица ее измерения для оценки степени соответствия требованиям – уровень достаточности ресурсов для выполнения проекта, оцениваемый по шкале от 0.0 до 1.0, где 0.0 – полная недостаточность, а 1.0 – полное соответствие требованиям.

Задача, решаемая методом нечеткой логики – согласование двух оценок – 1-й и 2-й стороны в их взаимодействии и получение оценки более объективной и принимаемой обеими взаимодействующими участниками проектной деятельности. Входные параметры в методе – три четкие величины, оцениваемые заказчиком и предполагаемым исполнителем проекта. Задача совмещения оценок решается фаззификацией, т.е. преобразованием четких входных величин в их лингвистические переменные, свойство которых – объединять в совокупность нечетких множеств такие параметры, границы в градациях которых не имеют четких однозначно воспринимаемых и принимаемых значений взаимодействующими сторонами.

Так, уникальность, оригинальность и новизна проекта могут с различной степенью соответствовать требованиям и оценкам заказчика и исполнителя проекта. Причина – в различии уровня требований каждой из сторон для оценки одного и того же параметра, характеристики проекта, а также мер обеспечения единства измерений основных характеристик проекта. Предполагаемый исполнитель проекта зачастую в стремлении получить заказ на выполнение проекта склонен завышать самооценку своих возможностей и уровень предполагаемой разработки по проекту, опираясь на предшествующий опыт выполнения работ, не в полной мере соответствующих требованиям нового проекта. Заказчик, напротив, в стремлении минимизировать риски недостижения целей проекта более требователен к планируемым результатам проекта, его основным показателям. Поэтому в подходе на основе нечеткой логики два подмножества – «высокая степень соответствия» и «низкая степень соответствия» требованиям к основным параметрам проекта. Они отражают позиции обеих сторон – заказчика и потенциального исполнителя работ по проекту.

Четких и однозначно воспринимаемых параметров и их границ нет и в отношении таких показателей,

как достаточность ресурсов и временного интервала на выполнение проекта. Подход к оценке в категориях «быстро – долго», «много – мало», «дорого – дешево» и т.п. не сближает позиции заказчика и исполнителя в принятии решения по проекту.

Для решения задачи совмещения оценок в рассматриваемом методе четкому параметру «Уникальность, оригинальность, новизна результатов проекта» соответствуют лингвистические переменные: α – «Доля оригинальных решений по проекту в общем их числе», β – «Достаточность времени для выполнения проекта» и γ – «Уровень достаточности ресурсов для выполнения проекта».

В результате совмещения оценок на выходе должен быть получен результат в виде лингвистической переменной δ – «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя».

Диапазону возможных значений в оценке уникальности проекта соответствует нечеткое множество A , представляющее собой совокупность пар вида $\langle \alpha, \varphi_\alpha \rangle$. Степень принадлежности φ_α каждого элемента α нечеткого множества множеству A ($\alpha \in A$) описывается функцией принадлежности $\varphi_\alpha(A)$. Функция принадлежности $\varphi_\alpha(A)$ каждое значение α ставит в соответствие с некоторым числом из интервала его возможных значений. Для параметра «Уникальность проекта» этот диапазон составляет, например, $[0.0; 1.0]$, т.е. $\varphi_\alpha(A): A \rightarrow [0.0; 1.0]$, в котором каждому α свойственна принадлежность к множеству $A: \forall \alpha \rightarrow \in A$, где \forall – квантор всеобщности свойств для всех α , принадлежащих совокупности множества A .

Лингвистической переменной «Уникальность проекта» соответствуют два крайних значения диапазона: «высокая» – со значением «1.0» и «низкая» – с нижним значением «0.0» из всего диапазона возможных значений совокупности нечеткого множества A . Между этими крайними значениями диапазона существует множество других значений нечеткого множества оценок этого параметра проекта. Функция принадлежности $\varphi_\alpha(A)$ показывает, в какой степени параметр α , т.е. оценка уникальности проекта, обладает теми или иными свойствами подмножества A : где $\varphi_{\alpha_{high}}(A) = 1.0$ означает, что степень уникальности, новизны и оригинальность проекта максимальная, а $\varphi_{\alpha_{low}}(A) = 0.0$ – минимальная. Оценка с применением нечетких множеств осуществляется отнесением нечеткой величины к одному из двух подмножеств – α_{high} и α_{low} с соответствующими им функциями принадлежности $\varphi_{\alpha_{high}}(A)$ и $\varphi_{\alpha_{low}}(A)$, дополняющими друг друга и составляющими в совокупности весь диапазон значений оценки параметра α , принадлежащего нечеткому множеству A :

$$\varphi_{\alpha_{high}}(A) + \varphi_{\alpha_{low}}(A) = 1; \forall \alpha \rightarrow \in A. \quad (1)$$

Инновационный характер проектной деятельности состоит, в т.ч. в том, что уникальность, новизна и оригинальность разработки формируется, как правило, на ранних этапах проекта. Поэтому функции принадлежности параметра «Уникальность проекта» к подмножествам α_h и α_s наиболее адекватно описываются степенной функцией:

$$\varphi_{\alpha_{high}}(A) = \alpha^n \text{ и } \varphi_{\alpha_{low}}(A) = 1 - \alpha^n, \quad (2)$$

где n $[0.0; 1.0]$ – показатель инновационности проекта, принимающий значения в интервале от 0.0 до 1.0. Его значение свидетельствует о степени новизны, оригинальности и патентоспособности научно-технических решений, закладываемых, как правило, в разработках по проекту на ранних его этапах, маркетинге, поиске и выборе новых перспективных направлений исследований, разработке оригинальных подходов.

Графики функций принадлежности для подмножеств α_{high} и α_{low} при выбранном диапазоне их возможных значений $A \rightarrow [0.0; 1.0]$ для показателей степени $n = 0.7; n = 0.5; n = 0.3$ представлены на рис. 2.

На графике площадь, ограниченная осями координат и линией функции принадлежности $\varphi_{\alpha_{high}}(A)$, есть подмножество уникальности и высокого уровня оценок новизны результата проекта, а линией функции принадлежности $\varphi_{\alpha_{low}}(A)$ – подмножество с низким уровнем оценок оригинальности разработки с оценкой проекта «не уникален». Область пересечения этих подмножеств – подмножество со средней оценкой этого параметра.

Планируемый для выполнения проекта временной интервал и его разбиение на этапы для выполнения работ по проекту – 2-й параметр проекта β . Функция принадлежности лингвистической переменной «Достаточность времени на выполнение проекта» по четкому параметру «Временной интервал на выполнение проекта» имеет градации: «достаточно» и «недостаточно». Им соответствуют два нечетких подмножества из общего числа нечеткого множества $\beta \in B$, соответствующего планируемому сроком на выполнение работ по проекту B :

$$\Psi_{\beta_{high}}(B) = \beta^m, \Psi_{\beta_{low}}(B) = 1 - \beta^m. \quad (3)$$

Нечеткое подмножество $\beta_{low}(B)$ соответствует состоянию недостаточности планируемого времени на выполнение проекта. Подмножество $\beta_{high}(B)$ соответствует временному интервалу, достаточному для выполнения работ по проекту и оптимальному его распределению по его этапам. Максимальное значение функции принадлежности «Достаточность времени на выполнение проекта» – 1.0. Соотношение функций принадлежности $\Psi_{\beta_{low}}(B)$ и $\Psi_{\beta_{high}}(B)$

для подмножеств $\beta_{low}(B)$ и $\beta_{high}(B)$, соответственно, определяется как:

$$\Psi_{\beta_{low}}(B) + \Psi_{\beta_{high}}(B) = 1; \forall \beta \rightarrow \in B. \quad (4)$$

С учетом неравномерности и значительной неопределенности в правильности распределения времени по этапам проекта уверенность в оценке степени принадлежности параметра «Достаточность времени на выполнение проекта» к подмножеству «достаточно» нелинейно возрастает с приближением значений временного интервала на выполнение проекта к высшим его показателям. И, соответственно, при этом так же нелинейно снижается степень принадлежности к подмножеству «недостаточно». Такому характеру зависимости (рис. 3) для подмножеств $\Psi_{\beta_{low}}(B)$ и $\Psi_{\beta_{high}}(B)$ соответствуют степенные функции с показателями степени $m > 1$.

Показатель степени m – «показатель нечеткости» отражает уровень требований к отнесению

принадлежности лингвистического параметра к подмножествам «достаточно» или «недостаточно». Чем больше его значение, тем при больших значениях времени на выполнение проекта β лингвистический параметр принадлежит к тому или иному подмножеству и, соответственно, выше уровень определенности, строгости в оценке по лингвистическому параметру. При $m = 0$, т.е. для линейной функции, принадлежности параметра «Достаточность времени на выполнение проекта» нечеткое множество его значений делится на два равных нечетких подмножества. При увеличении m прослеживается тенденция сближения нечеткой и четкой оценок и достижение их равенства при $\beta = 1$.

На графике (рис. 3) область, ограниченная осями координат и линией $\Psi_{\beta_{high}}(B)$ есть подмножество с оценкой временного интервала на выполнение проекта как достаточного, а линией $\Psi_{\beta_{low}}(B)$ – как недостаточного.

Общая для этих подмножеств область пересечения – область средних оценок достаточности времени на выполнение проекта.

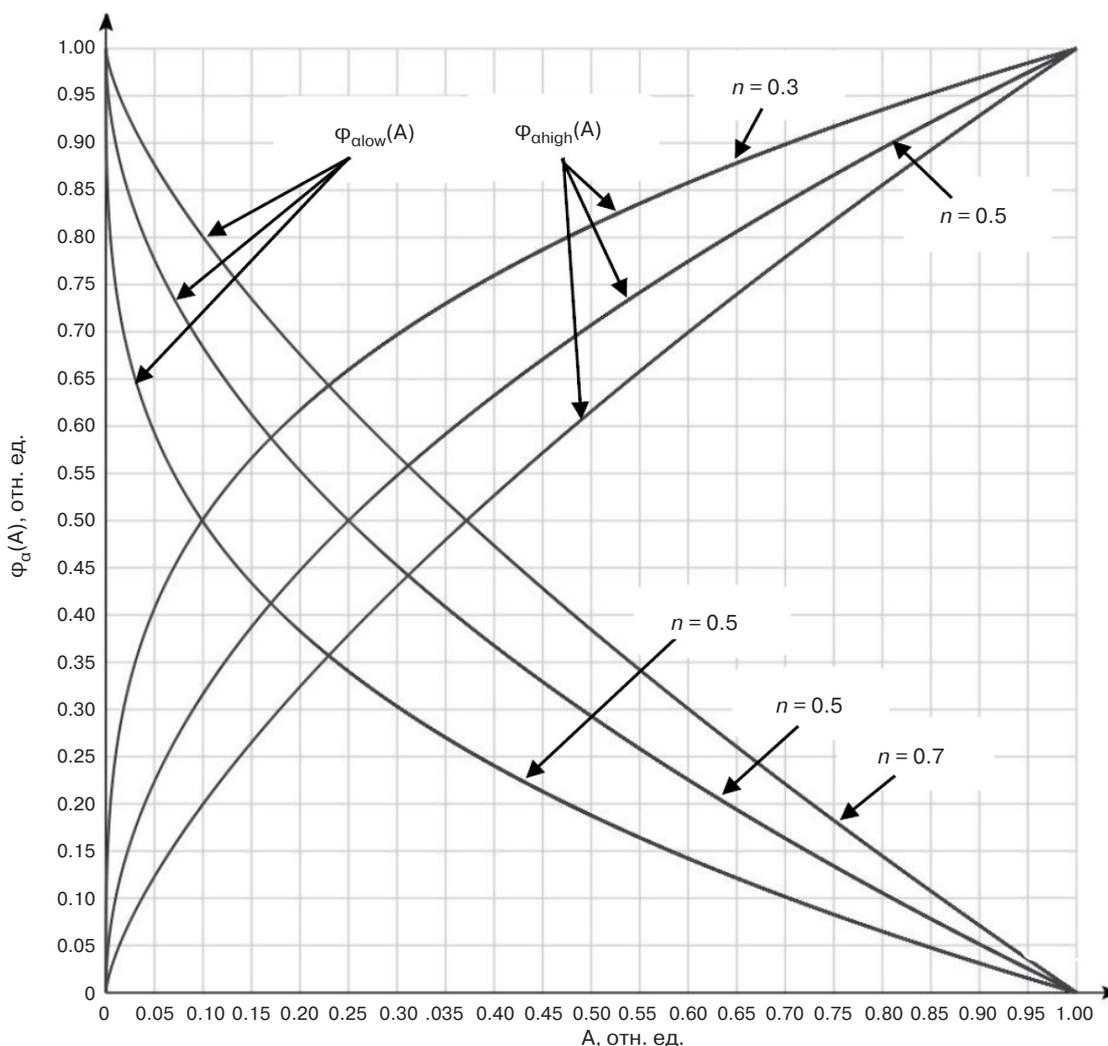


Рис. 2. Функции принадлежности $\phi_{\alpha}(A)$ лингвистической переменной «Уникальность проекта» к подмножествам $\phi_{\alpha_{high}}(A)$ – «уникален» и $\phi_{\alpha_{low}}(A)$ – «не уникален» для различных показателей инновационности проекта n

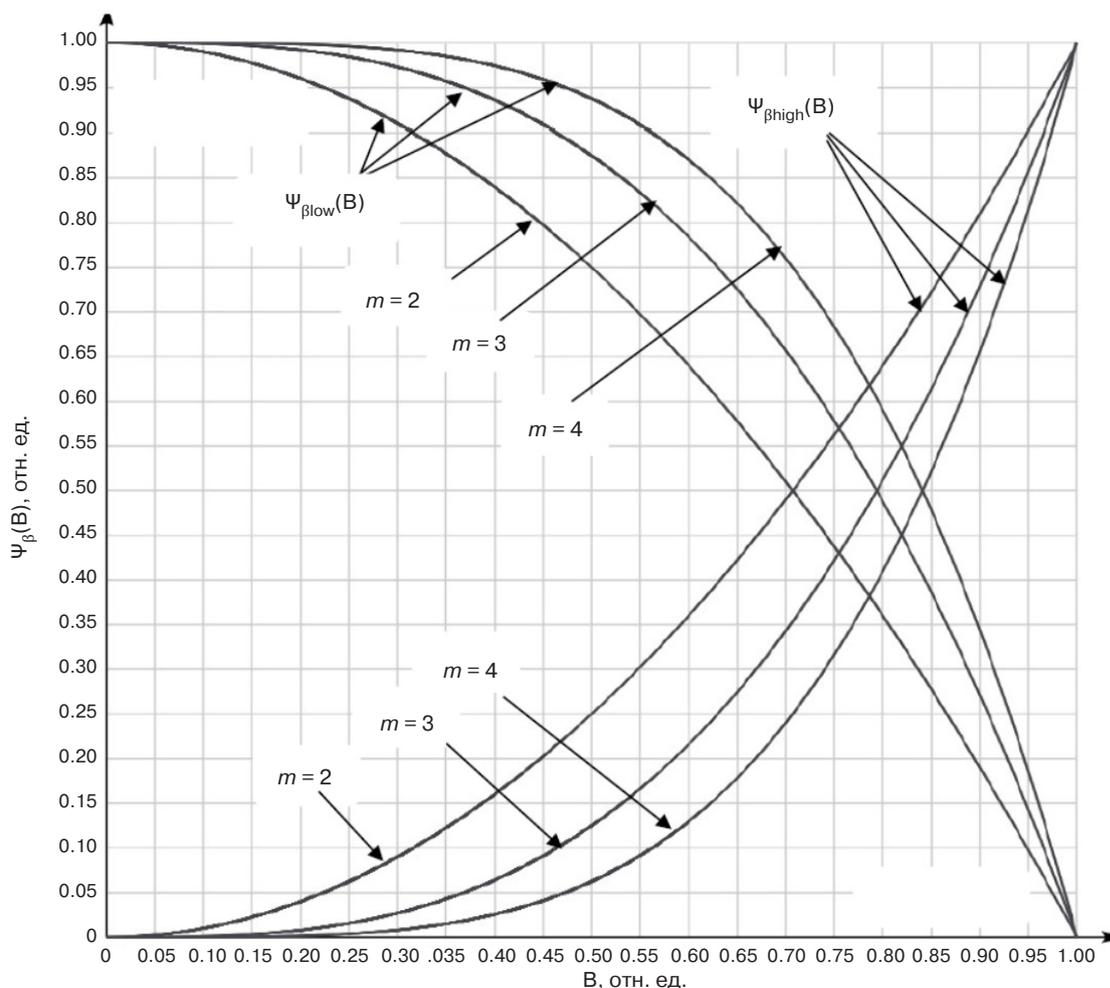


Рис. 3. Функции принадлежности $\Psi_{low}(B)$ лингвистической переменной «Достаточность времени на выполнение проекта» к подмножествам $\Psi_{high}(B)$ – «достаточно» и $\Psi_{low}(B)$ – «недостаточно» для различных показателей степени определенности оценок m

Третья четкая входная величина γ – соотношение ресурсов (объема и видов), запрашиваемых предполагаемым исполнителем проекта и выделяемых заказчиком проекта. Функция принадлежности лингвистической переменной «достаточность ресурсов» по параметру «Соотношение ресурсов» (объема и видов), запрашиваемых предполагаемым исполнителем проекта и выделяемых заказчиком проекта имеет две градации: «достаточно» и «недостаточно».

Им соответствуют два нечетких подмножества из общего числа нечеткого множества $\gamma \in \Gamma$, соответствующего соотношению ресурсов Γ , запрашиваемых предполагаемым исполнителем проекта и выделяемых заказчиком. Нечеткое подмножество $\chi_{\gamma low}(\Gamma)$ соответствует оценкам ресурсного обеспечения как «недостаточного» для выполнения работ по проекту, а подмножество $\chi_{\gamma high}(\Gamma)$ – оценкам достаточности ресурсов для выполнения работ по проекту:

$$\chi_{\gamma low}(\Gamma) + \chi_{\gamma high}(\Gamma) = 1; \forall \gamma \rightarrow \in \Gamma. \quad (5)$$

Особенность обеспечения проекта материальными ресурсами заключается в их неравномерном распределении по этапам проекта. Начальные этапы проектной деятельности используют творческий потенциал, интеллектуальные ресурсы исполнителей, а основное потребление материальных ресурсов сконцентрировано на этапах разработки и исследования, моделировании, макетировании, измерениях и испытаниях опытных образцов и других результатов в проектной деятельности. На заключительных этапах – документировании и сдачи-приемки – проект поддерживается информационными и организационно-управленческими ресурсами. Такое распределение материальных и интеллектуальных ресурсов по этапам проекта наиболее адекватно описывается функцией принадлежности лингвистической переменной «Достаточность ресурсов» в виде сигмоиды (рис. 4):

$$\chi_{\gamma high}(\Gamma) = 1 - e^{-2k\gamma}; \chi_{\gamma low}(\Gamma) = e^{-2k\gamma}, \quad (6)$$

где k – показатель увеличения потребности в материальных ресурсах на этапах проекта.

Оценки лингвистического параметра δ «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» относятся к трем градациям: «не соответствует», «частично соответствует» и «соответствует». Параметр δ представляет собой объединение оценок по трем рассмотренным выше лингвистическим переменным: «Оригинальность проекта», «Достаточность времени» и «Достаточность ресурсов» на выполнение проекта.

Параметр «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» объединяет две оценки от каждой из взаимодействующих сторон – организации-заказчика проекта и организации-исполнителя, повышая тем самым объективность итоговой оценки.

Для анализа лингвистической переменной «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» в представленной нечеткой модели оценки из возможных вариантов

выбрана следующая система правил с логическими операторами «И» и «ИЛИ» [15].

Логический оператор «И» означает пересечение трех нечетких множеств с функцией принадлежности пересечения:

$$\delta_{A \cap B \cap \Gamma} = \min(\varphi_{\alpha}(A); \psi_{\beta}(B); \chi_{\gamma}(\Gamma)). \quad (7)$$

Логический оператор «ИЛИ» означает объединение трех нечетких множеств. Функция принадлежности к этому объединению имеет следующий вид:

$$\delta_{A \cup B \cup \Gamma} = \max(\varphi_{\alpha}(A); \psi_{\beta}(B); \chi_{\gamma}(\Gamma)). \quad (8)$$

Для дефазификации нечеткой оценки по этим трем лингвистическим переменным и получения оценки обобщенного показателя «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» применяется система трех правил.

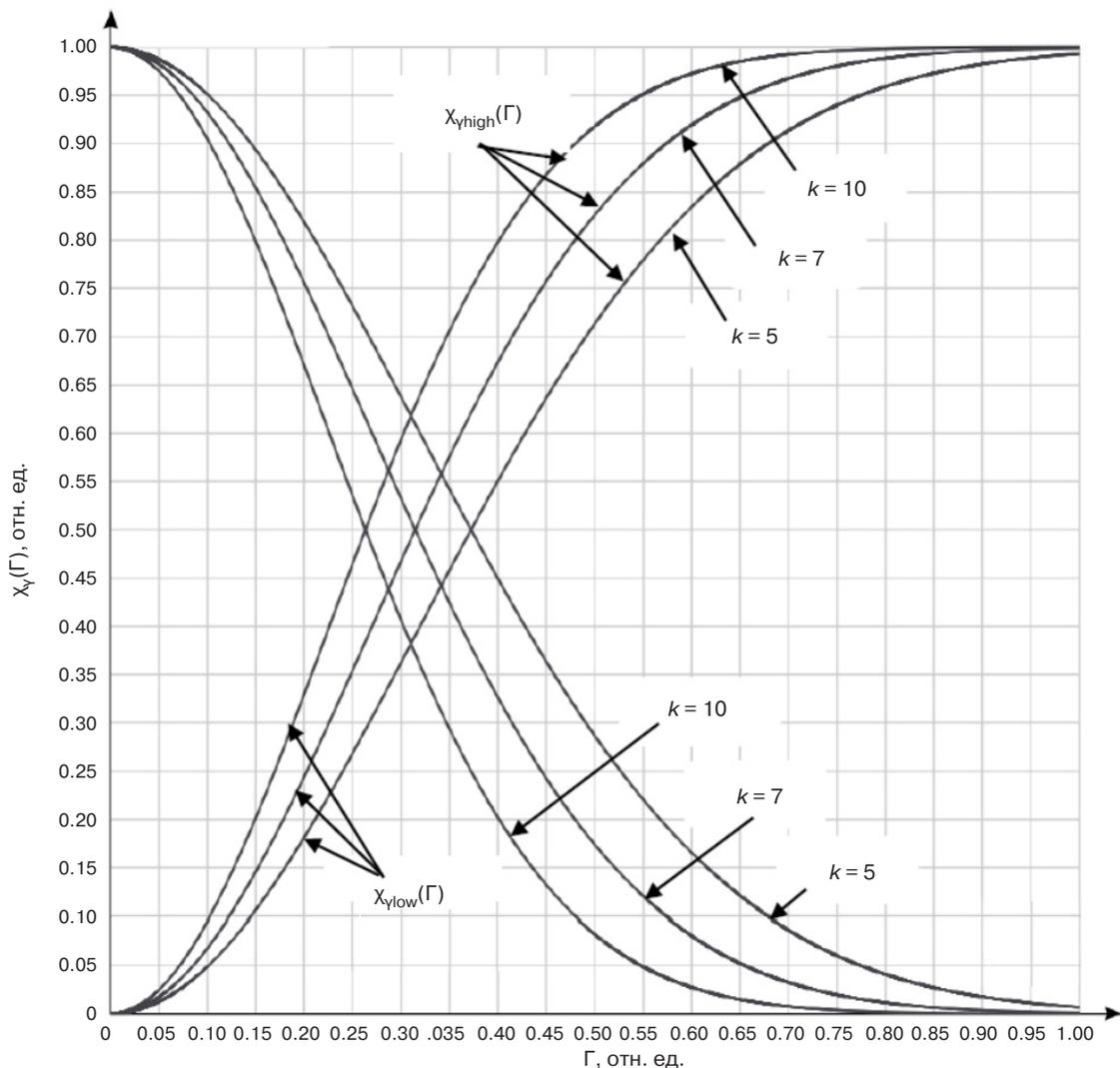


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистической переменной «Достаточность ресурсов» для различных значений показателя k увеличения потребности в материальных ресурсах на этапах проекта

Первое из них:

$$П_1: \text{если } (\alpha \in \alpha_{\text{high}}) \text{ И } (\beta \in \beta_{\text{high}}) \text{ И } (\gamma \in \gamma_{\text{high}}), \\ \text{то } \Delta \in \delta_{\text{high}}$$

означает, что если оценки всех трех лингвистических параметров – «Уникальность проекта», «Достаточность времени» и «Достаточность материальных ресурсов» относятся к подмножествам со степенью соответствия «высокая», то и оценка показателя «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» Δ относится к подмножеству «высокая».

Второе правило:

$$П_2: \text{если } (\alpha \in \alpha_{\text{low}}) \text{ И } (\beta \in \beta_{\text{low}}) \text{ И } (\gamma \in \gamma_{\text{low}}), \\ \text{то } \Delta \in \delta_{\text{low}}$$

означает, что если все три оценки параметров проекта по его уникальности, достаточности времени и ресурсов на выполнение проекта по степени соответствия требованиям относятся к подмножествам «низкая», то и оценка степени соответствия показателя «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» Δ относится к подмножеству «низкая» – (индекс «low»).

Из правила $П_3$:

$$\text{если } (\alpha \in \alpha_{\text{high}}) \text{ И } (\beta \in \beta_{\text{high}}) \text{ И } (\gamma \in \gamma_{\text{low}}) \text{ ИЛИ} \\ \text{ИЛИ } (\alpha \in \alpha_{\text{low}}) \text{ И } (\beta \in \beta_{\text{high}}) \text{ И } (\gamma \in \gamma_{\text{high}}) \text{ ИЛИ} \\ \text{ИЛИ } (\alpha \in \alpha_{\text{high}}) \text{ И } (\beta \in \beta_{\text{low}}) \text{ И } (\gamma \in \gamma_{\text{high}}), \\ \text{следует: } \Delta \in \delta_m.$$

Это значит, что, если оценка степени принадлежности хотя бы одного из трех лингвистических параметров проекта относится к подмножеству «низкая» при принадлежности двух других параметров к подмножеству «высокая», оценка параметра «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» Δ относится к подмножеству «средняя» (подмножество оценок с индексом «m»).

Четвертое правило учитывает еще одно из возможных сочетаний значений нечетких лингвистических параметров проекта:

$$П_4: \text{если } (\alpha \in \alpha_{\text{high}}) \text{ И } (\beta \in \beta_l) \text{ И } (\gamma \in \gamma_l) \text{ ИЛИ} \\ \text{ИЛИ } (\alpha \in \alpha_l) \text{ И } (\beta \in \beta_l) \text{ И } (\gamma \in \gamma_{\text{high}}) \text{ ИЛИ} \\ \text{ИЛИ } (\alpha \in \alpha_{\text{low}}) \text{ И } (\beta \in \beta_{\text{high}}) \text{ И } (\gamma \in \gamma_{\text{low}}), \\ \text{следует: } \Delta \in \delta_{\text{low}}$$

и означает, что если только один из трех лингвистических параметров проекта относится к подмножествам с высокой степенью соответствия (индекс «high»), а два других – к подмножествам с низкой

степенью соответствия (индекс «low»), то и параметр «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» Δ относится к подмножеству с низкой степенью соответствия требованиям, или – «не соответствует».

Преобразование нечеткого логического вывода по установленным правилам к соответствующим четким значениям оценки системы менеджмента (дефаззификация) дает оценку параметру «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя», учитывающую оценки обеих сторон в проекте.

Рассмотрим в качестве примера оценку параметра «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» по входным данным – экспертной оценке трех параметров планируемого проекта на основе предшествующего опыта исполнителя и заказчика проекта.

Так, если входные данные – экспертная (т.е. четкая) оценка уникальности проекта составила 0.75, то значение функции ее принадлежности уникальности проекта к подмножеству со степенью соответствия «высокая», рассчитанная по формуле (2) для уровня заимствований в проекте $n = 0.7$, составляет 0.817; для $n = 0.5$ равно 0.866; а для $n = 0.3$ равно 0.903. Соответственно, для тех же значений экспертной оценки возможности достижения уникальности проекта с показателем 0.75 значение функции принадлежности оценки уникальности проекта к подмножеству «низкая» для уровня заимствований в проекте $n = 0.7$ составляет 0.183; для $n = 0.5$ равно 0.134; а для $n = 0.3$ равно 0.083.

Для экспертной оценки входного параметра – соотношения запрашиваемого исполнителем и выделяемого заказчиком временного интервала на выполнение проекта $\beta = 0.80$ значение функции принадлежности «Достаточность времени» на выполнение проекта к подмножеству «достаточно», рассчитанные по формуле (3); для «показателя нечеткости» $m = 2$ оказывается равным 0.64; для $m = 3$ равно 0.51; а для $m = 4$ равно 0.41. Для того же значения входного параметра $\gamma = 0.80$ значения функции принадлежности к подмножеству «недостаточно» для $m = 2$ оказываются равными 0.36; для $m = 3$ равно 0.49; а для $m = 4$ равно 0.59.

Значения функции принадлежности лингвистической переменной «Достаточность ресурсов» к подмножеству «достаточно» для параметра $\gamma = 0.65$, рассчитанные по формулам (4) с различными показателями увеличения потребности в материальных ресурсах на этапах проекта k , оказываются равными: 0.88 для $k = 5$; 0.93 для $k = 7$ и 0.98 для $k = 10$.

Степень принадлежности лингвистической переменной «Достаточность материальных ресурсов» к подмножеству «низкая» оценивается, соответственно, как 0.12 для $k = 5$; 0.07 для $k = 7$ и 0.02 для $k = 10$.

Полученные значения функций принадлежности для каждого из лингвистического параметра проекта показывают, что все они относятся к подмножествам, свидетельствующим о высокой степени соответствия требованиям по уникальности проекта и достаточности временных и материальных ресурсов. Дефаззификация и оценка принадлежности параметра «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» к подмножеству «высокая» определяется по правилу Π_1 с логическим оператором «И»:

$$\text{для } n = 0.7, m = 2, k = 5: \delta_{A \cap B \cap \Gamma} = \min(\varphi_{\text{high}}(A); \psi_{\text{high}}(B); \gamma_{\text{high}}(\Gamma)) = \min(0.82; 0.64; 0.88) = 0.64;$$

$$\text{для } n = 0.5, m = 3, k = 7: \delta_{A \cap B \cap \Gamma} = \min(\varphi_{\text{high}}(A); \psi_{\text{high}}(B); \gamma_{\text{high}}(\Gamma)) = \min(0.87; 0.51; 0.93) = 0.51;$$

$$\text{для } n = 0.3, m = 4, k = 10: \delta_{A \cap B \cap \Gamma} = \min(\varphi_{\text{high}}(A); \psi_{\text{high}}(B); \gamma_{\text{high}}(\Gamma)) = \min(0.90; 0.41; 0.98) = 0.41.$$

Оценка степени принадлежности лингвистической переменной «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» к нечеткому подмножеству «низкая» по правилу Π_2 дает следующие результаты:

$$\text{для } n = 0.7, m = 2, k = 5: \delta_{A \cap B \cap \Gamma} = \min(\varphi_{\text{low}}(A); \psi_{\text{low}}(B); \gamma_{\text{low}}(\Gamma)) = \min(0.18; 0.46; 0.12) = 0.12;$$

$$\text{для } n = 0.5, m = 3, k = 7: \delta_{A \cap B \cap \Gamma} = \min(\varphi_{\text{low}}(A); \psi_{\text{low}}(B); \gamma_{\text{low}}(\Gamma)) = \min(0.13; 0.49; 0.07) = 0.07;$$

$$\text{для } n = 0.3, m = 4, k = 10: \delta_{A \cap B \cap \Gamma} = \min(\varphi_{\text{low}}(A); \psi_{\text{low}}(B); \gamma_{\text{low}}(\Gamma)) = \min(0.10; 0.59; 0.02) = 0.02.$$

Это означает, что степень принадлежности параметра «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» к подмножеству «высокая» и составляющая 0.64, 0.51 и 0.41 балла для различных влияющих на выполнение проекта факторов выше степени принадлежности к подмножеству «низкая», оцениваемой при тех же условиях значениями 0.12, 0.07 и 0.02 балла.

Принадлежность показателя «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» к подмножеству «средняя» определяется по правилу Π_3 следующими соотношениями:

$$\text{для } n = 0.7, m = 2, k = 5:$$

$$\begin{aligned} \delta_{A \cap B \cap \Gamma} &= \max(\min(\varphi_{\text{low}}(0.75); \psi_{\text{high}}(0.80); \gamma_{\text{high}}(0.65)); \min(\varphi_{\text{high}}(0.75); \psi_{\text{low}}(0.80); \gamma_{\text{high}}(0.65)); \\ &\min(\varphi_{\text{high}}(0.75); \psi_{\text{high}}(0.80); \gamma_{\text{low}}(0.65))) = \max(\min(0.18; 0.64; 0.88); \\ &\min(0.87; 0.64; 0.93); \min(0.82; 0.46; 0.12)) = \max(0.18; 0.46; 0.12) = \mathbf{0.46}; \end{aligned}$$

$$\text{для } n = 0.5, m = 3, k = 7:$$

$$\begin{aligned} \delta_{A \cap B \cap \Gamma} &= \max(\min(\varphi_{\text{low}}(0.75); \psi_{\text{high}}(0.80); \gamma_{\text{high}}(0.65)); \min(\varphi_{\text{high}}(0.75); \psi_{\text{low}}(0.80); \gamma_{\text{high}}(0.65)); \\ &\min(\varphi_{\text{high}}(0.75); \psi_{\text{high}}(0.80); \gamma_{\text{low}}(0.65))) = \max(\min(0.13; 0.51; 0.93); \\ &\min(0.82; 0.49; 0.88); \min(0.87; 0.51; 0.07)) = \max(0.13; 0.49; 0.07) = \mathbf{0.49}; \end{aligned}$$

$$\text{для } n = 0.3, m = 4, k = 10:$$

$$\begin{aligned} \delta_{A \cap B \cap \Gamma} &= \max(\min(\varphi_{\text{low}}(0.75); \psi_{\text{high}}(0.80); \gamma_{\text{high}}(0.65)); \min(\varphi_{\text{high}}(0.75); \psi_{\text{low}}(0.80); \gamma_{\text{high}}(0.65)); \\ &\min(\varphi_{\text{high}}(0.75); \psi_{\text{high}}(0.80); \gamma_{\text{low}}(0.65))) = \max(\min(0.10; 0.41; 0.98); \\ &\min(0.90; 0.59; 0.98); \min(0.90; 0.41; 0.02)) = \max(0.10; 0.59; 0.02) = \mathbf{0.59}. \end{aligned}$$

Оценка рассчитанных по правилам Π_1 , Π_2 и Π_3 значений функций принадлежности параметра «Соответствие проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя» к подмножествам «высокая», «средняя» и «низкая» дает следующие результаты:

$$\text{для } n = 0.7, m = 4, k = 10: 0.64; \mathbf{0.46}; 0.12;$$

$$\text{для } n = 0.5, m = 3, k = 7: 0.51; \mathbf{0.49}; 0.07;$$

$$\text{для } n = 0.3, m = 4, k = 10: 0.41; \mathbf{0.59}; 0.02.$$

Сравнение полученных значений степени согласованности в оценках исполнителя заказчика по планируемому проекту позволяет:

- заказчику принять решение в отношении перспективности и целесообразности постановки работ по проекту с учетом различных влияющих факторов, пересмотреть и изменить требования к проекту, выделяемым ресурсам, срокам выполнения;
- исполнителю изыскать дополнительные возможности для выполнения проекта в предлагаемых заказчиком условиях.

2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ СООТВЕТСТВИЯ ПРОЕКТА ТРЕБОВАНИЯМ ЗАКАЗЧИКА И ВОЗМОЖНОСТЯМ ИСПОЛНИТЕЛЯ МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Применение рассмотренного выше метода для оценки степени соответствия проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя, учитывающая восприятие обеих взаимодействующих сторон, состоит в выполнении последовательности этапов, представленных на рис. 1² [15, 16], и включает:

- идентификацию проекта, его цели, назначения, планируемые результаты и описание совокупности его наиболее значимых, существенных свойств, параметров, характеристик (уникальность, объем и виды ресурсов, временные рамки, в частности);
- формулирование задачи получения совместной оценки соответствия проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя для принятия на ее основе решений о возможности и целесообразности постановки работ по проекту;
- прогнозируемое расчетами или/и экспертной оценкой определение значений входных параметров моделируемого проекта и установление их для последующей фазификации;
- фазификацию – переход к нечеткости, приведение входных четких величин – прогнозируемой степени оригинальности результата проекта, уровня достаточности ресурсов, и сроков выполнения проекта к нечетким лингвистическим переменным;
- формулирование лингвистических переменных и составление функции (функций) принадлежности для них. Описание лингвистических переменных функциями принадлежности;
- выбор системы правил обращения с лингвистическими переменными с целью формулирования нечеткого логического вывода;
- преобразование лингвистических переменных с помощью системы правил и получение нечеткого логического вывода;
- дефазификацию – обратный переход от нечеткого логического вывода к четкой величине – выходному параметру, т.е. к обобщенной оценке планируемого для выполнения проекта – степени соответствия проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя;
- получение выхода – количественного значения степени соответствия проекта требованиям заказчика и возможностям исполнителя, принимаемого обеими сторонами.

Дополненная требованиями к компетентности исполнителей документированная методика может стать инструментом для принятия и реализации решений с целью управления проектной деятельностью, включая научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы [12–14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные метод и методика позволяют дать оценку проекта, не только планируемого к постановке, но и проекта выполненного – по полученным результатам. Повысит эффективность управления проектом также оценка представленным методом его отдельных этапов, а при необходимости – еще большая его детализация, разукрупнение и оценка отдельных видов работ.

Представленный аналитический метод, альтернативный экспертным, и методика его применения в принятии и реализации решений на основании полученной обобщенной оценки обеспечит более высокую их обоснованность, объективность и эффективность.

Документированная процедура оценки обеспечит воспроизводимость результатов на основе идентичности и повторяемости действий различных исполнителей, снижение зависимости от их субъективных качеств, повышение объективности оценки в целом, сопоставимость с предшествующими результатами оценок подобных проектов. Единство критериев и процедур методики создает также возможность сопоставления результатов оценки проектной деятельности различных исполнителей.

Перспективным направлением развития метода и методики является разработка и применение для анализа в нечеткой системе функций принадлежности, учитывающих большее число различных характеристик проекта и его составляющих, определяющих и потенциал исполнителя и требования заказчика. Увеличивающийся объем данных и усложняющиеся вследствие этого вычислительные процессы потребуют качественно новых ресурсов для обработки информации как для получения оценки, так и для разработки вариантов возможных решений на ее основе. Эффективным решением проблемы может стать применение в процессах и оценки, и разработки управленческих решений цифровых информационных технологий и технологий искусственного интеллекта.

Благодаря инвариантности критериев – атрибутов проектной деятельности представленные метод и методика являются универсальным инструментом в управлении проектами различных видов и по различным направлениям деятельности, включая научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.

² Dadone P. *Design Optimization of Fuzzy Logic Systems*: Ph. Dissertation. Blacksburg, Virginia; 2001. 197 p.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ципес Г.Л. Методы оценки эффективности проектно-ориентированной деятельности. Обзор текущего состояния и перспектив развития. *Управление проектами и программами*. 2009;03(19):190–205.
2. Галушко А.Д., Юрина В.С., Юрлова И.С. Обзор методов оценки и анализа инвестиционных проектов. *NovaInfo*. 2016;3(57):317–328. <https://elibrary.ru/xеukzr>
3. *Риск-анализ инвестиционного проекта*; под ред. М.В. Грачёвой. М.: ЮНИТИ; 2001. 350 с. ISBN 5-238-00292-0
4. Илларионов А.В., Клименко Э.Ю. *Портфель проектов: Инструмент стратегического управления предприятием*. М.: Альпина Паблишер; 2013. 312 с. ISBN 978-5-9614-2261-0
5. Разу М.Л. *Управление проектом: основы проектного управления*. М.: КноРус; 2015. 756 с. ISBN 978-5-406-04370-7
6. Грачёва М.В. *Проектный анализ: учет рисков*. М.: Проспект; 2017. 178 с. ISBN 978-5-392-26095-9
7. Тернер Дж.Р. *Руководство по проектно-ориентированному управлению*: пер. с англ. М.: Издательский дом Гребенникова; 2007. 552 с. ISBN 5-93890-027-1
8. Бенко К., Мак-Фарлан Ф.У. *Управление портфелями проектов: соответствие проектов стратегическим целям компании*: пер. с англ. М.: Вильямс; 2007. 240 с. ISBN 978-5-8459-1059-2
9. Мазур И.И., Шапиро В.Д., Ольдерогге Н.Г. *Управление проектами*. М.: Омега-Л; 2001. 664 с. ISBN 5-370-00049-2
10. Ковалев В.В. *Методы оценки инвестиционных проектов*. М.: Финансы и статистика; 2008. 144 с.
11. Тяпухин А.П. К вопросу о концепции управления цепями создания ценностей. *Управленческое консультирование*. 2023;11:46–59. <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2023-11-46-59>
12. Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б. Модель и метод оценки результативности проекта. *Фундаментальные проблемы техники и технологии*. 2024;5(367):81–90.
13. Сидорин В.В. Проектирование и разработка радиоэлектронных средств с применением технологий искусственного интеллекта. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2024»): Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2024. С. 566–573.
14. Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б. Прогнозирование и управление выполнением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Марковскими методами. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии*. 2023;3:58–62. <https://www.elibrary.ru/vgtgnor>
15. Пегат А. *Нечеткое моделирование и управление*: пер. с англ. М.: Бином. Лаборатория знаний; 2009. 798 с. ISBN 978-5-94774-353-1
16. Kandel A. *Fuzzy Control Systems*. Boca Raton: CRC Press; 1994. 656 p.
17. Леденёва Т.М., Решетников А.Д. Особенности реализации механизма нечеткого логического вывода в нечетких системах. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;6(108):107–117. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.018>
18. Керцнер Г. *Стратегическое планирование для управления проектами с использованием модели зрелости*: пер. с англ. М.: АйТи; ДМК Пресс; 2003. 318 с. ISBN 5-94074-211-4
19. Гусева Е.Г. *Мониторинг и оценка проектов*. СПб.: ЦРНО; 2014. 43 с.

REFERENCES

1. Tsipes G.L. Methods of an assessment of efficiency of project-oriented activity. Review of current state and prospects of development. *Upravlenie proektami i programmami*. 2009;03(19):190–205 (in Russ.).
2. Galushko A.D., Yurina V.S., Yurlova I.S. Review of methods of assessment and analysis of investment projects. *NovaInfo*. 2016;3(57):317–328 (in Russ.).
3. Gracheva M.V. (Ed.). *Risk-analiz investitsionnogo proekta (Risk Analysis of Investment Project)*. Moscow: YuNITI; 2001. 350 p. (in Russ.). ISBN 5-238-00292-0
4. Illarionov A.V., Klimenko E.Yu. *Portfel' proektov: Instrument strategicheskogo upravleniya predpriyatiem (Project Portfolio: Tool for Strategic Enterprise Management)*. Moscow: Alpina Publisher; 2013. 312 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9614-2261-0
5. Razu M.L. *Upravlenie proektom: osnovy proektnogo upravleniya (Project Management: Fundamentals of Project Management)*. Moscow: KnoRus; 2015. 756 p. (in Russ.). ISBN 978-5-406-04370-7
6. Gracheva M.V. *Proektnyi analiz: uchet riskov (Project Analysis: Risk Accounting)*. Moscow: Prospekt; 2017. 178 p. (in Russ.). ISBN 978-5-392-26095-9
7. Turner J.R. *The Handbook of Project-Based Management*. London, NY: McGraw-Hill Book; 1995. 540 p. [Turner J.R. *Rukovodstvo po proektno-orientirovannomu upravleniyu (Handbook of Project-Oriented Management)*: transl. from Engl. Moscow: Grebennikov Publishing House; 2007. 552 p. (in Russ.). ISBN 5-93890-027-1]
8. Benko C., Mak-Farlan F.W. *Connecting the Dots: Aligning Projects with Objectives in Unpredictable Times*. Harvard Business Review Press; 2003. 246 p.] [Benko C., Mak-Farlan F.W. *Upravlenie portfelyami proektov: sootvetstvie proektov strategicheskim tselyam kompanii (Connecting the Dots: Aligning Projects with Objectives in Unpredictable Times)*: transl. from Engl. Moscow: Vil'yams; 2007. 240 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8459-1059-2]

9. Mazur I.I., Shapiro V.D., Olderogge N.G. *Upravlenie proektami (Project Management)*. Moscow: Omega-L; 2001. 664 p. (in Russ.). ISBN 5-370-00049-2
10. Kovalev V.V. *Metody otsenki investitsionnykh proektov (Methods of Investment Project Evaluation)*. Moscow: Finansy i statistika; 2008. 144 p. (in Russ.).
11. Tyapukhin A.P. On the issue of the concept of value chain management. *Upravlencheskoe konsul'tirovanie = Administrative Consulting*. 2023;11:46–59 (in Russ.). <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2023-11-46-59>
12. Sidorin V.V., Khalilyulina N.B. Model and method of evaluating the effectiveness of the project. *Fundamental'nye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2024;5(367):81–90 (in Russ.).
13. Sidorin V.V. Design and development of radio-electronic devices using artificial intelligence technologies. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (RADIOINFOCOM-2024): Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2024. P. 566–573 (in Russ.).
14. Sidorin V.V., Khalilyulina N.B. Forecasting and management of research and development work by Markov methods. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina. Seriya 4. Promyshlennye tekhnologii = Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4. Industrial Technologies*. 2023;3:58–62 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vgtnor>
15. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. NY: Physica Heidelberg; 2001. 728 p.
[Piegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie (Fuzzy Modeling and Control)*: transl. from Engl. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy; 2009. 798 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94774-353-1]
16. Kandel A. *Fuzzy Control Systems*. Boca Raton: CRC Press; 1994. 656 p.
17. Ledeneva T.M., Reshetnikov A.D. Aspects of the implementation of the fuzzy inference mechanism in fuzzy systems. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2021;6(108):107–117 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.018>
18. Kerzner H. *Strategic Planning for Project Management Using a Project Management Maturity Model*. NY: J. Wiley; 2001. 280 p.
[Kerzner H. *Strategicheskoe planirovanie dlya upravleniya proektami s ispol'zovaniem modeli zrelosti (Strategic Planning for Project Management Using a Project Management Maturity Model)*: transl. from Engl. Moscow: AITi; DMK Press; 2003. 318 p. (in Russ.). ISBN 5-94074-211-4]
19. Guseva E.G. *Monitoring i otsenka proektov (Monitoring and Evaluation of Projects)*. St. Petersburg: TsRNO; 2014. 43 p. (in Russ.).

Об авторе

Сидорин Виктор Викторович, д.т.н., профессор, Автономная некоммерческая организация «Институт испытаний и сертификации вооружения и военной техники» (АНО «ИнИС ВВТ») (11524, Россия, Москва, Электродная ул., д. 10). E-mail: wwsid@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 1786-8245, <https://orcid.org/0009-0003-3555-4687>

About the Author

Viktor V. Sidorin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment (10, Elektrodnaya ul., Moscow, 11524 Russia). E-mail: wwsid@yandex.ru. RSCI SPIN-code 1786-8245, <https://orcid.org/0009-0003-3555-4687>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 29.09.2025 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 16.50.

Тираж 50 экз. Заказ № 3196.

Подписку на печатную версию

Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University,
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print September 29, 2025.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 16.50.

50 copies. Order No. 3196.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

