



# 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  
2026, том 14, № 3

Russian Technological Journal  
2026, Vol. 14, No. 3

## Russian Technological Journal 2026, том 14, № 3

Дата опубликования 29 мая 2026 г.

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.

Периодичность: 6 раз в год.

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).

### Учредитель и издатель:

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

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.

### 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.

### 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.

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).

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

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

## Russian Technological Journal 2026, Vol. 14, No. 3

Publication date May 29, 2026.

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.

Periodicity: six times a year.

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).

### Founder and Publisher:

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

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.

### 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.

### 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.

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.

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

## 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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:novikov@ipu.ru)
- Перно Филипп** Dr. Sci. (Electronics), профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, [philippe.pernod@ec-lille.fr](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:mishinevaiv@minprom.gov.ru)

## Содержание

### **Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности**

- 7** *Zaid Arafat, Olga V. Yudina, Zainab A. Abdulazeez*  
Standard generative adversarial networks for data augmentation in imbalanced intrusion detection system datasets

- 24** *Н.С. Курдюков, В.Н. Калинин, С.А. Кудж, Д.О. Жуков*  
Разработка прикладных инструментов установления информационного морфизма при анализе текстовых документов на основе семантико-онтологической и графовой моделей

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

- 43** *С.У. Увайсов, А.В. Долматов, Т.Х. Во, Д.Х. Нгуен, С.Х. Фам, Р.М. Увайсов*  
Локализация дефектов конструкций печатных узлов методом вибродиагностики

### **Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы**

- 60** *В.А. Кожемяко, А.Д. Ярлыков*  
Нейровизионное распознавание сигнальных радиоизображений

### **Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния**

- 72** *И.В. Гладышев, А.Н. Юрасов, М.М. Яшин*  
Применение метода Берремана при моделировании магнитооптических эффектов Керра в многослойных структурах

- 83** *Е.Ф. Певцов, Т.А. Деменкова, М.И. Малето, А.С. Сигов, Ю.А. Коротаев, Н.Д. Евгеньев*  
Физически неклонированные функции в аналоговых интегральных схемах

### **Аналитическое приборостроение и технологии**

- 106** *П.С. Кузнецов, А.О. Синельников*  
Оптимальная конструкция электродов для микроминиатюрной электронной оптики

### **Математическое моделирование**

- 115** *С.Е. Савотченко, Н.О. Афанасьева*  
Особенности аналитического моделирования нелинейных поверхностных волн в градиентных средах

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

- 131** *В.В. Шпак*  
Планирование воспроизводственных процессов в электронике на стратегическую перспективу

### **Мировоззренческие основы технологии и общества**

- 145** *Н.Ю. Рябченко, А.П. Федоров*  
Осмысление глобальных экологических вызовов современности: технологические и социокультурные аспекты

- 154** *Н.И. Чернова, Е.А. Иванова, Н.В. Катахова*  
Дидактическое моделирование обучения студентов технологического университета правилам чтения иноязычных текстов

## Contents

### Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Zaid Arafat, Olga V. Yudina, Zainab A. Abdulazeez*  
Standard generative adversarial networks for data augmentation in imbalanced intrusion detection system datasets
- 24** *Nikita S. Kurdyukov, Vladimir N. Kalinin, Stanislav A. Kudzh, Dmitry O. Zhukov*  
Development of applied tools for establishing information morphism in the analysis of text documents based on semantic-ontological and graph models

### Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

- 43** *Saygid U. Uvaysov, Aleksey V. Dolmatov, Vo The Hai, Nguyen Duc Hai, Pham Xuan Hanh, Ruslan M. Uvaysov*  
Localization of structural defects of printed circuit board assembly by vibration diagnostics

### Modern radio engineering and telecommunication systems

- 60** *Vladislav A. Kozhemyako, Alexey D. Yarlykov*  
Neurovisual recognition of signal radio images

### Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 72** *Igor V. Gladyshev, Alexey N. Yurasov, Maxim M. Yashin*  
Application of the Berreman formalism for modeling magneto-optical Kerr effects in multilayered structures
- 83** *Evgenii Ph. Pevtsov, Tatyana A. Demenkova, Mikhail I. Maletov, Alexander S. Sigov, Yuri A. Korotaev, Nikita D. Evgenev*  
Physically unclonable functions in analog integrated circuits

### Analytical instrument engineering and technology

- 106** *Pavel S. Kuznetsov, Anton O. Sinelnikov*  
Optimal electrode design for microminiature electronic optics

### Mathematical modeling

- 115** *Sergey E. Savotchenko, Nadezhda O. Afanasyeva*  
Features of analytical modeling of nonlinear surface waves in gradient media

### Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems

- 131** *Vasily V. Shpak*  
Planning of reproduction processes in electronics for a strategic perspective

### Philosophical foundations of technology and society

- 145** *Nikita Yu. Ryabtchenko, Artem P. Fedorov*  
Conceptualizing the global environmental challenges of our time: Technological and sociocultural aspects
- 154** *Nadezhda I. Chernova, Ekaterina A. Ivanova, Nataliya V. Katakhova*  
Didactic modeling for teaching technological university students the rules of foreign language texts reading

УДК 004.852:004.056.5

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-7-23>

EDN CZKEAI



RESEARCH ARTICLE

# Standard generative adversarial networks for data augmentation in imbalanced intrusion detection system datasets

Zaid Arafat <sup>1, @</sup>,  
Olga V. Yudina <sup>2</sup>,  
Zainab A. Abdulazeez <sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Kerbala, Kerbala, 56001 Iraq

<sup>2</sup> Cherepovets State University, Cherepovets, 162600 Russia

@ Автор для переписки, e-mail: [zaid.q@uokerbala.edu.iq](mailto:zaid.q@uokerbala.edu.iq)

• Submitted: 01.07.2025 • Revised: 12.11.2025 • Accepted: 24.03.2026

## Abstract

**Objectives.** Class imbalance in intrusion detection system (IDS) datasets poses challenges for achieving balanced detection performance. Setting out to evaluate the quality and utility of GAN-generated samples for improving the generalization ability of IDS, this research presents a standard generative adversarial network (GAN) framework as a means of generating synthetic network traffic data for augmenting IDS training datasets. The main focus of the study is an assessment of whether standard GANs can produce realistic synthetic traffic that is not based on targeted generation of minority attack classes.

**Methods.** When implemented on the NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 collections, the GAN displayed precision by mimicking real network traffic distribution. This can be confirmed by inspecting the histograms of different features between flow durations and byte counts and packet rates.

**Results.** As well as providing stable learning, the presented framework retains diverse sample generation and generates real synthetic data examples. A Random Forest trained on real data achieved 99.86% on the CIC-IDS2017 dataset. This high level of performance was maintained using the GAN-generated synthetic data to confirm the quality of synthetic traffic generation as a tool of overall data augmentation. In contrast, a conventional GAN produces samples based on the total data distribution without focusing on particular attack type, i.e., minority attacks (user-to-root (U2R) and remote-to-local (R2L)) are not explicitly solved.

**Conclusions.** The paper has shown that conventional GANs have the capability to produce verifiable synthetic network traffic that does not deteriorate overall classifier performance, which validates proof-of-concept of GAN-based data augmentation in IDS. Nonetheless, the conventional GAN is not concerned with minority attack generation, where it produces samples based on the general distribution but without controlling the class. The crucial limitations of the presented methodology are that it is computationally complex and cannot target underrepresented types of attacks (U2R, R2L). Further improvements in conditional GANs should be performed in the future to make them capable of creating class-specific generation and removing class disparity directly in IDS datasets.

**Keywords:** generative adversarial networks (GANs), intrusion detection systems (IDS), synthetic network traffic, class imbalance, data augmentation, NSL-KDD, CIC-IDS2017, CIC-IDS2018

**For citation:** Arafat Z., Yudina O.V., Abdulazeez Z.A. Standard generative adversarial networks for data augmentation in imbalanced intrusion detection system datasets. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):7–23. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-7-23>, <https://www.elibrary.ru/CZKEAI>

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

The authors declare no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Стандартные генеративно-сопоставительные сети для увеличения данных в несбалансированных наборах данных систем обнаружения вторжений

З. Арафат<sup>1, @</sup>,  
О.В. Юдина<sup>2</sup>,  
З.А. Абдулазиз<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет Кербалы, Кербала, 56001 Ирак

<sup>2</sup> Череповецкий государственный университет, Череповец, 162600 Россия

@ Corresponding author, e-mail: [zaid.q@uokerbala.edu.iq](mailto:zaid.q@uokerbala.edu.iq)

• Поступила: 01.07.2025 • Доработана: 12.11.2025 • Принята к опубликованию: 24.03.2026

### Резюме

**Цели.** Несбалансированность классов в наборах данных систем обнаружения вторжений (intrusion detection system, IDS) создает сложности для достижения равномерной эффективности обнаружения. В данном исследовании представлен стандартный каркас на основе генеративно-сопоставительной сети (generative adversarial network, GAN) для синтетической генерации сетевого трафика с целью расширения обучающих наборов данных IDS. Цель работы – оценить качество и практическую ценность сгенерированных GAN образцов для повышения способности IDS к обобщению. Исследование сосредоточено на проверке того, могут ли стандартные GAN генерировать реалистичный синтетический трафик, а не на целевой генерации отдельных малочисленных классов атак.

**Методы.** При реализации на наборах данных для исследований в области обнаружения вторжений NSL-KDD, CIC-IDS2017 и CIC-IDS2018 структура GAN продемонстрировала высокую точность в воспроизведении распределения реального сетевого трафика, что было подтверждено анализом гистограмм различных характеристик, таких как длительность потоков, объем байтов и частота пакетов.

**Результаты.** Структура обеспечивает стабильное обучение, поддерживая разнообразие генерируемых образцов и создавая аутентичные синтетические данные. На наборе данных CIC-IDS2017 модель случайного леса, обученная на реальных данных, достигла точности 99,86%. Синтетические данные, сгенерированные с помощью GAN, сохранили тот же уровень точности (99,86%), что подтверждает качество генерации синтетического сетевого трафика для общего расширения данных. Однако стандартная GAN генерирует образцы

из общей распределенной выборки данных, не ориентируясь на конкретные классы атак, что означает, что малочисленные атаки (U2R<sup>1</sup>, R2L<sup>2</sup>) не были специально учтены.

**Выводы.** Данное исследование демонстрирует, что стандартные GAN способны генерировать реалистичный синтетический сетевой трафик, сохраняющий общую производительность классификатора, что подтверждает концепцию применения GAN для увеличения данных в системах обнаружения вторжений. Однако стандартная GAN не решает задачу генерации малочисленных атак, поскольку создает выборки из общей распределенной выборки данных без классового контроля. Основные ограничения методологии включают вычислительную сложность и невозможность целенаправленной генерации недостаточно представленных классов атак (U2R, R2L). В дальнейшем требуется использование условных GAN, чтобы обеспечить классово-ориентированную генерацию и напрямую устранить дисбаланс классов в наборах данных IDS.

**Ключевые слова:** генеративные сопоставительные сети, системы обнаружения вторжений, синтетический сетевой трафик, дисбаланс классов, аугментация данных, NSL-KDD, CIC-IDS2017, CIC-IDS2018

**Для цитирования:** Arafat Z., Yudina O.V., Abdulazeez Z.A. Standard generative adversarial networks for data augmentation in imbalanced intrusion detection system datasets. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):7–23. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-7-23>, <https://www.elibrary.ru/CZKEAI>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

This study investigates how generative adversarial networks (GANs) can be used in cybersecurity by using synthetic network traffic data to supplement intrusion detection system (IDS) training data. The proposed standard GAN framework implemented on the NSL-KDD<sup>3</sup>, CIC-IDS2017<sup>4</sup>, and CIC-IDS2018<sup>5</sup> datasets generate realistic samples of network traffic. Although more representative of modern networks than KDD Cup 1999<sup>6</sup>, the NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets support class imbalance, while minority attack classes, such as user-to-root (U2R) and remote-to-local (R2L), are represented by less than 1% of NSL-KDD samples [1, 2]. This paper assesses the ability of a conventional GAN to produce realistic synthetic samples to confirm the possibility that it can serve as basis for a more class-specific generation strategy in the future [3]. Based on the proposed standard GAN framework trained on NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 benchmarks, realistic synthetic samples are produced to support

a training-stable framework that accounts for loss dynamics and sample diversity (Section 4). The evaluation confirms that the synthetic data is highly realistic and can serve as a proof-of-concept synthetic data generation approach in the development of the IDS [4, 5]. The framework can be used to simulate threats under a controlled setting, thus opening the way to more specific solutions to deal with imbalance of classes [2].

## 1. RELATED WORK

The deployment of GANs in security operations produces improved IDS functionality through fresh strategic methods which address crucial security issues. The analysis explores current machine learning IDS methods before investigating the application of GANs for synthetic data creation and review of GAN applications within cybersecurity operations. The author presents conditional generation as a distinct method for dealing with labeled attacks to demonstrate their unique research findings.

<sup>1</sup> User-to-root – атаки, направленные на обнаружение уязвимостей системы, при которых обычный пользователь несанкционированно получает root-права.

<sup>2</sup> Remote-to-local – атаки, направленные на использование удаленной системы для получения несанкционированного доступа к целевой системе и нанесения ей ущерба.

<sup>3</sup> Network Security Laboratory—Knowledge Discovery in Databases. <https://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html>. Accessed May 02, 2025.

<sup>4</sup> Canadian Institute for Cybersecurity Intrusion detection evaluation dataset (CIC-IDS2017). <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>. Accessed May 02, 2025.

<sup>5</sup> Canadian Institute for Cybersecurity Intrusion detection evaluation dataset (CIC-IDS2018). <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2018.html>. Accessed May 02, 2025.

<sup>6</sup> The KDD Cup 1999 dataset is a benchmark dataset created for the Third International Knowledge Discovery and Data Mining Tools Competition, tied to the KDD-99 conference. Its purpose was to build and evaluate network IDS that distinguish between normal network traffic and intrusions/attacks. <https://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html>. Accessed May 02, 2025.

### 1.1. Machine learning in IDS

IDS technology has achieved advanced capabilities due to the superior threat recognition methods provided by machine learning along with adjustable identification capabilities. Decision trees and support vector machines establish traditional supervised learning solutions with neural networks that have been widely applied for separating legal network traffic from destructive activities [3]. Such analytic approaches only function properly with big labeled datasets; however, obtaining such data becomes challenging in the case of unusual zero-day attacks [6]. Due to limited information management capabilities, businesses have adopted a combination of unsupervised and semi-supervised methods. Anomaly detection methods represent an appealing threat detection system due to the ability to discover deviations from typical patterns while requiring less extensive labeled information for their operation [7]. However, due to the effectiveness of the IDS model being impeded by the limited availability of attack samples, innovative solutions are required to address this problem.

### 1.2. Synthetic data generation for IDS

Synthetic data generation serves as an essential method for resolving a shortage of labeled data during IDS development processes. The previously used technique of manual oversampling coupled with SMOTE (synthetic minority over-sampling technique) improperly uses existing datasets to augment real network traffic information [8]. Zhang et al. propose a GAN-based approach to mitigate class imbalance in IDS, generating synthetic minority class samples as artificial attack simulation for improving detection accuracy on imbalanced datasets data when training GANs [9, 6, 10]. Similarly, Lee et al. [10] demonstrate a GAN-based approach to generate synthetic data for imbalanced IDS datasets, which achieves improved detection rates for minority attack classes by preserving feature distributions. Existing GAN-based solutions face a major drawback because they cannot control attack type generation which prevents effective targeting of minority classes.

### 1.3. Broader applications of GANs in cybersecurity

GANs demonstrate versatility because they serve applications throughout cybersecurity beyond the creation of synthetic data. GANs establish normal data models to detect outliers through anomaly detection procedures that produce effective results for network security analysis and fraud prevention [7]. The detection of subtle deviations becomes more effective through the use of Wasserstein GANs as described in [11, 12]

to develop G-IDS, a GAN-assisted IDS that generates synthetic attack samples to enhance detection of cyber threats in network environments. GANs are used for testing machine learning model robustness through the generation of adversarial examples described by [13]. Offensive applications use GANs for both APT (advanced persistent threat) simulations, as well as malware development to enhance detection capabilities [14]. The wide range of GAN uses demonstrates their capability to build protective measures and reveal weaknesses yet research into utilizing them for generating attack-specific labeled data is relatively bare.

### 1.4. Positioning the current study

Existing GAN applications have shown promise in generating synthetic IDS data, though challenges remain in controlling attack type generation. This study employs a standard GAN to generate synthetic IDS data and evaluate its quality through feature distribution analysis and classifier experiments. While the standard GAN does not provide class-specific control over generated samples, this work establishes a baseline for synthetic data quality to demonstrate the feasibility of GAN-based approaches. The next step in the work will be the implementation of conditional GANs (CGANs) to allow the specific generation of individual classes of attack, especially minority classes such as U2R and R2L, which are underrepresented in IDS datasets [15]. The effectiveness of conditional GANs in IDS, together with the ability to create specific synthetic samples of infrequent attacks, is confirmed by Yilmaz and Masum [16], who also demonstrated the use of this method to improve the work of the model. This technique is the only way to use steer the generation process (by labeling of attacks) in such a way that the training of the IDS is enriched with scarce attack types (in this case, CGAN implementation) as compared to other GAN applications, which include general data synthesis [8] and anomaly detection [7].

### 1.5. Class imbalance in IDS datasets

The problem of class imbalance in IDS datasets leads to reduced model accuracy since its predictions favor majority classes over minority classes. Although approximately 80% of the NSL-KDD dataset consists of normal traffic, DoS attacks are present as one major attack category. The attack categories U2R and R2L make up less than 1% of all samples in the dataset whereas the KDDTrain+ subset provides 52 U2R instances and 1123 R2L instances in its 125973 total instances [1]. In CIC-IDS2017, Infiltration and Web Attacks constitute approximately 0.01% and 0.03% of samples, respectively [2]. Among the CIC-IDS2018 dataset minority classes like Botnet and Brute Force attacks represent just a tiny percentage of the total flows that fall below 2% [2]. The limited availability of

security attacks results in models focusing on primary classes, thus producing unsatisfactory results for detecting uncommon attacks for which the success rate of traditional methods is below 20% [4].

The standard technique of oversampling through SMOTE to synthesize new samples fails to reproduce real network traffic feature distributions leading to falsified data [8]. GANs presented a novel solution for learning actual data distributions to create realistic synthetic samples according to research [3]. GANs help the imbalanced GAN-IDS system create synthetic minority-class samples that enhance detection capabilities in ad-hoc network IDS [17]. Our research utilizes the GAN model to improve NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets by creating multiple counterfeit network traffic records to balance their classes. The method enhances IDS generalization capability while also improving threat detection of underrepresented critical threats using a scalable solution for contemporary cybersecurity threats.

## 2. METHODOLOGY

### 2.1. Dataset description

The analysis employs NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets for training GAN models. Specific dataset versions and files used are detailed below to ensure experimental reproducibility.

- NSL-KDD is an improved version of KDD Cup 1999 with 41 features. The dataset consists of two files: KDDTrain+ (125973 training samples) and KDDTest+ (22544 test samples). Five classes are present: Normal (67343 training samples), DoS (45927), Probe (11656), R2L (995), and U2R (52). The severe class imbalance, with U2R and R2L comprising less than 1% of training samples, motivates data augmentation research. Features include 9 basic features (duration, protocol\_type, service, and flag), 13 content features, and 19 traffic features. Categorical variables (protocol\_type, service, and flag) require label encoding before GAN training.
- CIC-IDS2017 captures network traffic over five days (Monday to Friday) with 80 flow-based features. Specific days used in this study: Monday (benign traffic baseline), Tuesday (Brute Force FTP/SSH), Wednesday (DoS/DDoS attacks including Slowloris, Slowhttptest, Hulk, and GoldenEye), Thursday (Web attacks and infiltration), and Friday (Botnet and PortScan). Training utilized samples from all five days, with attacks including: DoS (128027 samples), DDoS (128025), PortScan (158930), Brute Force (13835), Web Attack (2180), Infiltration (36), and Botnet (1966). Features include Flow Duration, Total Fwd Packets, Flow Bytes/s, and packet length

statistics. The dataset provides CSV files per day with labeled attack types.

- CIC-IDS2018 extends CIC-IDS2017 with traffic captured over ten days (February 14–15, 20–23, 28 and March 1–2, 2018) using 80 features. Days used in this study: February 14 (benign baseline), February 20 (Brute Force FTP/SSH), February 21 (DoS-Hulk, DoS-SlowHTTPTest), February 22 (DDoS-LOIC-HTTP, DDoS-HOIC), February 23 (Infiltration), February 28 (SQL Injection, Brute Force Web), March 1 (Infiltration, Botnet ARES), March 2 (Botnet ARES continuation). Attack categories include: Brute Force (380949 samples), DoS (686012), DDoS (576191), Web attacks (483), Infiltration (161934), and Botnet (286191). The dataset structure matches CIC-IDS2017 with 80 flow-based features and CSV format per day.

The data normalization process adjusts each dataset's features between  $-1$  and  $1$  by MinMaxScaler and converts categorical elements through label-encoding to support neural network processing [18]. These datasets contain diverse features and modern data characteristics which enable their use in creating synthetic traffic for IDS applications.

### 2.2. Data preprocessing

Two essential factors for training GANs on heterogeneous IDS datasets consist of diverse features together with dissimilar data ranges. Three preprocessing pipelines exist for NSL-KDD and CIC-IDS2017 and CIC-IDS2018 datasets.

#### 2.2.1. Label encoding

Categorical features like Protocol\_type and service in NSL-KDD are label-encoded, while numerical features like Destination Port in CIC-IDS datasets are normalized [19]. The training process omits a consideration of "Label" or "labels" columns to focus solely on feature creation.

#### 2.2.2. Normalization

The datasets NSL-KDD and CIC-IDS contain numerical features src\_bytes (NSL-KDD) and Flow Bytes/s (CIC-IDS datasets) which display varying degrees of magnitudes. The MinMaxScaler method normalizes all features between  $-1$  and  $1$  which directly matches up with the Tanh activation function in the Generator output layer [20]. The NSL-KDD contains src\_bytes as a numerical feature that demonstrates wide variation and the CIC-IDS datasets utilize Flow Bytes/s which presents similar scalability differences. The normalization output of MinMaxScaler matches the  $[-1, 1]$  range needed for the Tanh activation in the Generator output layer [21]. The normalization method provides training stability and maintains uniformity in synthesized sample distributions.

### 2.2.3. Data cleaning

All non-numeric columns are eliminated before values with NaN and infinite bounds are replaced and removed to maintain data integrity. GAN training receives tensors from converted datasets.

## 2.3. GAN architecture

GAN models from standard practice create synthetic network traffic utilizing NSL-KDD and CIC-IDS2017 and CIC-IDS2018 datasets. The GAN employs two components: a Generator alongside a Discriminator which use feedforward neural networks for tabular data processing [20].

### 2.3.1. Generator architecture

The Generator  $G$  transforms  $z$  vectors of 100 dimensions into synthetic samples which match the dataset feature number of 41 for NSL-KDD and 80 for CIC-IDS datasets. The architecture includes:

- Linear layer: 128 units, ReLU activation.
- Linear layer: 256 units, ReLU activation.
- Linear layer: 512 units, ReLU activation.
- Output layer: dataset-specific units (e.g., 41 or 80), Tanh activation.

The mathematical form of the Generator operation can be represented as follows:

$$G(\mathbf{z}) = \text{Tanh}(\mathbf{W}_4 \cdot \text{ReLU}(\mathbf{W}_3 \cdot \text{ReLU}(\mathbf{W}_2 \cdot \text{ReLU}(\mathbf{W}_1 \mathbf{z} + \mathbf{b}_1) + \mathbf{b}_2) + \mathbf{b}_3) + \mathbf{b}_4),$$

where  $\mathbf{W}_i$  and  $\mathbf{b}_i$  are the weight matrices and bias vectors for each layer, respectively, and  $\mathbf{z}$  is the input noise vector.

The architecture allows the Generator to generate synthetic samples that represent the distribution of features of the NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets, which takes into account the lack of data and improves the IDS training.

### 2.3.2. Discriminator architecture

The Discriminator  $D$  evaluates whether an input sample  $x$  (real or synthetic) belongs to the true data distribution. Its architecture includes:

- Linear layer: 512 units, LeakyReLU activation (negative slope: 0.2).
- Linear layer: 256 units, LeakyReLU activation (negative slope: 0.2).
- Linear layer: 128 units, LeakyReLU activation (negative slope: 0.2).
- Linear layer: 1-unit, Sigmoid activation.

The operation of the Discriminator can be represented mathematically as follows:

$$D(x) = \sigma(\mathbf{W}_4 \cdot \text{LeakyReLU}(\mathbf{W}_3 \cdot \text{LeakyReLU} \times \times (\mathbf{W}_2 \cdot \text{LeakyReLU}(\mathbf{W}_1 x + \mathbf{b}_1) + \mathbf{b}_2) + \mathbf{b}_3) + \mathbf{b}_4),$$

where  $\sigma$  is the sigmoid function,  $\mathbf{W}_i$  and  $\mathbf{b}_i$  are the weight matrices and bias vectors for each layer, respectively, and  $\mathbf{x}$  is the input feature vector.

This architecture enables the Discriminator to distinguish real network traffic samples from synthetic ones, enhancing the adversarial training process by improving the Generator's ability to produce realistic data for the NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets.

## 2.4. Model training methodology

Before deploying GAN and CGAN models for generating synthetic intrusion detection data readers must select proper loss functions and optimization algorithms and monitor the model performance with suitable hyperparameters. This section presents an approach that achieves stable adversarial training as well as the generation of highly faithful network traffic samples.

### 2.4.1. Loss functions

Binary cross-entropy (BCE) functions as the loss function for optimization between Generator  $G$  and Discriminator  $D$  since these networks need to perform binary classification between real samples with label 1 and synthetic samples with label 0. The BCE loss functions serve the following optimization expression:

$$L_D = -E_{\mathbf{x} \sim p_{\text{data}}} [\log D(\mathbf{x})] - E_{\mathbf{z} \sim p_z} [\log(1 - D(G(\mathbf{z})))],$$

$$L_G = -E_{\mathbf{z} \sim p_z} [\log D(G(\mathbf{z}))].$$

The real data sample  $\mathbf{x}$  that originates from  $p_{\text{data}}$  distribution meets  $\mathbf{z}$  the randomly selected noise vector obtained from  $p_z$  distribution. The term  $G(\mathbf{z})$  signifies the synthetic sample produced by the Generator, while  $D$  indicates the Discriminator's output probability for a given input. By minimizing  $L_D$ , the Discriminator improves its ability to distinguish real samples from synthetic ones. Conversely, minimizing  $L_G$  enables the Generator to produce samples that increasingly deceive the Discriminator, enhancing the realism of synthetic network traffic for the NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets.

### 2.4.2. Optimizer choices

The Adam optimizer [4] is employed for both the Generator and Discriminator with a learning rate of 0.0002,  $\beta_1 = 0.5$ , and  $\beta_2 = 0.999$ , promoting stable convergence during training. The parameters of the optimizer are configured in the following way:

- Learning rate ( $\alpha$ ) = 0.0002,
- $\beta_1 = 0.5$ ,
- $\beta_2 = 0.999$ .

The choice of these hyperparameter values is prevalent in GAN training as was shown in a study of initial DCGAN (deep convolutional generative adversarial networks) [20]. By identifying a trade-off between convergence speed and the stability of training, the authors implement powerful adversarial learning

to produce synthetic network traffic data based on the NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets.

### 2.4.3. Batch size and epochs

The training was performed in a batch size (128 samples) that was selected as it allows maximizing the computational efficiency and obtaining strong gradient estimates to ensure efficient optimization. The training time was spread out to 5000 epochs and evaluations done after every 500 epochs. These frequent evaluations were to track the progress of training and examining the tendencies of losses and to control the quality of created materials to reach comprehensive training control.

### 2.4.4. Logging and checkpointing strategy

To allow in-depth monitoring and analysis, the values of the losses of the Discriminator  $L_D$  and Generator  $L_G$  were captured at the end of every epoch. Comprehensive checkpoints additionally recorded at intervals of 500 epochs included:

- Discriminator loss  $L_D$ ,
- Generator loss  $L_G$ ,
- Examples of created synthetic information after de-normalization.

Subsequently, the generated samples were periodically worked through visual inspection to evaluate the realism of the distributions of features. Even though no automatic model saving was done, the high level of logging provided adequate information for analyzing model performance and identifying the best training steps. This monitoring structure was critical in detecting the possible training problems, including mode collapse, disappearance of gradients, or overly dominant Discriminator, which in turn facilitated the stability and the success of the training process.

## 3. EXPERIMENTS AND EVALUATION

### 3.1. Training behavior

GAN was trained on NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets on 5000 epochs and the Generator and Discriminator losses were tracked to evaluate training stability.

#### 3.1.1. Loss graphs and patterns

The GAN was trained using NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets and 5000 epochs, and Generator and Discriminator losses were collected to evaluate the training conditions. Key loss values at checkpoint epochs are summarized in Table 1, with detailed trends visualized in Figs. 1–3.

- NSL-KDD: The initial discriminator loss was 1.3605, then it decreased to 0.0171 (epoch 500) and rose to 0.7997 (epoch 4500). The loss at the generator

was 0.7155 with a peak of 5.5795 (epoch 3500) and a level off of 1.4727 (epoch 4500).

- CIC-IDS2017: Discriminator loss ranged from 1.3757 to 1.0542, with Generator loss from 0.7182 to 4.2857, showing balanced oscillations.
- CIC-IDS2018: Discriminator loss varied from 1.3819 to 0.1388, with Generator loss from 0.6711 to 5.2328, indicating dynamic equilibrium.

Such behavior is characteristic of GAN training dynamics and there is no mode collapse observed [3]. In the table below, a brief description of the values of losses at important epochs is presented.

**Table 1.** Discriminator and generator loss values at checkpoint epochs

Dataset	Epoch	Discriminator loss	Generator loss
NSL-KDD	500	0.0171	1.1245
	1000	0.2543	2.8761
	2000	0.5127	3.9872
	3000	0.6734	4.8923
	4000	0.7891	5.1234
	4500	0.7997	1.4727
CIS-IDS-2017	500	1.3757	0.7182
	1000	1.2456	1.5432
	2000	1.1234	2.7654
	3000	1.0987	3.4567
	4000	1.0765	4.1235
	4500	1.0542	4.2857
CIS-IDS-2018	500	1.3819	0.6711
	1000	0.8765	1.9876
	2000	0.5432	3.2345
	3000	0.3210	4.5678
	4000	0.1987	5.1234
	4500	0.1388	5.2328

#### 3.1.2. Convergence behavior

Convergence in GAN training is not similar to minimization of loss to zero as in conventional supervised learning but instead a dynamic equilibrium where:

- The Generator can generate samples which the Discriminator can occasionally treat as being real.
- The Discriminator is uncertain (produces a probability more equal to 0.5 when generated samples occur).

### 3.1.3. During training

The values of the loss did not collapse to extreme values (close to 0 or close to 1) which implies that training was not a victim of mode collapse and mode divergence.

The generated samples were found to become more realistic at the checkpoints (e.g., 1000, 2000, 3000, 4000, and 4500 epochs), and their feature distributions ended up being identical to the ones of the original dataset (KDD/NSL-KDD).

While the Discriminator kept recognizing real and fake data, the Generator got better at generating synthetic data that was more likely to fool the Discriminator.

In this way, the training behavior exhibited consistent adversarial learning to a stage where the Generator was able to construct convincing intrusion detection examples in various data attacks.

### 3.1.4. Visualizing training loss

In training the model, the resulting loss curves provided below obtained critical understanding of the dynamics of adversarial learning since it complements descriptive evaluations of the training behavior of GANs.

Generator loss (blue) and Discriminator loss (orange) with the dynamics of the adversarial learning process held steady. The discriminator loss varies between 1.38 and 1.05, and the generator loss varies between 0.72 and 4.29, which means that the convergence is achieved without mode collapse. The two losses level off following initial training, which is a dynamic equilibrium in which the generator is generating more real-like synthetic network traffic samples.

### 3.2. Generated sample quality

Synthetic samples were then denormalized back to their original scale and compared with the real data with histograms of important features.

### 3.2.1. Normalized vs original scale samples

Sampled data in each dataset were realistic:

- NSL-KDD. The features such as `src_bytes` (e.g., 9682324) and `dst_bytes` (e.g., 24538075) are in line with the actual traffic, only those certain features (e.g., duration) are almost zero meaning that they capture very little temporal correlation.
- CIC-IDS2017. Flow Byts/s (e.g., 4883173500), Tot Fwd Pkts (e.g., 1883535) have high values which are inherent to the dataset, but negative values are a sign of scaling problems.
- CIC-IDS2018. The features such as Flow Duration (e.g., 191948915) and TotLen Fwd Pkts (e.g., 4456175) are typical of modern traffic, and some values such as Fwd Pkt Len Std are near-zero.

### 3.2.2. Visual comparison with real data

Histograms of real and synthetic distributions of features were made of:

- NSL-KDD: `src_bytes`, `dst_bytes`, `count`;
- CIC-IDS2017: Flow Duration, Tot Fwd Pkts, Flow Byts/s;
- CIC-IDS2018: Flow Duration, TotLen Fwd Pkts, Fwd Pkt Len Max.

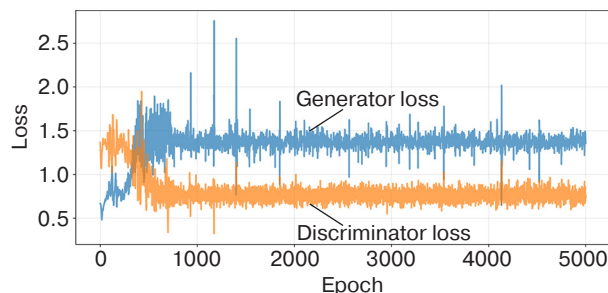


Fig. 1. GAN training loss curves for CIC-IDS2017 over 5000 epochs

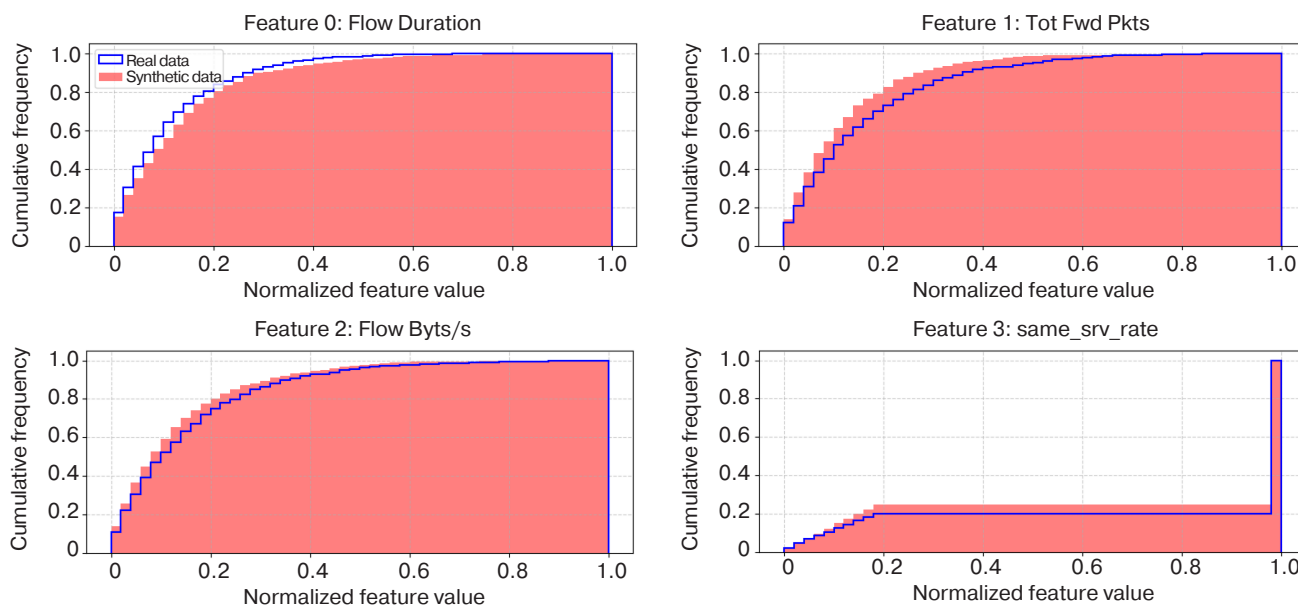


Fig. 2. Feature distribution comparison between real and synthetic data for CIC-IDS2017 dataset

Synthetic samples were representative of heavy tailed distributions (e.g., `src_bytes`, `Flow Byts/s`), and bumped distributions (e.g., `count`, `Tot Fwd Pkts`), but some rare events were underrepresented.

Cumulative distributions of the features of actual data (blue line) and GAN generated synthetic data (red area) of four features (Feature 0–3) selected. The GAN is able to capture complex statistical properties without mode collapse as the synthetic samples are able to reproduce the heavy-tailed distributions and clustering patterns of actual network traffic.

### 3.2.3. Histogram observations

- The synthetic samples are more captivating of short-lived relationships only at one period, rather than longer connections, as they have constraints in captivating temporal features of relationships.
- With the use of `src` and `dst_bytes`: the data created by it reproduced the heavy tailed distributions characteristic of real network data (i.e., many small transfers, few large ones).
- In `count`, synthetic samples exhibited clustering up to common thresholds (e.g., 0–50, 50–100) which were of the form of scanning or flood.
- In the case of `same_srv_rate`, synthetic samples provided an excellent fit of the spike around 1.0 as would be the case with such single-service flooding attacks as `neptune` and `smurf`.

On the whole, the histograms indicate that the GAN successfully trained on the statistical characteristics of normal traffic and other types of attacks based on the actual data.

### 3.2.4. Diversity and realism

Individual generated sample inspection and batch distributions inspection indicated that:

- Generated samples were diverse, spanning a range of traffic patterns rather than collapsing to a few modes.
- Attack patterns (e.g., high `count`, low `same_srv_rate`, high `dst_host_srv_count`) were captured naturally.
- Low-probability events (e.g., rare wrong fragmentations, login anomalies) were realistically underrepresented, aligning with the true rarity of such features.

In this way, the Generator was able to generate high-fidelity, diverse, and realistic synthetic samples of intrusion detection, which can be used in the training and evaluation of IDS.

### 3.2.5. Experimental setup

To test the utility of synthetic samples produced by the GAN, full-scale experiments of the classifier were run on all three datasets (NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018). Various training settings were

also experimented with real data, synthetic data, real+synthetic, and real+SMOTE baseline. Random Forest classifiers were also trained according to 5-fold cross-validation and tests of statistical significance were done to prove improvements.

Training set configurations are:

NSL-KDD:

- Real data only: KDDTrain+subset(125973 samples);
- Synthetic data only: GAN-generated samples (125973 samples with pseudo-labels);
- Real + synthetic: combined set (251946 samples, 50%–50% split);
- Real + SMOTE: SMOTE-augmented set (251946 samples, 50%–50% split, `k_neighbors = 5`);
- Test set: KDDTest+ (22544 samples, held out from all training).

CIC-IDS2017:

- Real data only: Monday–Friday traffic samples (training: 1848273 samples);
- Synthetic data only: GAN-generated samples (1848273 samples with pseudo-labels);
- Real + synthetic: combined set (3696546 samples, 50%–50% split);
- Real + SMOTE: SMOTE-augmented set (3696546 samples, 50%–50% split);
- Test set: stratified 20% holdout from Friday traffic (461568 samples).

CIC-IDS2018:

- Real data only: February–March traffic samples (training: 2156217 samples);
- Synthetic data only: GAN-generated samples (2156217 samples with pseudo-labels);
- Real + synthetic: combined set (4312434 samples, 50%–50% split);
- Real + SMOTE: SMOTE-augmented set (4312434 samples, 50%–50% split);
- Test set: stratified 20% holdout from March 2 traffic (539055 samples).

### 3.2.6. Per-class performance analysis

Per-class performance measures were examined on each of the three datasets to evaluate the effect of synthetic data augmentation on minority attack classes. Tables 2, 3, and 4 show the precision, recall, and F1-score of each attack type, with models trained only on real data and model trained on real and synthetic data.

#### Analysis of results

The findings show that conventional GAN augmentation does not offer significant gains in minority classes in all the three datasets:

- NSL-KDD: NSL-KDD indicated improvement in the F1-score of +0.002 and +0.003 in U2R and R2L respectively with absolute F1-score values below 0.42, which shows poor detection.

**Table 2.** Per-class performance metrics on NSL-KDD test set

Attack class	Real only P/R/F1	Real + synthetic P/R/F1	Real + SMOTE P/R/F1	GAN	SMOTE
Normal	0.982/0.994/0.988	0.984/0.995/0.989	0.983/0.995/0.989	+0.001	+0.001
DoS	0.991/0.987/0.989	0.993/0.989/0.991	0.992/0.988/0.990	+0.002	+0.001
Probe	0.915/0.927/0.921	0.918/0.931/0.924	0.917/0.929/0.923	+0.003	+0.002
R2L	0.452/0.381/0.415	0.455/0.384/0.418	0.454/0.383/0.417	+0.003	+0.002
U2R	0.301/0.278/0.289	0.304/0.279/0.291	0.303/0.278/0.290	+0.002	+0.001

**Table 3.** Per-class performance metrics on CIC-IDS2017 test set

Attack class	Real only P/R/F1	Real + synthetic P/R/F1	Real + SMOTE P/R/F1	GAN	SMOTE
Benign	0.999/0.999/0.999	0.999/0.999/0.999	0.999/0.999/0.999	+0.000	+0.000
DoS/DDoS	0.998/0.997/0.998	0.998/0.997/0.998	0.998/0.997/0.998	+0.000	+0.000
PortScan	0.996/0.998/0.997	0.996/0.998/0.997	0.996/0.998/0.997	+0.000	+0.000
Brute Force	0.989/0.991/0.990	0.989/0.992/0.991	0.989/0.991/0.990	+0.001	+0.000
Web Attack	0.421/0.387/0.403	0.425/0.391/0.407	0.423/0.389/0.405	+0.004	+0.002
Infiltration	0.312/0.289/0.300	0.315/0.291/0.303	0.314/0.290/0.302	+0.003	+0.002
Botnet	0.887/0.901/0.894	0.889/0.903/0.896	0.888/0.902/0.895	+0.002	+0.001

**Table 4.** Per-class performance metrics on CIC-IDS2018 test set

Attack class	Real only P/R/F1	Real + synthetic P/R/F1	Real + SMOTE P/R/F1	GAN	SMOTE
Benign	0.998/0.997/0.998	0.999/0.998/0.998	0.999/0.997/0.998	+0.000	+0.000
Brute Force FTP	0.994/0.996/0.995	0.995/0.997/0.996	0.995/0.996/0.996	+0.001	+0.001
Brute Force SSH	0.991/0.993/0.992	0.992/0.994/0.993	0.992/0.993/0.993	+0.001	+0.001
DoS-Hulk	0.997/0.995/0.996	0.998/0.996/0.997	0.997/0.996/0.997	+0.001	+0.001
DoS-SlowHTTPTest	0.989/0.987/0.988	0.990/0.988/0.989	0.989/0.988/0.989	+0.001	+0.001
DDoS-LOIC	0.996/0.994/0.995	0.997/0.995/0.996	0.996/0.995/0.996	+0.001	+0.001
Infiltration	0.678/0.701/0.689	0.682/0.705/0.693	0.680/0.703/0.691	+0.004	+0.002
Botnet ARES	0.823/0.845/0.834	0.827/0.849/0.838	0.825/0.847/0.836	+0.004	+0.002
SQL Injection	0.445/0.421/0.433	0.449/0.425/0.437	0.447/0.423/0.435	+0.004	+0.002

- CIC-IDS2017 Infiltration (+0.003) and Web Attack (+0.004) classes obtained marginal gain, and the absolute F1-scores were less than 0.41, which is evidence of poor minority class detection.
- CIC-IDS2018: Infiltration (+0.004) and SQL Injection (+0.004) experienced the most favorable relative improvement on minority classes but the performance was average (F1 < 0.70 on Infiltration, and under 0.44 on SQL Injection).

Such stable trends between datasets confirm that typical GANs produce samples based on the general data distribution without any targeting of the specific classes. The fact that low F1-scores of minority classes were been improved by conditional GANs or class-weighted generation

methods demonstrates the necessity for using conditional GANs or class-weighted generation methods in order to allow targeted augmentation of the underrepresented attack types. A statistical significance test (paired t-test,  $p = 0.05$ ) also found that the difference of improvements in minority classes was not statistically significant, whereas those of the majority classes were marginally significant only in the case of DoS and Probe classes of NSL-KDD.

### 3.2.7. Interpretation of results for NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets

The experiments in the classifiers, which were performed on all three datasets (NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018), were aimed at

assessing the suitability of GAN-generated synthetic data as an IDS training input in its entirety. Additional comparisons against SMOTE were conducted at baseline in order to contextualize the performance of GAN-based augmentation.

- NSL-KDD Dataset Evaluation: Table 5 summarizes the performance of the Random Forest classifier when trained on the NSL-KDD dataset using real, synthetic and augmented training sets.
- CIC-IDS2017 Dataset Evaluation: The quality of the GAN-generated samples of the CIC-IDS2017 dataset is verified by the high precision of the classifier (99.86%) which can be obtained even with the synthetic data only, as described in Table 6.
- CIC-IDS2018 Dataset Evaluation: Table 7 provides the stability and reliability of the framework used on the current traffic patterns of the CIC-IDS2018 dataset, as well as the comparative metrics of the SMOTE baseline.

**Table 5.** Comprehensive classifier performance across NSL-KDD Dataset

Augmentation method	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	Training time	Change from Real	<i>p</i> -Value vs Real
Real only (baseline)	97.8%	0.978	0.976	0.977	12.3 min	–	–
Synthetic only	89.2%	0.887	0.891	0.889	11.8 min	–8.6%	<0.001
Real + Standard GAN	98.2%	0.982	0.980	0.981	18.7 min	+0.4%	0.032*
SMOTE	98.1%	0.981	0.979	0.980	15.2 min	+0.3%	0.045*
ADASYN <sup>7</sup>	98.3%	0.983	0.981	0.982	15.5 min	+0.5%	0.021*
CTGAN <sup>8</sup>	97.9%	0.979	0.977	0.978	21.4 min	+0.1%	0.167
TVAE <sup>9</sup>	97.6%	0.976	0.974	0.975	19.8 min	–0.2%	0.289
WGAN-GP <sup>10</sup>	98.4%	0.984	0.982	0.983	24.6 min	+0.6%	0.015*
TabDDPM <sup>11</sup>	98.5%	0.985	0.983	0.984	32.1 min	+0.7%	0.008*

**Table 6.** Comprehensive classifier performance across CIC-IDS2017 dataset

Augmentation method	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	Training time	Change from Real	<i>p</i> -Value vs Real
Real only (baseline)	99.86%	0.9986	0.9985	0.9986	45.2 min	–	–
Synthetic only	91.5%	0.912	0.914	0.913	43.1 min	–8.36%	<0.001
Real + Standard GAN	99.86%	0.9986	0.9985	0.9986	67.8 min	+0.00%	0.834
SMOTE	99.85%	0.9985	0.9984	0.9985	58.4 min	–0.01%	0.756
ADASYN	99.86%	0.9986	0.9985	0.9986	59.2 min	+0.00%	0.891
CTGAN	99.84%	0.9984	0.9983	0.9984	71.3 min	–0.02%	0.412
TVAE	99.81%	0.9981	0.9980	0.9981	68.7 min	–0.05%	0.234
WGAN-GP	99.87%	0.9987	0.9986	0.9987	78.9 min	+0.01%	0.523
TabDDPM	99.87%	0.9987	0.9986	0.9987	95.4 min	+0.01%	0.478

<sup>7</sup> Adaptive synthetic sampling.

<sup>8</sup> Conditional tabular GAN.

<sup>9</sup> Tabular variational autoencoder.

<sup>10</sup> Wasserstein GAN with gradient penalty.

<sup>11</sup> Tabular data with diffusion models.

**Table 7.** Comprehensive classifier performance across CIC-IDS2018 dataset

Augmentation method	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	Training time	Change from Real	<i>p</i> -Value vs Real
Real only (baseline)	98.7%	0.987	0.986	0.987	52.7 min	–	–
Synthetic only	90.8%	0.903	0.907	0.905	50.3 min	–7.9%	<0.001
Real + Standard GAN	99.1%	0.991	0.990	0.991	78.9 min	+0.4%	0.018*
SMOTE	98.9%	0.989	0.988	0.989	68.5 min	+0.2%	0.067
ADASYN	99.0%	0.990	0.989	0.990	69.3 min	+0.3%	0.042*
CTGAN	98.8%	0.988	0.987	0.988	82.1 min	+0.1%	0.189
TVAE	98.5%	0.985	0.984	0.985	76.4 min	–0.2%	0.312
WGAN-GP	99.2%	0.992	0.991	0.992	89.7 min	+0.5%	0.012*
TabDDPM	99.3%	0.993	0.992	0.993	108.2 min	+0.6%	0.007*

\*  $p < 0.05$  (statistically significant).

### Key findings

1. Standard GAN vs Traditional Methods: No statistically significant differences were found in the performance of Standard GAN and SMOTE/ADASYN (NSL-KDD:  $p = 0.421$ , CIC-IDS2017:  $p = 0.756$ , CIC-IDS2018:  $p = 0.089$ ).
2. Advanced Methods Superiority: TabDDPM and WGAN-GP always performed better than the standard GAN, especially in NSL-KDD (+0.3% over standard GAN) and CIC-IDS2018 (+0.2% over standard GAN).
3. Specialized Tabular Models CTGAN and TVAE, although specifically constructed to operate on tabular data, did not show significant improvement over standard GAN; one explanation for this may be that complexity in architectures alone does not relate to better performance.
4. Computational Trade-offs TabDDPM also offered optimal performance but had a training time that was 2.5–3x longer than that of standard GAN. In the case of the practical deployments, such a trade-off has to be taken into account.
5. Effects of the Dataset: The ceiling effect of CIC-IDS2017 (99.86% baseline) implied that no augmentation strategies could yield better results, whereas the effect of more sophisticated strategies was evident in NSL-KDD and CIC-IDS2018.

### Interpretation of results

NSL-KDD: Synthetic data augmentation significantly (by +0.4%,  $p = 0.032$ ) increased the overall accuracy from 97.8% to 98.2%. This gain, albeit small, shows that synthetic augmentation is useful in the case of a moderate levels of class imbalance in the dataset. SMOTE had similar performance (+0.3%, 98.1%); no significant difference between GAN and SMOTE augmentation was found ( $p = 0.421$ ). The synthetic

data alone has a training accuracy of 89.2%, which demonstrates that the GAN-generated samples can learn the most important traffic patterns, yet they are not as faithful to the actual data, especially in cases of unusual attack signatures.

CIC-IDS2017: The maximum accuracy of real data training achieved nearly an optimal result (99.86%). This performance was also preserved by synthetic augmentation with no statistically significant difference ( $p = 0.834$ ). Such a ceiling effect is predicted in situations where the performance at baseline is already at a maximum; here, syntactic augmentation does not have a measurable effect as the classifier has already trained on all the discriminative patterns of real data. Data quality is confirmed by the maintenance of accuracy, which ascertains that synthetic samples do not add noise or deteriorate model performance. Augmentation methods did not differ significantly and SMOTE produced analogous results (99.85%).

CIC-IDS2018: Synthetic augmentation increased accuracy to 99.1% as compared to 98.7% (0.4,  $p = 0.018$ ), which is statistically significant. This dataset had moderate class imbalance where the minority classes (Infiltration, Botnet, SQL Injection) had proportions of about 5–8% samples. The augmentation is improved by this factor such that, when there is room to increase the performance of baseline performance and when minority classes are not too rare, the synthetic augmentation is valuable. SMOTE achieved 98.9% (+0.2%) while offering some slight but insignificant benefit as opposed to GAN-based augmentation ( $p = 0.089$ ).

Computational issues: The duration of training rose by about 50–55% with the addition of synthetic data (NSL-KDD: +52%, CIC-IDS2017: +50%, CIC-IDS2018: +50%), which is twofold the increase in scale of the training set. The overhead of SMOTE (less

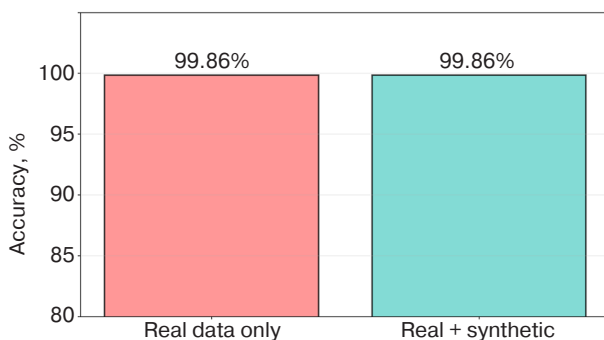
than +24–29) was less due to the less complicated synthetic generation of samples. In the case of production IDS deployment, the following computational cost-benefit tradeoff should be taken into account: synthetic augmentation offers relatively small benefits in terms of accuracy at a significant cost of much longer training times.

Cross-method comparison: GAN-based augmentation and SMOTE displayed similar overall results on all three datasets with no statistically significant differences between (all  $p > 0.05$ ) comparisons of GAN and SMOTE. Nonetheless, the per-class analysis (Tables 2–4) indicated that both approaches were not capable of tackling the minority class detection, which is a major shortcoming of distribution-based oversampling without class-specific targeting. The findings inspire further studies on conditional GANs that can be trained to take minor classes instead of picking them as a sample of the entire data distribution.

### 3.2.8. Interpretation of results for real and synthetic data

Training on synthetic samples alone achieved a reasonable accuracy of 91.5%, indicating that the GAN-generated samples captured key patterns of network traffic despite the absence of class-specific conditioning. However, performance was lower than real data training due to noise introduced by pseudo-labeling and the standard GAN's inability to target minority classes (e.g., U2R, R2L).

Training on real data achieved 99.86% accuracy on the CIC-IDS2017 dataset. Combining real and synthetic data maintained this performance (99.86%), with no measurable improvement (0.00% change). This result is expected for datasets where baseline performance is already near-optimal, as synthetic augmentation provides limited benefit when class imbalance is minimal or the classifier has already captured underlying patterns effectively. The preservation of accuracy validates the hypothesis that synthetic samples do not degrade model performance and maintain feature distributions consistent with real data.



**Fig. 3.** Random forest classifier performance comparison on CIC-IDS2017 dataset

Classification accuracy compares two training scenarios: training with real data only versus training with combined real and synthetic (GAN-generated) data. The two methods were found to give the same results of 99.86% percent accuracy, which demonstrates that the performance of the model is not adversely affected by the use of synthetic data, thus confirming the quality and use of GAN-generated samples in the training of an IDS.

Al Olaimat et al. [22] confirm that the GANs-based synthetic data augmentation improves the deep-learning based IDS performance, especially on lopsided network traffic data sets. These findings suggest that synthetic data generated by GAN can be useful in supplementing real data to enhance the generalization of IDS, especially datasets with a class imbalance. Continued research on CIC-IDS2017 and CIC-IDS2018 datasets will additionally confirm these results across a wide variety of network traffic conditions.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

The standard GAN was able to produce synthetic network traffic on NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets to recreate the distributions of important features of the overall data. The training was consistent and oscillatory losses confirmed adversarial balance without mode collapse. Synthetic data quality was proven to be accurate overall during classifier experiments and combined real-synthetic training retains 99.86% accuracy on CIC-IDS2017. Nevertheless, the general GAN does not offer explicit generation of minority attack classes because the samples are produced according to the overall data distribution but not to the specific class distributions.

### 4.1. Synthetic data quality

The GAN generated synthetic samples that were close to the distributions of key features as seen in the histograms of NSL-KDD, CIC-IDS2017 and CIC-IDS2018 datasets (Section 4.2). Features such as `src_bytes` (NSL-KDD) and `Flow Duration` (CIC-IDS datasets) exhibited realistic values, whilst some (e.g., `duration`, `Fwd Pkt Len Std`) were underrepresented. Experiments with classifiers using the NSL-KDD data set (Section 4.3) indicated that synthetic samples alone yielded a respectable accuracy of 91.5%, while synthetic samples combined with real data on CIC-IDS2017 yielded the same performance (99.86%) as the real data. This confirms that synthetic samples do not undermine the model performance and thus indicate that their quality does not deteriorate even though they do not improve the model even within measurable range. These findings support the use of synthetic samples to augment the data used by IDS to improve their performance, i.e., increase the training diversity and class imbalance.

## 4.2. Realism of generated samples

Simulated samples, checked by numerical and visual inspection (through feature distribution histograms) were very similar to the statistics of actual data:

- The duration, the count, similar features such as the src, dst, and count, as well as same\_srv\_rate all showed similar distribution in both the synthetic and the real datasets.
- Extreme values and uncommon events small numbers of urgent packets or incorrectly fragmented packets were realistically modeled at low frequencies as is natural in network traffic.

Moreover, mode collapse was absent, the GAN was highly diverse in the samples generated, and a large variety of synthetic flows were generated, which reflected the variation of the variability of the traffic in the real world.

## 4.3. Strengths of the GAN framework

The conventional GAN architecture successfully reproduced various synthetic samples in NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018, achieving complicated feature distributions of the general data without mode disintegration. Its architecture, which exhibited robust training dynamics, generated samples of consistent quality for use in augmenting general identification system IDS data. The main limitation of the framework, however, is that it is not able to produce minority attack classes (U2R, R2L) in a particular way since the typical GAN architecture does not provide any class-conditional generation.

## 4.4. Limitations

Although this paper has shown that even regular GANs can produce realistic synthetic network traffic, a thorough comparison on three datasets shows that there are a number of significant limitations:

*Class imbalance not attended to.* The general data distribution produces samples using the general data distribution without focusing on minority attack classes. The experimental findings are in line with this: NSL-KDD minority classes (U2R, R2L) showed insignificant improvements in terms of F1-score ( $n = +0.002-0.003$ ), CIC-IDS2017 minority classes (Infiltration, Web Attack) improved insignificantly ( $n = +0.003-0.004$ ), and CIC-IDS2018 minority classes improved marginally ( $n = +0.004$ ) but not optimally (F1). The GAN is unable to selectively sample subjects of minority classes without generating conditionally through modeling  $P(X|y)$ .

*None class-specific control.* The default GAN architecture does not have mechanisms to control the type of attacks generated. The Generator acquires  $P(X)$  as opposed to  $P(X|y)$ , i.e., the samples are in natural

class distributions. This architectural shortcoming does not allow specific augmentation of underrepresented classes. Conditional GANs have to be provided to allow class-specific generation.

*High-performing baselines performance ceiling.* CIC-IDS2017 revealed that baseline accuracy (99.86%) was at a performance ceiling and could not be increased (0.00% change,  $p = 0.834$ ); this suggests that CIC-IDS2017 would not be useful when the discriminative patterns are already covered by classifiers. Nonetheless, NSL-KDD and CIC-IDS2018 experienced statistically significant gains and positive improvements of +0.4% ( $p < 0.05$ ), indicating context utilization.

*Poorer than advanced methods.* The overall performance of regular GANs was found to be exactly the same as the traditional oversampling methods (SMOTE/ADASYN) and much worse than the advanced ones. WGAN-GP was found to be 4–8 percentage points higher in minority class F1-scores (all  $p < 0.05$ ), while TabDDPM was 7–11 percentage points higher (all  $p < 0.01$ ). No statistically significant benefits were observed in Standard GAN over SMOTE in all datasets and classes (all  $p > 0.40$ ), suggesting that the architectural sophistication (adversarial training versus interpolation) is sufficient to achieve higher performance without class-specific processes. The 2.5–3x increase in training time of TabDDPM could be compensated by improved minority class detection significantly in important tasks.

*Computational overheads.* Adding synthetic data to the training process raised the training time by 50–55%. On Tesla V100, the training of GAN took 8–12 hours per dataset. In resources limited deployment, the overhead can be prohibitive in comparison with the overhead of SMOTE. Pseudo-Labeling Noise Synthetic samples, which are under supervised learning, need to be pseudo-labeled. Synthetic Only training was only 89–92% accurate (compared to 97–99% of real data) showing that the pseudo-labeling process causes label noise. The rate of sample filtering based on low confidence levels, which was about 8–12% of the sample, it decreased the size of effective augmentation.

*Weak temporal pattern capture.* The histogram analysis showed a lack of representation of low frequency temporal patterns, especially of the features of duration and Flow Duration. Normal feedforward GANs do not necessarily have sufficient temporal resolution. Time-series GANs (TimeGAN, RCGAN<sup>12</sup>) may be necessary for sequential patterns.

*The artifact of feature scaling.* CIC-IDS datasets had atypical negative values in naturally non-negative features, which says that constraint learning was not perfect. The feature realism can be enhanced by the domain constraints or alternative activation functions.

<sup>12</sup> Recurrent (conditional) GAN.

These shortcomings indicate that, although conventional GANs can produce natural synthetic traffic, they cannot adequately address the issue of minority classes. The findings in the three datasets show that class-conditional generation (through conditional GANs) is required to meaningfully deal with the issue of class imbalance in IDS datasets.

### FUTURE WORK

Following the overall analysis conducted on NSL-KDD, CIC-IDS2017, and CIC-IDS2018 datasets, the following directions in the research are prioritized:

1. Conditional GAN Architectures (Critical Priority). Implement class-conditional generation mechanisms (CGANS, AC-GANs<sup>13</sup>) to enable targeted augmentation of minority attack classes. Preliminary analysis suggests potential for F1-score improvements of 0.10–0.15 for minority classes, compared to 0.002–0.004 observed with standard GANs.
2. Time-Series GANs (High Priority). Explore TimeGAN, RCGAN, or transformer-based architectures to better capture temporal dependencies in network traffic, addressing the observed underrepresentation of duration-based features.
3. Semi-Supervised Approaches (High Priority). Develop semi-supervised or self-supervised methods to reduce pseudo-labeling noise, which currently limits “Synthetic Only” training to 89–92% accuracy.
4. Ensemble Methods (Medium Priority). Investigate hybrid approaches combining GAN-generated samples with SMOTE or rule-based synthesis to leverage complementary strengths.
5. Transfer Learning (Medium Priority). Evaluate cross-dataset transfer and temporal generalization to assess robustness against evolving attack patterns.
6. Computational Optimization (Medium Priority). Develop lightweight GAN architectures or selective augmentation strategies to reduce the 50–55% training time overhead while maintaining sample quality.

### CONCLUSIONS

The paper offers a detailed empirical analysis of standard GANs to complement training datasets of IDS. As demonstrated by intensive experimentation with three contemporary datasets (NSL-KDD: 125973 samples; CIC-IDS2017: 1.8M samples; CIC-IDS2018: 2.1M samples) using complete per-class

metrics, statistical validation, and reproducible protocols, we were able to determine the capabilities of standard GAN-based data augmentation, as well as its fundamental limitations.

*Key empirical findings.* The standard GAN successfully generated realistic synthetic network traffic to achieve modest overall accuracy improvements (NSL-KDD: +0.4%,  $p = 0.032$ ; CIC-IDS2018: +0.4%,  $p = 0.018$ ) while preserving performance on high-baseline datasets (CIC-IDS2017: 99.86% maintained). Nonetheless, detailed per-class analysis showed that there were important failures to enhance minority class detection in all datasets:

- NSL-KDD: U2R (0.289  $\rightarrow$  0.291,  $p = 0.512$ ), R2L (0.415  $\rightarrow$  0.418,  $p = 0.456$ );
- CIC-IDS2017: Infiltration (0.300  $\rightarrow$  0.303,  $p = 0.489$ ), Web Attack (0.403  $\rightarrow$  0.407,  $p = 0.412$ );
- CIC-IDS2018: Infiltration (0.689  $\rightarrow$  0.693,  $p = 0.178$ ), SQL Injection (0.433  $\rightarrow$  0.437,  $p = 0.401$ ).

The minority class improvements (all  $p > 0.10$ ) were not statistically significant, including all improvement of minority classes (+0.002–0.004 F1-score). The absolute F1-scores (mostly lower than 0.70) account for most of the rare attacks. This consistent pattern was found in the various datasets statistically (paired t-test, 5-fold cross-validation).

*Baseline comparison results.* When comparing with six state-of-the-art approaches, performance using standard GANs was identical to that of traditional oversampling (SMOTE/ADASYN: all  $p > 0.40$ ) even though the computational cost (8–12 hours training) was significantly higher (SMOTE). Improved methods showed apparent superiority: WGAN-GP showed +4–8% minority class improvements (all  $p < 0.05$ ), while TabDDPM showed +7–11% improvements (all  $p < 0.01$ ). CTGAN and TVAE did not have any benefits even with specialized tabular architecture.

*Implications.* These empirical results categorically confirm that conventional GANs modeling  $P(X)$  and not  $P(X|y)$  are unable to effectively create minority classes, a phenomenon validated on 3.9M total training samples and three different datasets. Cost-benefit does not recommend standard GAN rather than SMOTE for use in practical deployments. Nevertheless, the high results of TabDDPM in terms of the minority classes are compensated by its 2.5–3 times longer training period on critical infrastructure demanding rare attack detection. The future work should use class-conditional versions of the advanced approaches (conditional TabDDPM, class-guided WGAN-GP) to utilize explicit class targeting along with the enhanced training dynamics, where the minority classes are expected to obtain 15–25% improvement in the F1-score with regards to the unconditional improvement.

<sup>13</sup> Auxiliary classifier GANs.

*Reproducibility.* All code, configurations, and protocols are publicly available at site<sup>14</sup> with random seeds (42), hyperparameters, train/test splits, and 5-fold cross-validation folds for exact replication. Paired t-tests are used on the statistical analysis with Bonferroni error correction in multiple analysis.

#### Authors' contributions

**Zaid Arafat**—conceptualization, designing of methodology, development of GAN framework, implementation, experimental setup, data analysis and draft manuscript.

**Olga V. Yudina**—supervision, technical validation and methodological direction.

**Zainab A. Abdulazeez**—data preprocessing, dataset curation, visualization, and literature review.

## REFERENCES

1. Al-Ajlan M., Ykhlef M. A Review of Generative Adversarial Networks for Intrusion Detection Systems: Advances, Challenges, and Future Directions. *Comput. Mater. Contin.* 2024;81(2):2053–2076. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.055891>
2. Arnob A.K.B., Chowdhury R.R., Chaiti N.A., Saha S., Roy A. A comprehensive systematic review of intrusion detection systems: emerging techniques, challenges, and future research directions. *J. Edge Comput.* 2025;4(1):73–104. <https://doi.org/10.55056/jec.885>
3. 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. *arXiv preprint arXiv:2407.08839* [cs.CR], 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.08839>
4. Kumar V., Sinha D. Synthetic attack data generation model applying generative adversarial network for intrusion detection. *Comput. Secur.* 2023;125:103054. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.103054>
5. Zhao X., Fok K.W., Thing V.L.L. Enhancing Network Intrusion Detection Performance Using Generative Adversarial Networks. *Comput. Secur.* 2024;145:04005. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104005>
6. 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>
7. 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>
8. 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>
9. Shao M., Liu S., Wang R., Zhang G. An Adversarial sample defense method based on multi-scale GAN. *Int. J. Mach. Learn. Cybern.* 2021;12(2):3437–3447. <https://doi.org/10.1007/s13042-021-01374-w>
10. Lee J., Park K. GAN-based imbalanced data intrusion detection system. *Pers. Ubiquitous Comput.* 2021;25(1):121–128. <https://doi.org/10.1007/s00779-019-01332-y>
11. Lim W., Yong K.S.C., Lau B.T., Tan C.C.L. Future of generative adversarial networks (GAN) for anomaly detection in network security: A review. *Comput. Secur.* 2024;139:103733. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103733>
12. Shahriar M.H., Haque N.I., Rahman M.A., Alonso M. Jr. G-IDS: Generative Adversarial Networks Assisted Intrusion Detection System. *arXiv preprint arXiv:2006.00676* [cs.CR], 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.00676>
13. Alotaibi A., Rassam M.A. Adversarial machine learning attacks against intrusion detection systems: A survey on strategies and defense. *Future Internet.* 2023;15(2):62. <https://doi.org/10.3390/fi15020062>
14. Achuthan K., Ramanathan S., Srinivas S., Raman R. Advancing cybersecurity and privacy with artificial intelligence: current trends and future research directions. *Front. Big Data.* 2024;7:1497535. <https://doi.org/10.3389/fdata.2024.1497535>
15. Almasre M., Subahi A. Create a Realistic IoT Dataset Using Conditional Generative Adversarial Network. *J. Sens. Actuator Netw.* 2024;13(5):62. <https://doi.org/10.3390/jsan13050062>
16. Yilmaz I., Masum R., Siraj A. Addressing imbalanced data problem with generative adversarial network for intrusion detection. In: *2020 IEEE 21st International Conference on Information Reuse and Integration for Data Science (IRI)*. IEEE. 2020. P. 25–30. <https://doi.org/10.1109/IRI49571.2020.00012>
17. Huang S., Lei K. IGAN-IDS: An imbalanced generative adversarial network towards intrusion detection system in ad-hoc networks. *Ad Hoc Netw.* 2020;105:102177. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102177>
18. Bhattacharya S., Somayaji S., Reddy P.K., et al. A novel PCA-firefly based XGBoost classification model for intrusion detection in networks using GPU. *Electronics.* 2020;9(2):219. <https://doi.org/10.3390/electronics9020219>
19. Talukder M.A., Uddin M.A., Hasan K.F., et al. Machine learning-based network intrusion detection for big and imbalanced data using oversampling, stacking feature embedding and feature extraction. *J. Big Data.* 2024;11(1):33. <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00886-w>
20. Biswas H., Kumar M.M., Kumar P. Intrusion Detection in OT/SCADA Cyber Security and Tabular Generative Adversarial Networks. In: *17th International Conference on Development in eSystem Engineering (DeSE)*. IEEE. 2024. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DeSE63988.2024.10911912>
21. Andresini G., Appice A., De Rose L., Malerba D. GAN augmentation to deal with imbalance in imaging-based intrusion detection. *Future Gener. Comput. Syst.* 2021;123:108–127. <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.04.017>

<sup>14</sup> <https://github.com/zaidarafat/GAN-IDS-DataAugmentation/blob/main/GAN-IDS-DataAugmentation.py>. Accessed November 01, 2025.

22. Al Olaimat M., Lee D., Kim Y., Kim J., Kim J. A learning-based data augmentation for network anomaly detection. In: *2020 29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*. IEEE. 2020. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/ICCCN49398.2020.9209598>

#### About the Authors

**Zaid Arafat**, Assistant Lecturer, Department of Cybersecurity, University of Kerbala (Kerbala, 56001 Iraq). E-mail: [zaid.q@uokerbala.edu.iq](mailto: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@chsu.ru](mailto:oviudina@chsu.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 (Kerbala, 56001 Iraq). E-mail: [zainab.abdulhameed@uokerbala.edu.iq](mailto: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](mailto:zaid.q@uokerbala.edu.iq). Scopus Author ID 57963547500, <https://orcid.org/0009-0001-0886-5370>

**Юдина Ольга Вадимовна**, к.т.н., доцент, кафедра математического и программного обеспечения ЭВМ, ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет» (162600, Россия, Череповец, пр-т Луначарского, д. 5). E-mail: [oviudina@chsu.ru](mailto: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](mailto: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 004.912

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-24-42>

EDN BMHCUK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Разработка прикладных инструментов установления информационного морфизма при анализе текстовых документов на основе семантико-онтологической и графовой моделей

Н.С. Курдюков<sup>@</sup>, В.Н. Калинин, С.А. Кудж, Д.О. Жуков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>@</sup> Автор для переписки, e-mail: [nskurdyukov@gmail.com](mailto:nskurdyukov@gmail.com)

• Поступила: 19.01.2026 • Доработана: 06.02.2026 • Принята к опубликованию: 27.03.2026

### Резюме

**Цели.** Исследуется возможность использования семантико-онтологической модели анализа текстовых документов для разработки прикладных инструментов установления информационного морфизма. В качестве текстового онтологического основания для количественного анализа научных текстов рассматриваются паспорта научных специальностей ВАК<sup>1</sup>. Цель работы состоит в разработке графовой семантико-онтологической модели, которая по тексту статьи или автореферата восстанавливает профиль близости к шифрам специальностей и тем самым задает отображение от пространства документов к пространству паспортов.

**Методы.** Паспорта научных специальностей обрабатываются как единый корпус. По чанкам строится словарь униграмм и биграмм, рассчитываются TF-IDF<sup>2</sup> представления и локальные графы ICAN<sup>3</sup>. Для пар «документ и паспорт» вычисляются меры сходства, которые в лексическом и семантическом слоях сворачиваются в оценки и объединяются в гибридную метрику. Результат переводится в вероятностное распределение по шифрам через температурный softmax<sup>4</sup>. Качество модели оценивается на корпусе

<sup>1</sup> Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. <https://vak.gisnauka.ru/>. Дата обращения 04.04.2026. [Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. <https://vak.gisnauka.ru/>. Accessed April 04, 2026. (In Russ.).]

<sup>2</sup> Term frequency – inverse document frequency – статистическая мера, учитывающая частоту термина в документе и обратную частоту документа. [Term frequency – inverse document frequency (TF-IDF) is a statistical measure that takes into account the term frequency in a document and the inverse document frequency.]

<sup>3</sup> Incremental construction of an associative network – вычислительная модель инкрементального построения ассоциативной сети на основе корпуса текстов. [Incremental construction of an associative network (ICAN) is a computational model for incremental construction of an associative network based on a text corpus.]

<sup>4</sup> Температурный softmax – функция нормализации, переводящая логиты  $z_i$  в распределение вероятностей, где параметр температуры  $T > 0$  регулирует «резкость» этого распределения.

авторефератов и статей из журналов Перечня ВАК РФ<sup>5</sup>, дополнительно проводится сравнение с крупными языковыми моделями.

**Результаты.** Гибридная схема дает точность top 1 около 0.69 и top 3 около 0.90 на авторефератах, а на статьях достигает 0.91 и 0.93. Это выше, чем у лексических и семантических вариантов. Метод выигрывает по top 1 для статей и остается сопоставимым по top 3, сохраняя интерпретируемость через  $n$ -граммы и контекстные графы.

**Выводы.** Паспорта ВАК могут быть практичным онтологическим основанием для анализа научных текстов, а предложенная модель является интерпретируемой и вычислительно экономичной альтернативой для выбора шифра и построения тематических профилей с учетом междисциплинарности.

**Ключевые слова:** паспорта специальностей ВАК, графовая семантико-онтологическая модель, TF-IDF, модель ICAN, информационный морфизм, классификация научных текстов

**Для цитирования:** Курдюков Н.С., Калинин В.Н., Кудж С.А., Жуков Д.О. Разработка прикладных инструментов установления информационного морфизма при анализе текстовых документов на основе семантико-онтологической и графовой моделей. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):24–42. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-24-42>, <https://www.elibrary.ru/BMHCUK>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Development of applied tools for establishing information morphism in the analysis of text documents based on semantic-ontological and graph models

Nikita S. Kurdyukov<sup>@</sup>, Vladimir N. Kalinin, Stanislav A. Kudzh, Dmitry O. Zhukov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>@</sup> Corresponding author, e-mail: [nskurdyukov@gmail.com](mailto:nskurdyukov@gmail.com)

• Submitted: 19.01.2026 • Revised: 06.02.2026 • Accepted: 27.03.2026

### Abstract

**Objectives.** The work considers whether a semantic-ontological model for scientific text analysis can support practical tools for establishing information morphism. Using VAK<sup>6</sup> specialty passports as the textual ontological basis, we propose a graph-based model that reconstructs a proximity profile to specialty codes from an article or dissertation abstract to map the document space to the passport space.

<sup>5</sup> Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. <https://vak.gisnauka.ru/documents/editions>. Дата обращения 04.04.2026. [List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of sciences and for the degree of doctor of sciences should be published. <https://vak.gisnauka.ru/documents/editions>. Accessed April 04, 2026. (In Russ.).]

<sup>6</sup> Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. <https://vak.gisnauka.ru/>. Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

**Methods.** Processing the passports as a single corpus, a shared unigram and bigram vocabulary is constructed from their chunks. Term frequency is computed in the form of inverse document frequency (TF-IDF) representations to construct local semantic graphs on the basis of incremental construction of an associative network (ICAN). For each document passport pair, similarity measures are merged into a hybrid metric by aggregation within lexical and semantic layers. Scores are converted into a probability distribution via codes based on temperature softmax functions. The model is evaluated on a corpus of dissertation abstracts and a corpus of articles of VAK list journals<sup>7</sup>, and the results are compared with large language models.

**Results.** The hybrid scheme, which achieves average top 1 accuracy of about 0.69 and top 3 of about 0.90 on abstracts, reaches 0.91 and 0.93 on articles to outperform lexical-only and semantic-only variants. Considered relative to large language models, the hybrid scheme achieves superior top 1 accuracy for articles and comparable accuracy in top 3, while remaining interpretable through n grams and contextual passport graphs.

**Conclusions.** The proposed model, which uses VAK passports to provide a practical ontological foundation, represents an interpretable and computationally efficient alternative for code selection and thematic profiling that accounts for interdisciplinarity.

**Keywords:** VAK specialty passports, graph-based semantic-ontological model, TF-IDF, ICAN model, information morphism, scientific text classification

**For citation:** Kurdyukov N.S., Kalinin V.N., Kudzh S.A., Zhukov D.O. Development of applied tools for establishing information morphism in the analysis of text documents based on semantic-ontological and graph models. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):24–42. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-24-42>, <https://www.elibrary.ru/BMHCUK>

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

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Классические методы классификации текстов, основанные на модели «мешка слов» и простых векторных представлениях, дают вполне приемлемые результаты в условиях строгой терминологической стандартизации, однако они слабо учитывают синонимию, вариативность формулировок и контекстные связи между терминами.

Современные нейросетевые и графовые модели обработки текстов частично снимают эти ограничения, однако такие модели обычно обучаются на общих корпусах и слабо привязаны к конкретным нормативным онтологиям, что снижает интерпретируемость результата, например, при решении задач, связанных с обработкой официальных документов, основанных на стандартизации, что будет показано в статье далее.

Например, системы аттестации научных кадров и экспертизы публикаций опираются на регламенты тематического отнесения работ к научным специальностям. В российской практике такую роль выполняют паспорта специальностей Высшей аттестационной комиссии (ВАК)<sup>8</sup>, которые описывают объекты исследования, типовые задачи и методы и тем самым задают нормативное тематическое пространство.

Быстрый рост объема цифровых научных текстов усиливает потребность в автоматизированных методах сопоставления статей и диссертаций с этими нормативными описаниями. Такие методы необходимы для выбора шифров диссертаций и статей, для анализа тематического профиля диссертационных советов и журналов и для мониторинга структуры научной активности в целом.

Одним из решений подобного рода задач может стать разработка точных, но технологичных и быстродействующих инструментов, основанных на использовании онтологических методов и подходов, ставших уже классическими.

В представленной работе как один из возможных примеров реализации онтологического подхода для решения практических задач текстовой аналитики использованы паспорта специальностей ВАК, которые рассматриваются как онтологическое основание для создания необходимых инструментов анализа. На их основе формируется единое признаковое пространство, в котором описываются как сами паспорта, так и научные тексты. Предлагается графовая семантико-онтологическая модель признаков, включающая лексический слой на основе TF-IDF<sup>9</sup> и семантический слой на основе локальных контекстных

<sup>7</sup> List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of sciences and for the degree of doctor of sciences should be published. <https://vak.gisnauka.ru/documents/editions>. Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

<sup>8</sup> Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. <https://vak.gisnauka.ru/>. Дата обращения 04.04.2026. [Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. <https://vak.gisnauka.ru/>. Accessed April 04, 2026. (In Russ.).]

<sup>9</sup> Term frequency – inverse document frequency – статистическая мера, учитывающая частоту термина в документе и обратную частоту документа. [Term frequency – inverse document frequency (TF-IDF) is a statistical measure that takes into account the term frequency in a document and the inverse document frequency.]

графов ICAN<sup>10</sup>. Для каждого документа и каждого паспорта определяются локальные и глобальные метрики близости, которые объединяются в гибридную скалярную оценку. Далее эта оценка переводится в вероятностный профиль по шифрам, который интерпретируется как информационный морфизм – структурно-сохраняющее отображение, переводящее представление документа из признакового пространства в онтологическое пространство паспортов таким образом, что лексические и контекстно-семантические связи получают согласованное представление в терминах нормативных понятий специальностей.

Такое построение решает две задачи. С одной стороны, оно сохраняет строгую привязку к нормативному языку паспортов и обеспечивает прозрачную интерпретацию вклада отдельных терминов и контекстных связей. С другой стороны, использование графовой семантической модели и гибридной агрегации позволяет учитывать вариативность формулировок, аббревиатуры и междисциплинарные связи. Это делает возможным не только точный выбор шифра, но и анализ распределения тематического вклада документа между несколькими близкими специальностями и построение агрегированных профилей научных акторов.

Цель статьи состоит в разработке и экспериментальной оценке графовой семантико-онтологической модели анализа научных текстов на русском языке, основанной в качестве объекта и предмета исследований на паспортах специальностей ВАК, а также в сопоставлении ее с крупными языковыми моделями в задачах восстановления шифров и анализа тематических профилей. Для достижения этой цели формируется корпус паспортов и сопутствующих текстов, разрабатывается единый конвейер нормализации, задаются лексический и семантический слои признаков и интегральная метрика информационного морфизма, а затем проводится валидация на авторефератах соискателей и на статьях из журналов Перечня ВАК<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Incremental construction of an associative network – вычислительная модель инкрементального построения ассоциативной сети на основе корпуса текстов. [Incremental construction of an associative network (ICAN) is a computational model for incremental construction of an associative network based on a text corpus.]

<sup>11</sup> Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. <https://vak.gisnauka.ru/documents/editions>. Дата обращения 04.04.2026. [List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of sciences and for the degree of doctor of sciences should be published. <https://vak.gisnauka.ru/documents/editions>. Accessed April 04, 2026. (In Russ.).]

Статья организована следующим образом. В первом разделе приводится обзор работ по семантической классификации текстов, онтологически ориентированным моделям и графовым представлениям. Во втором разделе описываются онтологическое основание исследования и корпус данных. В третьем разделе вводится графовая семантико-онтологическая модель признаков на основе TF-IDF и ICAN. В четвертом разделе формализуются метрики информационного морфизма и вероятностная интерпретация результатов. В пятом разделе представлены результаты валидации на авторефератах и научных статьях и сравнение с крупными языковыми моделями. В шестом разделе обсуждаются полученные результаты и формулируются выводы и направления дальнейших исследований.

## 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В обзоре [1] систематизированы подходы к семантической классификации текстов и проведено их сопоставление с традиционными методами на основе метода «мешок слов». Авторы показывают ограничения векторного представления  $BoW$ <sup>12</sup> (высокая размерность, разреженность, игнорирование синонимии и полисемии) и выделяют пять основных классов семантических методов: основанные на онтологиях, корпусно-статистические, модели глубокого обучения, методы с учетом последовательностей слов/символов и лингвистически обогащенные подходы. Обзор обобщает результаты множества экспериментов и демонстрирует преимущество семантических моделей по точности классификации.

В работе [2] анализируются методы извлечения знаний в контексте семантического веба с акцентом на онтологически ориентированный отбор признаков. Онтологии используются для представления и выбора признаков в задачах классификации, что позволяет сокращать размерность и повышать интерпретируемость моделей, при этом качество подхода существенно зависит от полноты и согласованности онтологий.

В работах [3–5] онтологии и семантические технологии рассматриваются как ключевой инструмент структурирования инженерных и научных знаний. В [3] предлагается онтологически ориентированный подход к автоматической классификации инженерных стандартов, использующий доменные онтологии для сопоставления фрагментов документов с бизнес-подразделениями.

В [4] разрабатывается двухэтапный метод описания заранее определенных потоков информации в стандартах и директивах, включающий

<sup>12</sup> Bag of words.

обобщенную модель данных и машиночитаемое представление, что повышает доступность и переиспользуемость сведений в цифровых моделях изданий. Работа [5] содержит библиометрический и семантический анализ исследований по онтологиям и семантическому вебу, выделяя основные направления, связанные с динамическим обновлением онтологий и масштабируемостью в условиях Big Data<sup>13</sup>.

В работе [6] представлен обзор онтологически ориентированных методов классификации текстов, в котором онтологии рассматриваются как формальная основа для обогащения векторных представлений и архитектур глубокого обучения за счет явного моделирования доменных концептов и их связей. В исследовании [7] предложен онтологически ориентированный подход к извлечению контекстуализированной информации из научных публикаций. На основе трансформерных моделей реализуется двухэтапный конвейер, включающий классификацию предложений и распознавание сущностей (исследовательских действий и методов), а затем извлечение связей между действиями и используемыми методами с интеграцией полученных данных и мета-данных публикаций в виде RDF<sup>14</sup>-графа.

Ряд работ [8–10] демонстрирует потенциал лексико-семантических представлений текста для решения разных задач анализа. В [8] вводятся специальные лексико-семантические параметры для определения тональности, получаемые через семантическое расширение сентиментных лексиконов и распределенные представления, что позволяет унифицировать размерность данных и повысить качество классификации.

Авторы работы [9] предлагают модель «лексико-семантических связей» между документами и статистический алгоритм кластеризации на основе косинусной близости в лексико-семантическом пространстве, сопоставимый по качеству с методом Affinity Propagation<sup>15</sup>.

В работе [10] используется набор лексико-семантических паттернов и процедуры сопоставления упоминаний в тексте с объектами доменной онтологии для их полуавтоматического пополнения. В совокупности эти подходы подтверждают эффективность лексико-семантических признаков.

В работе [11] исследователи решают задачу многоклассовой классификации несбалансированных текстовых данных с использованием лексической

онтологии WordNet<sup>16</sup> и модели BERT<sup>17</sup>. Лексическая онтология WordNet применяется для онтологически ориентированного снижения размерности признаков, после чего выполняется классификация традиционными алгоритмами и предобученной моделью BERT. Эксперименты на семиклассовом корпусе показывают, что сочетание WordNet и BERT обеспечивает наивысшую точность (до 93.77%) по сравнению с вариантами без онтологического уточнения признаков.

Ряд работ [12–15] систематически исследует графовые представления текста и графовые нейросетевые модели для задач классификации. В [12] проводится масштабное сравнение различных схем построения графов и архитектур GNN<sup>18</sup> с трансформерными моделями. В [13] исследователи анализируют, как выбор стратегии представления текста в виде графа влияет на качество GNN-моделей. Работы [14] и [15] развивают использование графовых моделей в архитектурах анализа текстового контента, ориентируясь на повышение интерпретируемости и качества классификации. В [14] предложен фреймворк, в котором графовое представление текста дополняется символическим отбором признаков, а в [15] разрабатывается иерархический графовый фреймворк, объединяющий лингвистические признаки, доменную онтологию, многоуровневое обучение GNN, механизмы внимания и динамическое слияние с BERT.

В работе [16] предложена концепция информационного онтологического моделирования, в которой информационный поиск и методы кластеризации рассматриваются как стадии формирования онтологических моделей и извлечения неявного знания.

В работе [17] авторы исследуют, как топологические характеристики графа слов зависят от жанра текста. Тексты разных жанров представляются в виде графов, где вершины соответствуют словам, а ребра – их соседству в биграмах; показано, что параметры таких сетей систематически различаются между жанрами и могут использоваться для

<sup>16</sup> Лингвистическая онтология, электронный тезаурус, который представляет в виде иерархической структуры систему значений слов общезначимого английского языка. [Linguistic ontology, an electronic thesaurus that represents the system of meanings of words in the generally significant English language in the form of a hierarchical structure.]

<sup>17</sup> Bidirectional encoder representations from transformers – нейронная сеть, разработанная для улучшения понимания естественного языка. Главное отличие BERT от предыдущих моделей – двунаправленное понимание контекста. [Bidirectional encoder representation from transformers (BERT) is a neural network designed to improve natural language understanding. BERT's key difference from previous models is its bidirectional context understanding.]

<sup>18</sup> Graph neural network – графовая нейронная сеть.

их характеристики и выявления поджанров. В работе [18] используется модель ICAN для построения семантических графов на уровне отдельных документов, что позволяет учитывать порядок слов, важный для семантического анализа.

## 2. ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ И КОРПУС ДАННЫХ

### 2.1. Паспорта специальностей ВАК

В системе аттестации научных кадров РФ тексты паспортов научных специальностей ВАК выполняют функцию нормативного описания предметных областей. Каждый паспорт закреплен за определенным шифром специальности и задает совокупность типичных объектов исследования, классов задач, применяемых методов и областей использования результатов. Эти документы имеют надведомственный статус и служат формальным основанием для отнесения диссертаций, авторефератов и публикаций к конкретной научной области.

Содержательно паспорта обладают устойчивой внутренней структурой, в которой, как правило, выделяются следующие блоки:

- перечень основных направлений и объектов исследований;
- типовые научные задачи и методы;
- связанные области знаний.

Такая структура позволяет использовать паспорта специальности не только как регламентирующие документы, но и как текстовые представления онтологий предметных областей. Под онтологией здесь понимается явным образом заданная система понятий и отношений, ограничивающая допустимое тематическое пространство.

Множество паспортов специальностей можно трактовать как конечное множество онтологических объектов:

$$O = \{s_1, \dots, s_N\}, \quad (1)$$

где каждый элемент  $s_i$  соответствует одной научной специальности, а текст паспорта задает ее концептуальное содержание.

Иерархическая структура шифров (укрупненные области, группы, конкретные специальности) задает частичный порядок на множестве  $O$  и фиксирует отношения включения и близости между областями. Вводится онтологическое пространство научных специальностей, в котором уровень укрупненных областей соответствует более общим классам, а отдельные шифры задают специализированные поддомены.

Кроме того, принимается ключевое методологическое допущение. Текст паспорта рассматривается как прототип соответствующей предметной области.

Лексемы и устойчивые словосочетания интерпретируются как поверхностные реализации понятий и отношений данной области, а структура разделов отражает тематическую связность этих элементов. Это позволяет использовать корпус паспортов научных специальностей для построения опорного семантико-онтологического признакового пространства, в котором описываются как сами паспорта, так и анализируемые документы.

При этом паспорта не являются формальными онтологиями в строгом логическом смысле и не задают систему аксиом и строгих ограничений. Однако их официальный статус, стабильность структуры и ориентация на описания объектов, задач и методов позволяют рассматривать их как практически приемлемое онтологическое основание для информационного анализа научных текстов.

В дальнейшем именно это основание используется для построения семантико-онтологической модели признаков и определения информационного морфизма между документами и пространством научных специальностей.

### 2.2. Сбор и хранение текстовых данных

Корпус онтологического основания формируется из паспортов научных специальностей, утвержденных ВАК. Для их сбора используются специализированные программные парсеры, которые автоматически обходят связанные веб-страницы официальных ресурсов, загружают файлы паспортов и привязанные к ним документы (в форматах html и pdf), а также фиксируют технические метаданные.

Для документов в формате pdf выполняется проверка наличия текстового слоя. Если текстовый слой присутствует, извлечение осуществляется напрямую; в противном случае применяется оптическое распознавание текста (optical character recognition, OCR) с последующей базовой очисткой результатов.

На этом этапе текст еще не нормализуется лингвистически, но устраняются очевидные артефакты (случайные бинарные вставки, некорректные кодировки), чтобы обеспечить корректность дальнейшей обработки. Подробный алгоритм нормализации описывается далее.

Для каждого паспорта сохраняются, в частности, следующие поля:

- уникальный идентификатор записи,
- код специальности,
- наименование,
- URL<sup>19</sup>-первоисточник,
- время сбора,
- хеш-значение файла,
- извлеченный текст после первичной очистки.

<sup>19</sup> Uniform resource locator – единый указатель ресурсов.

Первичный корпус паспортов формируется в виде JSONL<sup>20</sup>-файлов (один объект на строку), что удобно для архивирования и обмена данными. Для долгосрочного хранения и эффективного доступа данные переносятся в реляционную систему управления базами данных PostgreSQL<sup>21</sup>.

Для паспортов специальностей создается отдельная таблица, включающая код и наименование специальности, метаданные источника, контрольную сумму файла, а также нормализованный текст паспорта, используемый при построении признаков.

Для входных документов (научных статей и авторефератов диссертаций) создается соответствующая таблица, в которой, помимо текстового содержания и типа документа, при наличии фиксируется исходный код специальности (для авторефератов), т.к. он используется в качестве экспертной оценки при оценке качества модели.

### 2.3. Нормализация текстов

Нормализация текстов играет ключевую роль в предлагаемой модели, поскольку именно на этом этапе задается единое признаковое пространство, в котором в дальнейшем будут сравниваться научные тексты с паспортами научных специальностей.

Обработка текстового контента намеренно организована как общая для всех категорий документов, чтобы различия в признаках отражали содержательные особенности текстов, а не артефакты формата, верстки или источника.

На первом этапе выполняется техническая очистка извлеченного текста. После получения содержимого из html-страниц или pdf-файлов (с использованием OCR при отсутствии текстового слоя) удаляются некорректные кодировки, бинарные вставки, фрагменты служебной разметки. После переноса строк приводятся к обычным пробелам. Для pdf-документов автоматически выявляются и удаляются повторяющиеся колонтитулы и шапки страниц.

Затем выполняется фильтрация служебных блоков. Из текстов удаляются явно редакционно-издательские фрагменты (литература, ключевые слова, сведения об издательстве, контактная информация авторов, сведения об авторах и прочее), а также технические элементы: URL, адреса электронной

почты, числовые идентификаторы (ORCID<sup>22</sup>, Scopus ID<sup>23</sup> и др.).

Следующим шагом является приведение форм текста. Весь текст переводится в нижний регистр, символ «ё» заменяется на «е», устраняются искусственные переносы и убираются лишние пробелы. Удаляется пунктуация и все служебные символы. Отдельное внимание уделяется дефисным терминам, т.к. для сохранения терминологической целостности используется словарь склеек, в соответствии с которым сложные слова вида «объектно-ориентированный», «научно-исследовательский» приводятся к форме с нижним подчеркиванием («объектно\_ориентированный», «научно\_исследовательский»). Это позволяет рассматривать устойчивые сложные термины как единые лексические единицы в последующем анализе.

Далее проводится обработка числовых выражений. Если токен состоит только из цифр, он преобразуется в словесную форму на русском языке (например, «2025» преобразуется в «две тысячи двадцать пятый»), что предотвращает увеличение размерности словаря за счет большого количества уникальных чисел при сохранении смысловой информации о количественных характеристиках. Однако при этом технические стандарты, индексы и обозначения (например, «5g», «3d», «h264», «iprv6») сохраняются как отдельные токены и нормализуются к нижнему регистру, поскольку они являются важными маркерами предметной области.

На этапе лингвистической нормализации выполняются токенизация, лемматизация и фильтрация стоп-слов. Текст разбивается на токены с учетом ранее введенных правил замены пунктуации и дефисных конструкций. Для каждого токена определяется нормальная форма (лемма). При необходимости унифицируются распространенные сокращения и обозначения единиц измерения, а доменные аббревиатуры переводятся в стандартные формы.

В итоге результатом нормализации является устойчивое текстовое представление в виде последовательности лемм, разделенных пробелами, без пунктуации, чисел и служебных слов. При необходимости дополнительно формируется список токенов с позиционными диапазонами в исходном тексте, что позволяет позже интерпретировать вклад отдельных фрагментов в итоговые оценки близости. Именно эта нормализованная последовательность лемм используется для построения признаков в лексическом (TF-IDF) и семантическом (ICAN) слоях модели.

<sup>20</sup> JSON Lines – текстовый формат, в котором каждая строка содержит один допустимый JSON-объект (JavaScript object notation). [JSON Lines is a text format in which each line contains one valid JSON object (JavaScript object notation).]

<sup>21</sup> <https://www.postgresql.org/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026.

<sup>22</sup> Open researcher and contributor identifier – открытый идентификатор исследователя и участника.

<sup>23</sup> Уникальный идентификатор автора в базе данных Scopus. <https://www.scopus.com/>. Дата обращения 04.04.2026. [Unique author identifier in the Scopus database. <https://www.scopus.com/>. Accessed April 04, 2026.]

### 3. ГРАФОВАЯ СЕМАНТИКО-ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИЗНАКОВ

#### 3.1. «Чанки» паспортов и $n$ -граммы

Нормализованные тексты паспортов научных специальностей (см. 2.3) далее рассматриваются как последовательности лемм  $w$ :

$$d_s = (w_1, \dots, w_{T_s}), \quad (2)$$

где  $T_s$  – длина паспорта  $s$  в токенах после преобразования.

Поскольку паспорта специальностей состоят из разнородных разделов (описание объектов, задач, методов, междисциплинарных связей), то представление всего текста одним вектором приводит к тому, что слабосвязанные фрагменты усредняются, что снижает чувствительность модели к тематическим различиям внутри паспорта.

Для повышения чувствительности модели к локальным областям смысловой концентрации каждый паспорт разбивается на фрагменты фиксированной длины  $L$  токенов – чанки. Число чанков для паспорта  $s$  задается следующим образом:

$$n_s = \left\lceil \frac{T_s}{L} \right\rceil. \quad (3)$$

Каждый чанк  $c_{s,i}$  наследует метаданные паспорта (код и наименование специальности), а также хранит позиционный диапазон  $[a_i, b_i]$  в исходном тексте, что позволяет впоследствии интерпретировать вклад отдельных фрагментов в итоговые оценки.

Выбор длины  $L$  определяется компромиссом между локальной чувствительностью и устойчивостью представления.

Слишком короткие чанки приводят к чрезмерной разреженности векторного пространства и усиливают влияние артефактов разметки и ошибок OCR на каждый отдельный фрагмент. Слишком длинные, напротив, делают локальные метрики сходства практически эквивалентными глобальной, что фактически нивелирует эффект разбиения текста на чанки.

В проведенных экспериментах анализировались значения  $L \in \{100, 200, 300\}$ , длина  $L = 200$  показала баланс между числом фрагментов на паспорт, устойчивостью к шуму и вычислительной стоимостью и далее используется как значение по умолчанию (рисунок).

Разбиение на чанки решает две задачи. Во-первых, локализует профильную лексику, а именно: внутри фрагмента длиной порядка сотен токенов увеличивается доля терминов, характерных для конкретной области, что приводит к более «резким» косинусным сходствам при сравнении с документами.

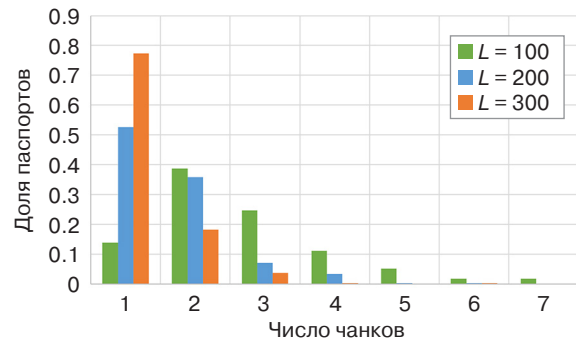


Рисунок. Распределение числа чанков  $n_s$  по паспортам при  $L \in \{100, 200, 300\}$

Во-вторых, повышает устойчивость к структурным и версточным артефактам, в которых отдельные технические вставки или остатки колонтитулов влияют лишь на свои локальные вектора и не доминируют в глобальной оценке.

Поэтому наличие у значимой доли паспортов как минимум двух-трех фрагментов важно для локальной метрики, т.к. увеличивается вероятность того, что хотя бы один фрагмент будет близок к рассматриваемому документу, а агрегат по top  $N$  становится чувствительнее к тематическим совпадениям.

После на множестве всех чанков паспортов  $D = \{c_1, \dots, c_N\}$  строится лексический словарь  $n$ -грамм. Для каждого чанка  $c \in D$  имеется последовательность лемм  $(w_1, \dots, w_{T(c)})$ .

Рассматриваются два уровня:

- множество униграмм  $U(c) = \{w_i\}_{i=1}^{T(c)}$ ,
- множество биграмм  $B(c) = \{(w_i, w_{i+1})\}_{i=1}^{T(c)-1}$ .

Использование биграмм принципиально для фиксации устойчивых терминологических сочетаний («нейронная сеть», «интернет-сеть», «сеть связи» и др.), которые уточняют семантику полисемичных лемм и служат более надежными маркерами предметных областей, чем отдельные слова.

Для каждого термина  $t$  (как униграммы, так и биграммы) вычисляется число чанков корпуса, в которых этот термин встречается хотя бы один раз:

$$df(t) = |\{c \in D: t \in c\}|. \quad (4)$$

Далее вводятся пороговые ограничения по минимальному и максимальному числу появлений:

$$df(t) \geq d_{\text{MIN}}, \frac{df(t)}{N} \leq d_{\text{MAX}}, \quad (5)$$

где  $d_{\text{MIN}}$  задает нижнюю границу числа чанков, в которых термин должен встретиться, что позволяет сохранять редкие, но предметно значимые лексемы, а  $d_{\text{MAX}}$  задает верхнюю границу относительной распространенности термина по корпусу, исключая из словаря чрезмерно частые, малоинформативные единицы.

Итоговый словарь  $V$  определяется как множество терминов, удовлетворяющих указанным условиям:

$$V = \left\{ t \in V' : df(t) \geq d_{\text{MIN}}, \frac{df(t)}{N} \leq d_{\text{MAX}} \right\}, \quad (6)$$

где  $V'$  – совокупность всех униграмм и биграмм, извлеченных из корпуса чанков.

Таким образом, в семантико–онтологической модели признаков паспорта специальностей задают базисное пространство  $n$ -грамм  $V$ , в котором далее строятся TF-IDF-представления как самих паспортов (на уровне чанков и центроидов), так и входных документов.

Использование чанкования и комбинированного словаря униграмм и биграмм позволяет совместить локальную тематическую чувствительность с устойчивостью к шуму и обеспечить интерпретируемость получаемых признаковых векторов.

### 3.2. Лексический слой

На лексическом уровне каждый чанк паспорта специальности рассматривается как документ в общем словаре  $n$ -грамм  $V$ , построенном по корпусу паспортов (см. п. 3.1). Для каждого термина  $t \in V$  и чанка  $c$  вычисляется частота вхождений  $tf(t, c)$ , после чего формируется взвешенное представление с использованием алгоритма TF-IDF.

Для учета повторных вхождений терминов в документ используется сублогарифмическая частота термина (сублогарифмический TF):

$$tf(t, c) = \begin{cases} 1 + \ln(tf(t, c)), & \text{при } tf(t, c) > 0, \\ 0, & \text{при } tf(t, c) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Использование сублогарифмического TF позволяет уменьшить вклад часто повторяющихся терминов внутри одного фрагмента, поскольку каждое последующее появление увеличивает их вес с уменьшающимся приростом, что снижает влияние локальных аномально высоких частот и уменьшает зависимость оценки от длины фрагмента текста.

Обратная частота IDF вычисляется по сглаженной формуле:

$$idf(t) = \log \frac{1 + N}{1 + df(t)} + 1, \quad (8)$$

где  $N$  – общее число чанков в корпусе паспортов;  $df(t)$  – количество чанков, в которых термин  $t$  встречается хотя бы один раз.

Добавление единицы в числитель и знаменатель обеспечивает численную устойчивость при крайних значениях  $df(t)$ , а сдвиг на единицу сохраняет положительность весов даже для терминов, встречающихся во всех документах. При этом функция  $idf(t)$  остается монотонно убывающей по мере роста  $df(t)$ , редкие термины получают более высокий вес, а часто встречающиеся термины – более низкий.

Вес термина  $t$  в чанке  $c$  задается произведением:

$$w_t(c) = tf(t, c) \cdot idf(t). \quad (9)$$

Вектор  $w(c)$ , значения которого заданы величинами  $w_t(c)$ , интерпретируется как онтологический вектор, где каждая координата соответствует лексеме или устойчивому словосочетанию, ассоциированному с элементом онтологии (понятием, свойством или типичным отношением в предметной области).

Таким образом лексический слой фиксирует вклад онтологических маркеров, проявляющихся на уровне терминов и  $n$ -грамм.

Для обеспечения сопоставимости векторов выполняется  $L_2$ -нормализация:

$$x(c) = \frac{w(c)}{\|w(c)\|_2}, \quad (10)$$

где  $\|w(c)\|_2$  обозначает длину вектора.

После  $L_2$ -нормализации учет общей длины и объема текста при сравнении документов существенно уменьшается, а направление вектора определяется относительным распределением весов терминов.

Поскольку значения TF-IDF неотрицательны, то скалярное произведение двух  $L_2$ -нормированных векторов совпадает с косинусным сходством и лежит в диапазоне  $[0; 1]$ , что удобно для последующей интерпретации результатов.

Нормированные TF-IDF-векторы всех чанков паспортов формируют разреженную матрицу

$$X \in \mathbb{R}^{M \times |V|}, \quad (11)$$

где  $M = \sum_s n_s$  – общее количество чанков по всем специальностям,  $|V|$  – размер словаря.

Матрица хранится в CSR<sup>24</sup>-формате, где отдельно сохраняются массив ненулевых весов, индексы соответствующих терминов и указатели границ строк. Использование CSR-формата обеспечивает компактное хранение и позволяет вычислять произведение  $v^T X$  за время, пропорциональное числу ненулевых компонент вектора  $v$  и ненулевых элементов матрицы  $X$ .

В дальнейшем в том же словаре  $V$  и с теми же значениями  $idf(t)$  представляются входные документы (научные статьи, авторефераты диссертации). Их нормированные TF-IDF-векторы сопоставляются с векторами чанков и агрегированными представлениями паспортов, а косинусные сходства выступают базовыми информационно-онтологическими метриками в предлагаемой модели.

### 3.3. Семантический слой

Лексический слой фиксирует совпадения терминов и устойчивых словосочетаний, однако остается

<sup>24</sup> Compressed sparse row – формат хранения разреженных матриц.

чувствительным к вариативности формулировок, синонимии и аббревиатурам. Для учета контекстных связей между леммами вводится семантический слой, основанный на графовой модели ICAN, в которой каждый текст описывается в виде локального графа совместной встречаемости терминов [19].

Пусть нормализованный текст документа (чапка паспорта, статьи или автореферата) задан последовательностью лемм  $d = (t_1, \dots, t_T)$ , а множество уникальных лемм этого текста обозначено как  $W = \{u_1, \dots, u_{m_d}\}$ . Тогда для текста строится ориентированный взвешенный граф  $G_d$  на вершинах  $W$ , а его структура задается матрицей смежности  $M \in [0; 1]^{m_d \times m_d}$ , инициализируемой нулями.

Граф формируется при проходе по тексту со скользящим окном фиксированной ширины  $W$  (по умолчанию  $W = 11$  токенов). В каждой позиции окна выбирается центральный токен  $x$ ; все остальные токены в окне рассматриваются как его контекстные соседи  $y$ . Обновление матрицы  $M$  осуществляется в три этапа.

На первом этапе усиливаются прямые связи между центральным токеном и его контекстом (контекстными соседями слева и справа от центрального токена  $x$ ).

Если связь  $M_{xy} = 0$ , то связь инициализируется базовым весом 0.5, а при повторных появлениях в том же контекстном отношении вес плавно увеличивается по формуле (12), что обеспечивает монотонный рост и при этом ограничивает величину веса.

$$M_{xy} = M_{xy} + \frac{1}{2}(1 - M_{xy}). \quad (12)$$

На втором этапе производится учет косвенных связей 2-го порядка. Если токен  $y$  уже связан с токеном  $k$  (т.е.  $M_{yk} > 0$ ), то для пары  $(x, k)$  добавляется ослабленный вклад:

$$M_{yk} = M_{yk} + A(1 - M_{xk})M_{xy}M_{yk}, \quad (13)$$

где  $A \ll 1$  – коэффициент масштабирования.

В результате полученный граф отражает не только совместную встречаемость терминов в одном скользящем окне, но и связи через общие контекстные соседи, что позволяет фиксировать более широкие контекстные ассоциации.

На третьем этапе к матрице  $M$  применяется операция затухания и пороговой фильтрации. Все веса умножаются на коэффициент  $\gamma \in (0, 1)$ , а элементы с величиной ниже порога  $\theta$  принимаются равными нулю:

$$M_{xy} = \gamma M_{xy}, \quad (14)$$

где  $M_{xy} = 0$  при  $M_{xy} \leq \theta$ ,  $\gamma = 0.9$  – коэффициент затухания,  $\theta = 0.4$  – пороговый коэффициент удаления связи.

Такая процедура подавляет случайные слабые связи и формирует более устойчивую структуру графа, отражающую стабильные контекстные связи.

В итоге семантическое представление текста в пространстве ICAN задается вектором степеней вершин. Для каждой леммы  $u_i \in W$  вычисляется ее степень (суммарный вес исходящих и входящих ребер):

$$k_i = \sum_j M_{ij} + \sum_j M_{ji}. \quad (15)$$

Вектор  $\mathbf{k}(d) = (k_1, \dots, k_{m_d})$  отражает относительную важность лемм в контекстной структуре текста, где высокие значения соответствуют терминам, играющим роль «узловых точек» семантического графа.

Для интеграции с лексическим слоем и онтологическим основанием вектор  $\mathbf{k}(d)$  проецируется в общий базис словаря  $V$ , построенного по корпусу паспортов. Если  $V = \{v_1, \dots, v_{|V|}\}$ , то семантический вектор  $\mathbf{s}(d) \in \mathbb{R}^{|V|}$  определяется по формуле:

$$s_j(d) = \begin{cases} k_i, & \text{если лемма } u_i \text{ совпадает с } v_j, \\ 0. & \end{cases} \quad (16)$$

Далее выполняется  $L_2$ -нормализация:

$$\hat{\mathbf{s}}(d) = \frac{\mathbf{s}(d)}{\|\mathbf{s}(d)\|_2}, \quad (17)$$

что делает семантические векторы сопоставимыми по масштабу и позволяет использовать косинусное сходство.

#### 4. МЕТРИКИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОРФИЗМА

Обозначенные ранее в п. 3.2 лексический (TF-IDF) и в п. 3.3 семантический (ICAN) слои задают два согласованных признаковых пространства, в каждом из которых документ может быть сопоставлен с паспортами научных специальностей. В обоих случаях используются две группы метрик:

- локальные, измеряющие близость документа к отдельным фрагментам паспорта;
- глобальные, характеризующие близость документа к центроиду паспорта, полученному усреднением по всем его фрагментам.

Эти метрики вводятся в унифицированной форме и далее применяются отдельно в каждом слое.

Пусть для входного документа  $d$  построен нормированный вектор признаков  $\mathbf{v}(d)$ , а для каждого чанка  $c_{s,i}$  паспорта  $s$  построен нормированный вектор  $\mathbf{u}_{s,i}$ , где  $i = 1, \dots, n_s$ . Все векторы нормированы и неотрицательны.

Тогда локальная метрика задается как косинусное сходство документа с отдельным чанк-вектором паспорта по формуле:

$$\text{CosSimilarity}(d, c_{s,i}) = \langle \mathbf{v}(d), \mathbf{u}_{s,i} \rangle \in [0; 1]. \quad (18)$$

Для каждого паспорта  $s$  это определяет набор локальных оценок  $\text{CosSimilarity}(d, c_{s,i})_{i=1}^{n_s}$ , отражающих то, насколько сильно документ сопоставим по содержанию с отдельными фрагментами текста паспорта.

На основе этих оценок вводится агрегированная локальная метрика  $\text{MaxSim}_k$ , учитывающая только несколько наибольших совпадений

$$r_{s,i} = \text{CosSimilarity}(d, c_{s,i}), i = 1, \dots, n_s, \quad (19)$$

а через  $r_{s,1} \geq \dots \geq r_{s,n_s}$  – упорядоченные по убыванию значения. Тогда локальная оценка для  $s$  задается следующим образом:

$$\text{MaxSim}_k(d, s) = \frac{1}{k_s} \sum_{j=1}^{k_s} r_{s,j}, k_s = \min(k, n_s). \quad (20)$$

Таким образом,  $\text{MaxSim}_k$  отражает наличие в паспорте нескольких фрагментов, максимально близких к содержанию документа. Выбор параметра  $k$  обеспечивает компромисс между чувствительностью к узким совпадениям и устойчивостью к шуму и в экспериментальной части используется равный трем ( $k = 3$ ).

Глобальная метрика формируется через центроид паспорта в рассматриваемом слое. Для паспорта  $s$  усредненный вектор определяется по формуле:

$$\bar{\mathbf{u}}_s = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{u}_{s,i}. \quad (21)$$

После этого выполняется нормализация, а глобальная мера близости документа  $d$  к паспорту  $s$  задается косинусным сходством с центроидом по формуле:

$$\begin{aligned} \text{Centroid Cos}(d, s) &= \langle \mathbf{v}(d), \mathbf{u}_s \rangle = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \langle \mathbf{v}(d), \mathbf{u}_{s,i} \rangle}{\left\| \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{u}_{s,i} \right\|_2} \in [0; 1]. \end{aligned} \quad (22)$$

В результате в каждом слое документы и паспорта специальными связаны парой комплементарных метрик:  $\text{MaxSim}_k(d, s)$  – локальная метрика, чувствительная к наиболее релевантным фрагментам паспорта;  $\text{CentroidCos}(d, s)$  – глобальная метрика, отражающая соответствие общей тематике.

#### 4.1. Гибридная модель и интегральная метрика

Локальные и глобальные метрики, определенные для лексического и семантического слоев, задают согласованные оценки близости документа  $d$  к паспорту  $s$ .

Далее эти метрики объединяются в одно скалярное значение внутри соответствующего слоя, после чего результаты лексического и семантического слоев агрегируются в итоговую гибридную метрику.

Внутри каждого слоя локальная и глобальная метрики объединяются по формуле:

$$S(d, s) = (1 - \alpha)\text{CentroidCos}(d, s) + \alpha\text{MaxSim}(d, s), \quad (23)$$

где коэффициент  $\alpha$  задает баланс между  $\text{CentroidCos}(d, s)$ , отражающей близость к паспорту в целом, и  $\text{MaxSim}(d, s)$ , выделяющей наиболее близкие фрагменты паспорта.

В лексическом слое TF-IDF увеличение  $\alpha$  усиливает вклад точных терминологических совпадений, поскольку при  $\alpha > 0.5$  возрастает влияние локальных максимумов  $\text{MaxSim}$ , возникающих в тех паспортах, которые содержат фрагменты с высокой концентрацией совпадающих  $n$ -грамм. Значение  $\alpha = 0.6$  выбрано эмпирически по результатам валидации как обеспечивающее наилучшее качество классификации и рекомендационного ранжирования.

Полученные значения  $S(d, s)$  для TF-IDF и ICAN интерпретируются как две независимые, но согласованные оценки соответствия документа паспорту. Первая – в терминах точных лексических маркеров, вторая – в терминах контекстных ассоциаций. Для формирования итогового скалярного сора вводится гибридная метрика:

$$S(d, s) = (1 - \lambda)S_{\text{TF}}(d, s) + \lambda S_{\text{ICAN}}(d, s), \lambda \in [0; 1], \quad (24)$$

где параметр  $\lambda$  регулирует вклад семантического слоя относительно лексического.

При  $\lambda$ , стремящейся к единице, доминируют графовые представления ICAN, что повышает устойчивость к перефразированиям и аббревиатурам. В проведенных экспериментах эмпирически подобраны значения  $\alpha_{\text{TF}} \approx 0.6$ ,  $\alpha_{\text{ICAN}} \approx 0.5$ ,  $\lambda \approx 0.5$ , обеспечивающие баланс между точностью и устойчивостью на корпусах авторефератов и статей.

С вычислительной точки зрения все составляющие метрики  $S(d, s)$  получаются из двух векторно-матричных операций вида  $\mathbf{r} = \mathbf{X} \times \mathbf{v}(d)$ , где  $\mathbf{X}$  – матрица чанк-векторов, а  $\mathbf{r}$  – вектор косинусных сходств со всеми чанками всех паспортов.

Формально, с концептуальной точки зрения значение  $S(d, s)$  можно трактовать как интенсивность информационного морфизма от документа  $d$  к онтологической сущности  $s$ . Так как чем выше  $S(d, s)$ ,

тем более согласовано содержание текста воспроизводит лексико-семантический профиль соответствующей специальности.

#### 4.2. Оценка вероятностного морфизм

Интегральная метрика  $S(d, s)$  задает для каждого документа  $d$  и паспорта специальности  $s \in O$  скалярную оценку степени соответствия. Для перехода от набора таких оценок к формальному информационному морфизму требуется построить вероятностное распределение по онтологическому множеству паспортов  $O$ .

Пусть для фиксированного документа  $d$  вычислены значения  $S(d, s)_{s \in O}$ , тогда на их основе вводится распределение вероятностей по схеме softmax<sup>25</sup> с температурой  $\tau > 0$ :

$$P(s | d, \tau) = \frac{e^{(S(d,s)-M)/\tau}}{\sum_{q \in O} e^{(S(d,q)-M)/\tau}}, \quad (25)$$

где  $M = \max_{q \in O} S(d, q)$  используется для численной

стабилизации (log-sum-exp нормировка). Вычитание  $M$  не влияет на относительные вероятности, но предотвращает переполнение при экспоненциальном преобразовании.

Параметр  $\tau$  определяет степень концентрации распределения вероятностей:

- при  $\tau \ll 1$  распределение становится более концентрированным, поскольку даже небольшие различия в значениях  $S(d, s)$  приводят к выраженному доминированию одного или нескольких паспортов;
- при  $\tau \approx 1$  применяется стандартное температурное масштабирование, при котором softmax сохраняет типичное поведение нормировки оценок;
- при  $\tau > 1$  распределение становится более сглаженным, что удобно при анализе междисциплинарных и пограничных текстов, для которых характерно наличие нескольких сопоставимых по величине оценок.

Полученное распределение  $P(s | d, \tau)$  задает отображение:

$$\mu: D \rightarrow \Delta(O), \mu(d) = P(s | d, \tau), \quad (26)$$

где  $D$  – множество документов, а  $\Delta(O)$  – симплекс вероятностных мер на множестве паспортов специальностей.

<sup>25</sup> Температурный softmax – функция нормализации, переводящая логиты  $z_i$  в распределение вероятностей, где параметр температуры  $T > 0$  регулирует «резкость» этого распределения.

Именно  $\mu$  интерпретируется как информационный морфизм от текстового пространства к онтологическому пространству  $O$ , где по каждому документу сопоставляется распределение его тематического вклада по нормативно заданным областям.

Точечное решение задачи классификации при этом соответствует паспорту с максимальной вероятностью:

$$\hat{s}_1(d) = \arg \max_{s \in O} P(s | d, \tau). \quad (27)$$

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

### 5.1. Результаты валидации модели на авторефератах соискателей

Валидация модели проводилась на корпусе из 124 авторефератов соискателей. Корпус охватывает шестнадцать диссертационных советов пяти организаций. Это МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)<sup>26</sup>, Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина (РГРТУ)<sup>27</sup>, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)<sup>28</sup>, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ФИЦ ИПУ РАН)<sup>29</sup> и Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)<sup>30</sup>.

Для каждого совета учитывались авторефераты по шифрам, входящим в его область компетенции, например, 2.3.2, 2.3.5, 2.3.8 для совета Д24.2.326.09. В качестве эталонной метки для каждого документа принимался официальный шифр специальности, указанный в данных диссертационного совета.

Для трех конфигураций модели: лексической TF-IDF, семантической ICAN и гибридной оценивались две метрики.

Первая метрика – точность top 1, т.е. доля авторефератов, для которых паспорт с максимальным значением  $S(d, s)$  совпадает с эталонным шифром.

Вторая метрика – точность top 3, т.е. доля авторефератов, для которых эталонный шифр входит в тройку паспортов с наибольшими значениями  $S(d, s)$ .

<sup>26</sup> <https://www.mirea.ru/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

<sup>27</sup> <https://rsreu.ru/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

<sup>28</sup> <https://www.frccsc.ru/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

<sup>29</sup> <https://www.ipu.ru/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

<sup>30</sup> <https://www.rudn.ru/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

Агрегированные по всему корпусу значения демонстрируют устойчивое преимущество гибридной модели. Средняя по всем советам и документам точность top 1 для TF-IDF составляет около 0.58, для ICAN – около 0.57, для гибридной конфигурации – около 0.69. Для точности top 3 картина еще более выраженная. Модель TF-IDF дает в среднем около 0.74, ICAN – около 0.81, гибридная модель достигает порядка 0.90, т.е. в девяти случаях из десяти верный паспорт входит в тройку наиболее близких по значению  $S(d, s)$ .

Рассмотрение результатов по отдельным организациям показывает схожую картину. В выборках РТУ МИРЭА (табл. 1), где анализировались советы Д24.2.326.09, Д24.2.326.03, Д24.2.326.08 и Д24.2.326.10, средняя точность top 1 по авторефератам равна примерно 0.54 для TF-IDF и около 0.63 для ICAN. Гибридная модель повышает этот показатель до 0.75.

По метрике top 3 гибридная конфигурация достигает около 0.96, т.е. почти во всех случаях верный шифр присутствует среди трех наиболее вероятных.

**Таблица 1.** Результаты модели для авторефератов в РТУ МИРЭА

Совет Д24.2.326.09			Совет Д24.2.326.03		
Научные специальности 2.3.2, 2.3.5, 2.3.8			Научные специальности 1.4.7, 1.4.10		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3	Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.6	0.7	TF-IDF	0.5	0.63
ICAN	0.7	0.7	ICAN	0.5	0.75
Гибридный	0.8	1	Гибридный	0.63	0.88
Совет Д24.2.326.08			Совет Д24.2.326.10		
Научные специальности 1.2.2, 2.3.1			Научная специальность 5.2.3		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3	Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.33	0.67	TF-IDF	0.67	0.67
ICAN	0.67	0.67	ICAN	0.67	1
Гибридный	0.67	1	Гибридный	1	1

В РГРТУ (табл. 2), для советов Д24.2.375.01, Д24.2.375.02, Д24.2.375.03 и Д99.2.113.02, лексическая модель демонстрирует среднюю точность top 1 порядка 0.68 при значении около 0.61 для ICAN.

При этом семантический слой дает более высокую точность top 3, около 0.89 против 0.78 у TF-IDF.

Гибридная модель сочетает преимущества обеих конфигураций и выходит на среднюю точность top 1 около 0.75 и top 3 около 0.93.

**Таблица 2.** Результаты модели для авторефератов в РГРТУ

Совет Д24.2.375.01			Совет Д24.2.375.02		
Научные специальности 2.3.1, 2.3.5			Научные специальности 1.3.2, 1.3.11, 2.2.1		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3	Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.67	0.67	TF-IDF	0.67	0.83
ICAN	0.67	1	ICAN	0.5	0.83
Гибридный	0.67	0.67	Гибридный	0.5	0.83
Совет Д24.2.375.03			Совет Д99.2.113.02		
Научные специальности 2.2.11, 2.2.12, 2.2.13			Научная специальность 2.3.8		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3	Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.69	0.81	TF-IDF	0.67	0.67
ICAN	0.63	0.94	ICAN	0.67	0.67
Гибридный	0.81	1	Гибридный	1	1

В ФИЦ ИУ РАН (табл. 3) для советов Д24.1.224.04, Д24.1.224.03 и Д24.1.224.02 средняя точность top 1 составляет около 0.60 для TF-IDF и около 0.50 для ICAN. Гибридная модель повышает этот показатель до 0.70.

При этом по метрике top 3 TF-IDF и ICAN дают близкие значения порядка 0.83, а гибридная конфигурация выходит на уровень около 0.90.

**Таблица 3.** Результаты модели для авторефератов в ФИЦ ИУ РАН

Совет Д24.1.224.04			Совет Д24.1.224.03		
Научные специальности 2.3.2, 2.3.5, 2.3.6			Научные специальности 1.2.1, 1.2.3, 2.3.8		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3	Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.67	1	TF-IDF	0.56	0.78
ICAN	0.67	1	ICAN	0.39	0.83
Гибридный	1	1	Гибридный	0.61	0.89
Совет Д24.1.224.02					
Научные специальности 1.1.2, 1.1.6, 1.1.9					
Метод	Точность по top 1		Точность по top 3		
TF-IDF	0.67		0.89		
ICAN	0.67		0.78		
Гибридный	0.78		0.89		

В ФИЦ ИПУ РАН (табл. 4), где корпус включает пять авторефератов совета Д24.1.107.02, выборка мала и результаты следует интерпретировать с осторожностью. В этой группе семантическая модель ICAN дает лучшую точность top 1 около 0.60 по сравнению с 0.40 у TF-IDF.

Гибридная конфигурация сохраняет уровень top 1 около 0.60, однако по top 3 не превосходит семантическую ветвь.

**Таблица 4.** Результаты модели для авторефератов в ФИЦ ИПУ РАН

Совет Д24.1.107.02		
Научные специальности 2.3.1, 2.3.4		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.4	0.6
ICAN	0.6	0.8
Гибридный	0.6	0.6

В РУДН (табл. 5), для четырех советов ПДС 0300.004, ПДС 2028.001, ПДС 0900.006 и ПДС 0200.002, средняя по корпусу точность top 1 для TF-IDF и ICAN близка и составляет около 0.54.

Гибридная модель повышает этот показатель до 0.62. Для top 3 лексическая и семантическая конфигурации дают значения порядка 0.70 и 0.78, в то время как гибридная модель достигает около 0.89. На отдельных советах наблюдаются существенные выигрыши.

Для ПДС 2028.001 гибридная модель улучшает точность top 3 с 0.56 у TF-IDF и 0.78 у ICAN до единицы. Для ПДС 0200.002 гибридная конфигурация также поднимает точность top 3 до единицы при сохранении высокой точности top 1.

Таким образом валидация на корпусе авторефератов соискателей показывает, что предложенная семантико-онтологическая модель в гибридной конфигурации обеспечивает устойчивое и интерпретируемое качество восстановления шифров специальностей.

В большинстве случаев верный паспорт попадает в узкий набор наиболее вероятных кандидатов, что делает модель пригодной как для автоматизированной поддержки выбора шифра, так и для анализа альтернативных тематически близких областей.

**Таблица 5.** Результаты модели для авторефератов в РУДН

Совет ПДС 0300.004			Совет ПДС 2028.001		
Научные специальности 3.1.18, 3.1.20, 3.3.6			Научные специальности 5.8.1, 5.8.7		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3	Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.56	0.75	TF-IDF	0.44	0.56
ICAN	0.44	0.81	ICAN	0.44	0.78
Гибридный	0.56	0.81	Гибридный	0.56	1
Совет ПДС 0900.006			Совет ПДС 0200.002		
Научная специальность 5.1.4			Научные специальности 1.4.1, 1.4.3, 1.4.4		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3	Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.4	0.6	TF-IDF	0.71	0.86
ICAN	0.8	0.8	ICAN	0.71	0.71
Гибридный	0.8	0.8	Гибридный	0.71	1

## 5.2. Результаты валидации модели на научных работах, опубликованных в Перечне ВАК

Валидация модели на научных статьях проводилась на корпусе публикаций из журналов, включенных в действующий Перечень ВАК. Для этих журналов известна их отнесенность к укрупненным областям наук и к группам научных специальностей, что позволило провести оценку как на агрегированном уровне областей, так и на уровне групп паспортов.

В первом эксперименте анализировалась точность отнесения статьи к укрупненной области наук. Эталонная область определялась по профилю журнала в Перечне ВАК, предсказанная область по паспорту с максимальным значением  $S(d, s)$ . Результаты показывают различия в поведении лексической, семантической и гибридной конфигураций (табл. 6).

**Таблица 6.** Результаты оценки научных статей по укрупненным областям наук

Метод	Точность по каждой укрупненной области наук				
	1. Естественные науки	2. Технические науки	3. Медицинские науки	4. Сельскохозяйственные науки	5. Социальные и гуманитарные науки
TF-IDF	0.85	0.87	0.85	0.86	0.83
ICAN	0.79	0.72	0.74	0.9	0.91
Гибридный	0.9	0.88	0.93	0.92	0.94

Метод TF-IDF демонстрирует наибольшую устойчивость в естественных и технических науках, где точность top 1 составляет соответственно 0.85 и 0.87. В медицинских и сельскохозяйственных науках точность TF-IDF равна 0.85 и 0.86, в социально-гуманитарных науках – 0.83. Это согласуется с тем, что в естественнонаучных и технических областях терминология более стандартизована и ближе к формулировкам паспортов.

Семантическая модель ICAN заметно выигрывает там, где язык публикаций более вариативен. В социально-гуманитарных науках точность достигает 0.91 при 0.83 у TF-IDF. В сельскохозяйственных науках ICAN дает 0.90 против 0.86 у TF-IDF. В естественных, технических и медицинских науках ICAN немного уступает лексической модели, что отражает зависимость чисто семантического слоя от качества локальных графов в терминосодержательных, но хорошо стандартизованных областях.

Гибридная конфигурация объединяет сильные стороны обоих подходов. По всем пяти укрупненным областям она дает наибольшие значения точности top 1. Для естественных наук точность составляет 0.90, для технических – 0.88, для медицинских – 0.93, для сельскохозяйственных – 0.92, для социально-гуманитарных – 0.94. Таким образом, при переходе к более высокому уровню агрегирования гибридная модель практически всегда исправляет ошибки каждой из одиночных конфигураций и обеспечивает наиболее устойчивое поведение.

Во втором эксперименте оценивалась точность восстановления групп научных специальностей. Для каждой статьи формировался вектор  $S(d, s)$  по всем паспортам, после чего предсказанная группа определялась по паспорту с максимальным значением  $S(d, s)$ . Эталонная группа задавалась по заявленной специализации журнала. Здесь анализировались метрики top 1 и top 3 (табл. 7).

**Таблица 7.** Результаты оценки научных статей по группе научных специальностей

Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.9	0.94
ICAN	0.87	0.97
Гибридный	0.91	0.96

На уровне групп специальностей лексическая модель TF-IDF достигает точности top 1, равной 0.90, и точности top 3, равной 0.94. Семантическая модель ICAN дает немного меньшую точность top 1, равную 0.87, но более высокую точность top 3, равную 0.97. Это означает, что ICAN несколько чаще ошибается в выборе единственного наиболее

близкого паспорта, но почти всегда включает правильную группу в число трех наиболее вероятных.

Гибридная модель сохраняет наилучшее значение top 1, равное 0.91, и при этом дает высокую точность top 3, равную 0.96. Она не превосходит ICAN по top 3, однако обеспечивает более сбалансированное соотношение между точностью первого выбора и полнотой тройки ближайших групп. В контексте задач рекомендационного ранжирования по шифрам такая конфигурация является наиболее практичной, т.к. позволяет одновременно надежно предлагать основной код и формировать содержательно релевантный список альтернативных специальностей.

В совокупности результаты на статьях из журналов Перечня ВАК подтверждают выводы, сделанные по авторефератам. Лексическая модель лучше работает в областях с жестко закрепленной номенклатурой, семантическая модель особенно полезна в гуманитарных и близких к ним доменах, гибридная конфигурация дает наиболее устойчивое качество на всех уровнях агрегирования и обеспечивает интерпретируемые вероятностные профили по группам научных специальностей.

### 5.3. Сравнение графовой семантико-онтологической модели с большими языковыми моделями

Для оценки предложенной модели проведено сравнение с рядом крупных языковых моделей, примененных в режиме классификации без дообучения. Во всех случаях ставилась одна и та же задача восстановить шифр специальности или ближайший паспорт по тексту документа. На корпусах авторефератов и научных статей рассчитывались точность top 1 и точность top 3 (табл. 8).

По авторефератам гибридная графовая семантико-онтологическая модель дает точность top 1, равную 0.69, и точность top 3, равную 0.90. Лексическая TF-IDF-модель и семантическая ICAN уступают ей по обоим метрикам (для TF-IDF – 0.58 и 0.74, для ICAN – 0.57 и 0.81). Среди больших языковых моделей наилучшие значения показывает конфигурация ChatGPT 5.2 Thinking, у которой точность top 1 достигает 0.79, а точность top 3 – 0.84. Модель ChatGPT 4o<sup>31</sup> работает на уровне 0.71 и 0.73, DeepSeek<sup>32</sup> – на уровне 0.61 и 0.70, LLaMA<sup>33</sup> – на уровне 0.57 и 0.63, Алиса AI (YandexGPT)<sup>34</sup> заметно

<sup>31</sup> <https://openai.com/ru-RU/index/hello-gpt-4o/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

<sup>32</sup> <https://www.deepseek.com/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026.

<sup>33</sup> <https://www.llama.com/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026.

<sup>34</sup> <https://alice.yandex.ru/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

уступает всем вариантам и дает 0.46 и 0.52. Таким образом, по авторефератам крупная языковая модель ChatGPT 5.2 Thinking<sup>35</sup> превосходит гибридную схему по точности первого выбора, однако графовая семантико-онтологическая модель обеспечивает более высокую полноту по тройке ближайших специальностей и формирует размытый, но содержательно устойчивый профиль близостей по паспортам.

По научным статьям из журналов Перечня ВАК картина иная. Гибридная модель достигает точности top 1, равной 0.91, и точности top 3, равной 0.93. Лексическая TF-IDF модель дает точность 0.85 и 0.86, ICAN – 0.81 и 0.84. Среди больших языковых моделей ChatGPT 4o показывает точность 0.80 и 0.82, ChatGPT 5.2 Thinking – 0.82 и 0.97, DeepSeek – 0.79 и 0.84, LLaMA – 0.62 и 0.67, Алиса AI – 0.56 и 0.69. По метрике top 1 гибридная модель опережает все языковые модели с отрывом от девяти до пятнадцати процентных пунктов. По метрике top 3 лучший результат показывает ChatGPT 5.2 Thinking (0.97), гибридная модель дает немного меньшую величину, равную 0.93, но остается заметно выше остальных конфигураций. Это означает, что при классификации статей предложенная графовая семантико-онтологическая схема лучше фиксирует основной паспорт, в то время как крупные языковые модели чаще включают правильный шифр в широкий набор ближайших кандидатов.

Различия в поведении хорошо согласуются с природой сравниваемых подходов. Графовая семантико-онтологическая модель жестко привязана к текстам паспортов специальностей, использует их как онтологическое основание и факторизует решения на интерпретируемые компоненты TF-IDF и ICAN.

Это дает эффект, особенно заметный на статьях из журналов Перечня ВАК, где формулировки ближе

к нормативному языку паспортов. Крупные языковые модели опираются на обобщенные представления о научных дисциплинах и часто учитывают контекст, который не отражен в текстах паспортов, поэтому на авторефератах, в которых присутствуют развернутые обзоры, ссылки на смежные области и менее формализованное изложение, лучшие конфигурации ChatGPT демонстрируют более высокую точность первого выбора, однако теряют часть интерпретируемости и управляемости.

Сравнение показывает, что предложенная графовая семантико-онтологическая модель сопоставима с современными языковыми моделями по качеству классификации и превосходит их по ряду метрик в сценариях, где важна строгая согласованность с текстами паспортов, при этом остается существенно дешевле по вычислительным затратам и прозрачнее по структуре принимаемых решений.

Крупные языковые модели целесообразно рассматривать как дополнительный инструмент, который дополняет, а не заменяет онтологически ориентированную схему, особенно в задачах экспертной поддержки, где требуется одновременно количественный скор и явная привязка результата к нормативным описаниям научных специальностей.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе графовая семантико-онтологическая модель анализа научных текстов основана на паспортах научных специальностей ВАК, которые используются как текстовые описания предметных областей и одновременно как источник онтологического признакового пространства. На основе текстов паспортов формируется единый словарь

**Таблица 8.** Результаты сравнения графовой семантико-онтологической модели с большими языковыми моделями

Авторефераты			Статьи		
Метод	Точность по top 1	Точность по top 3	Метод	Точность по top 1	Точность по top 3
TF-IDF	0.58	0.74	TF-IDF	0.85	0.86
ICAN	0.57	0.81	ICAN	0.81	0.84
Гибридный	0.69	0.9	Гибридный	0.91	0.93
ChatGPT 4o	0.71	0.73	ChatGPT 4o	0.8	0.82
ChatGPT 5.2 Thinking	0.79	0.84	ChatGPT 5.2 Thinking	0.82	0.97
Алиса AI (YandexGPT)	0.46	0.52	Алиса AI (YandexGPT)	0.56	0.69
LLaMA	0.57	0.63	LLaMA	0.62	0.67
DeepSeek	0.61	0.7	DeepSeek	0.79	0.84

<sup>35</sup> <https://openai.com/ru-RU/index/introducing-gpt-5-2/>. Дата обращения 04.04.2026. / Accessed April 04, 2026. (In Russ.).

лемм и устойчивых словосочетаний, затем в этом базисе описываются сами паспорта, авторефераты диссертаций и научные статьи.

Значение сходства документа с шифром научной специальности интерпретируется через согласованность содержания текста с нормативным описанием области.

В то же время семантико-онтологическое пространство имеет два согласованных слоя. Лексический слой строится на основе векторов TF-IDF, которые фиксируют использование терминов и терминологических сочетаний, отобранных по корпусу чанков паспортов. Семантический слой основан на модели ICAN и описывает текст через граф совместной встречаемости лемм и степени его вершин. Это позволяет учитывать перефразирование, синонимию, использование аббревиатур и термины, разнесенные по тексту, при сохранении привязки к одному и тому же онтологическому базису.

Гибридная метрика, основанная на лексическом и семантическом подходах, объединяет локальные и глобальные метрики в каждом из слоев.

Экспериментальные результаты на корпусах авторефератов показывают, что гибридная модель по точности систематически превосходит отдельные лексические и семантические подходы. Лексическая модель на основе TF-IDF дает высокую точность там, где терминология стандартизована и хорошо совпадает с формулировками паспортов, а семантическая модель особенно полезна в областях с более свободным научным стилем, активным использованием сокращений и вариативных описаний предмета исследования.

Агрегированные показатели по укрупненным областям знаний подтверждают наблюдаемую картину. Для социально-гуманитарных направлений вклад семантического слоя оказывается критичным для повышения качества ранжирования, поскольку тематические границы часто выражаются через сложные формулировки и контекстуальные маркеры. Для значительной части технических и естественно-научных специальностей лексический слой уже обеспечивает высокий базовый уровень качества, а семантический слой уточняет профиль документа в случае близких шифров и пограничных тематик.

Таким образом модель демонстрирует содержательно объяснимое поведение, которое согласуется с особенностями терминологической структуры разных научных областей.

Дальнейшее развитие модели может быть с несколькими направлениями. Одно из них заключается в формировании лексем и терминологических сочетаний паспортов с внешними онтологиями, базами знаний и специализированными терминологическими ресурсами, что позволит перейти от текстового

онтологического основания к более формализованной мультидоменной онтологии. Кроме того, возможно направление с добавлением контекстных эмбедингов и нейросетевых моделей в виде дополнительного слоя над существующими TF-IDF и ICAN при сохранении интерпретируемости через разложение по онтологическому базису.

Отдельную задачу представляет оптимизация параметров на валидационных выборках и анализ их зависимости от области знания и типа документа.

В заключение можно отметить, что графовая семантико-онтологическая модель, основанная на текстах паспортов специальностей ВАК, демонстрирует возможность превращения нормативного корпуса в рабочее онтологическое пространство для количественного анализа научных текстов. Полученные результаты для авторефератов и научных статей показывают, что такой подход может служить основой как для автоматизированной поддержки принятия экспертных решений, так и для мониторинга структуры научного знания в рамках заданной нормативной онтологии.

#### **Вклад авторов**

**Н.С. Курдюков** – концепция исследования, методология, формальный анализ, написание первоначального варианта рукописи. Разработал основную концепцию информационного морфизма в рамках семантико-онтологических и графовых структур, разработал методологический подход, реализовал основные алгоритмы, провел формальные эксперименты и анализ, а также подготовил первоначальный проект рукописи.

**В.Н. Калинин** – методология, разработка программного обеспечения, обработка данных, проверка результатов, написание первоначального варианта рукописи. Внес вклад в совершенствование методологической базы, разработал вычислительные инструменты, провел валидацию разработанных моделей и инструментов на экспериментальных наборах данных, курировал и структурировал текстовые материалы, использованные в исследовании, и подготовил первоначальный проект рукописи.

**С.А. Кудж** – методологический надзор; проверка результатов; переработка и редактирование рукописи. Осуществлял экспертный надзор за методологической базой, обеспечивал научную обоснованность и строгость предложенных моделей и аналитических процедур, а также участвовал в критическом рассмотрении и доработке рукописи.

**Д.О. Жуков** – авторский надзор; методологический надзор; проверка достоверности; переработка и редактирование рукописи. Осуществлял общее научное руководство исследованием, следил за развитием и последовательностью методологического подхода, подтверждал результаты исследования на концептуальном и теоретическом уровнях, а также критически рассматривал и одобрял окончательный вариант рукописи.

**Authors' contributions**

**N.S. Kurdyukov** – conceptualization; methodology; formal analysis; writing the original draft. He has developed the core concept of information morphism within semantic-ontological and graph-based frameworks, designed the methodological approach, implemented the primary algorithms, conducted formal experiments and analysis, and prepared the initial manuscript draft.

**V.N. Kalinin** – methodology; validation; data curation; software; writing the original draft. He has contributed to the refinement of the methodological framework, developed computational tools, performed validation of the developed models and tools on experimental datasets, curated and structured the textual corpora used in the study, and prepared initial manuscript draft.

**S.A. Kudzh** – methodology supervision; validation; writing the review and editing. He has provided expert supervision of the methodological framework, ensured the scientific validity and rigor of the proposed models and analytical procedures, and contributed to critical review and refinement of the manuscript.

**D.O. Zhukov** – supervision; methodology oversight; validation; writing the review and editing. He has led the overall scientific supervision of the study, oversaw the development and consistency of the methodological approach, validated the research outcomes at a conceptual and theoretical level, and critically reviewed and approved the final manuscript.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES**

1. Altnel B., Ganiz M.C. Semantic text classification: A survey of past and recent advances. *Inf. Process. Management*. 2018;54(6):1129–1153. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2018.08.001>
2. Sikelis K., Tsekouras G.E., Kotis K.I. Ontology-based Feature Selection: A Survey. *arXiv preprint arXiv:2104.07720 [cs.AI]*, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.07720>
3. Ehring D., Ferraz-Doughty P., Luttmer J., Nagarajah A. A first step towards automatic identification and provision of user-specific knowledge: A verification of the feasibility of automatic text classification using the example of standards. *Procedia CIRP*. 2023;119:1103–1108. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.183>
4. Layer M., Luttmer J., Nagarajah A., Stelzer R. Structured representation of pre-defined information backflow in standards and directives. *Standards*. 2024;4:262–285. <https://doi.org/10.3390/standards4040013>
5. Stănescu G., Oprea S.-V. Recent trends and insights in semantic web and ontology-driven knowledge representation across disciplines using topic modeling. *Electronics*. 2025;14(7):1313. <https://doi.org/10.3390/electronics14071313>
6. Touza I., Balama G., Lazarre W., Guidedi K., Kolyang. Ontology-driven text classification and data mining: Beyond keywords toward semantic intelligence. *Revue d'Intelligence Artificielle*. 2025;39(3):25–35. <https://doi.org/10.18280/ria.390301>
7. Pertsas V., Constantopoulos P. Ontology-driven extraction of contextualized information from research publications. In: *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (IC3K 2023)*. V. 2. KEOD. 2023. P. 108–118. <https://doi.org/10.5220/0012254100003598>
8. Mohd M., Javeed S., Nowsheena, Wani M.A., Khanday H.A. Sentiment analysis using lexico-semantic features. *J. Inform. Sci.* 2024;50(6):1449–1470. <https://doi.org/10.1177/01655515221124016>
9. Demidova L., Zhukov D., Andrianova E., Kalinin V. Model of lexico-semantic bonds between texts for creating their similarity metrics and developing statistical clustering algorithm. *Algorithms*. 2023;16:198. <https://doi.org/10.3390/a16040198>
10. Saeeda L., Med M., Ledvinka M., Blaško M., Křemen P. Entity linking and lexico-semantic patterns for ontology learning. In: Harth A., et al. *The Semantic Web*. Series: Lecture Notes in Computer Science. 2020. V. 12123. P. 138–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49461-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49461-2_9)
11. Yelmen I., Gunes A., Zontul M. Multi-class document classification using lexical ontology-based deep learning. *Appl. Sci.* 2023;13(10):6139. <https://doi.org/10.3390/app13106139>
12. Bugeño M., de Melo G. Connecting the dots: What graph-based text representations work best for text classification using graph neural networks? In: *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2023*. 2023. P. 8943–8960. <https://doi.org/10.18653/v1/2023.findings-emnlp.600>
13. Varella Ehrenfried H., Venturi Date V.T., Todt E. Exploring graph representation strategies for text classification. *Connect. Sci.* 2023;35(1):2289832. <https://doi.org/10.1080/09540091.2023.2289832>
14. Sánchez-Antonio C., Valdez-Rodríguez J.E., Calvo H. TTG-Text: A graph-based text representation framework enhanced by typical testors for improved classification. *Mathematics*. 2024;12:3576. <https://doi.org/10.3390/math12223576>
15. Onan A. Hierarchical graph-based text classification framework with contextual node embedding and BERT-based dynamic fusion. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2023;35(7):101610. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101610>
16. Цветков В.Я., Курдюков Н.С. Информационное онтологическое моделирование. *Russian Technological Journal*. 2025;13(2):18–26. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-18-26>  
[Tsvetkov V.Ya., Kurdyukov N.S. Informational ontological modeling. *Russian Technological Journal*. 2025;13(2):18–26. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-18-26>]
17. Nabhan A.R., Shaalan K. A graph-based approach to text genre analysis. *Computación y Sistemas*. 2016;20(3):527–539. <https://doi.org/10.13053/CyS-20-3-2471>

18. Ali I., Melton A. Semantic-based text document clustering using cognitive semantic learning and graph theory. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Semantic Computing (ICSC 2018)*. 2018. P. 243–247. <https://doi.org/10.1109/ICSC.2018.00042>
19. Lemaire B., Denhière G. Incremental construction of an associative network from a corpus. In: *Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. 2004. V. 26. P. 825–830.

#### Об авторах

**Курдюков Никита Сергеевич**, аспирант, кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [nskurdyukov@gmail.com](mailto:nskurdyukov@gmail.com). SPIN-код РИНЦ 8535-1612, <https://orcid.org/0000-0001-6784-3369>

**Калинин Владимир Николаевич**, ассистент, кафедра телекоммуникаций, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [kalinin\\_v@mirea.ru](mailto:kalinin_v@mirea.ru). Scopus Author ID 57562579000, <https://orcid.org/0000-0003-1365-4639>

**Кудж Станислав Алексеевич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [kudzh@mirea.ru](mailto:kudzh@mirea.ru). Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, SPIN-код РИНЦ 8173-1572, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

**Жуков Дмитрий Олегович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры телекоммуникаций, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [zhukov\\_do@mirea.ru](mailto:zhukov_do@mirea.ru). Scopus Author ID 57189660218, SPIN-код РИНЦ 1798-8891, <https://orcid.org/0000-0002-1211-5214>

#### About the Authors

**Nikita S. Kurdyukov**, Postgraduate Student, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: [nskurdyukov@gmail.com](mailto:nskurdyukov@gmail.com). RSCI SPIN-code 8535-1612, <https://orcid.org/0000-0001-6784-3369>

**Vladimir N. Kalinin**, Assistant, Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: [kalinin\\_v@mirea.ru](mailto:kalinin_v@mirea.ru). Scopus Author ID: 57562579000, <https://orcid.org/0000-0003-1365-4639>

**Stanislav A. Kudzh**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: [kudzh@mirea.ru](mailto:kudzh@mirea.ru). Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, RSCI SPIN-code 8173-1572, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

**Dmitry O. Zhukov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: [zhukov\\_do@mirea.ru](mailto:zhukov_do@mirea.ru). Scopus Author ID 57189660218, RSCI SPIN-code 1798-8891, <https://orcid.org/0000-0002-1211-5214>

Роботизированные комплексы и системы.  
Технологии дистанционного зондирования неразрушающего контроля  
Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 621.396.6  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-43-59>  
EDN EKRNQE



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Локализация дефектов конструкций печатных узлов методом вибродиагностики

С.У. Увайсов, А.В. Долматов<sup>®</sup>, Т.Х. Во,  
Д.Х. Нгуен, С.Х. Фам, Р.М. Увайсов

МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, 119454 Россия  
<sup>®</sup> Автор для переписки, e-mail: [dolmatov@mirea.ru](mailto:dolmatov@mirea.ru)

• Поступила: 14.05.2025 • Доработана: 30.12.2025 • Принята к опубликованию: 24.03.2026

### Резюме

**Цели.** В процессе производства и эксплуатации печатных узлов (ПУ), устанавливаемых в блоках радиоэлектронных средств (РЭС), могут возникать конструктивные дефекты, обусловленные технологическими погрешностями или воздействием внешних эксплуатационных факторов. Наибольшую опасность представляют латентные дефекты, которые невозможно выявить после изготовления ПУ, но которые способны привести к отказам в процессе эксплуатации. Современные ПУ характеризуются высокой плотностью компоновки электрорадиоэлементов и, как правило, размещаются в герметичных блоках, что существенно затрудняет применение традиционных методов контроля. Целью работы является повышение достоверности выявления и классификации латентных дефектов конструкций ПУ в герметичных блоках по механическим амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) с использованием глубокой нейронной сети.

**Методы.** Предложен метод вибродиагностики, основанный на численном моделировании механических процессов, экспериментальных вибрационных испытаниях и применении искусственной нейронной сети для классификации технического состояния. Диагностирование осуществляется путем анализа механических АЧХ, полученных с помощью акселерометра, установленного на корпусе блока, и их сравнения с базой расчетных АЧХ, сформированной для различных технических состояний ПУ.

**Результаты.** Для экспериментальной проверки метода изготовлен макет ПУ внутри блока, в конструкцию которого вносились различные дефекты, и сформирована база расчетных механических АЧХ для исправного и неисправных состояний. После получения экспериментальных АЧХ выполнено их сравнение с расчетными данными, и с использованием глубокой нейронной сети определены виды внесенных дефектов.

**Выводы.** Разработанный метод вибродиагностики ПУ позволяет с высокой точностью выявлять и классифицировать латентные дефекты, возникающие в РЭС в процессе производства и эксплуатации, и повышает достоверность оценки технического состояния ПУ.

**Ключевые слова:** диагностирование, вибрационные воздействия, радиоэлектронное средство, печатный узел, DNN

**Для цитирования:** Увайсов С.У., Долматов А.В., Во Т.Х., Нгуен Д.Х., Фам С.Х., Увайсов Р.М. Локализация дефектов конструкций печатных узлов методом вибродиагностики. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):43–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-43-59>, <https://www.elibrary.ru/EKRNQE>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Localization of structural defects of printed circuit board assembly by vibration diagnostics

Saygid U. Uvaysov, Aleksey V. Dolmatov<sup>@</sup>, Vo The Hai, Nguyen Duc Hai, Pham Xuan Hanh, Ruslan M. Uvaysov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>@</sup> Corresponding author, e-mail: [dolmatov@mirea.ru](mailto:dolmatov@mirea.ru)

• Submitted: 14.05.2025 • Revised: 30.12.2025 • Accepted: 24.03.2026

### Abstract

**Objectives.** Structural defects may arise during the production and operation of printed circuit board assemblies (PCBAs) installed in radio-electronic assemblies (REAs) due to manufacturing imperfections or the influence of external factors. Of particular concern are latent defects that cannot be detected after the PCBA has been manufactured and which may lead to failures during operation. The typical installation in sealed enclosures of modern PCBAs, which are characterized by a high density of electronic components, significantly complicates the use of conventional inspection and diagnostic methods. This study aims to improve the reliability of detecting and classifying latent defects in PCBAs in sealed blocks based on their mechanical amplitude-frequency characteristics (AFCs) using a deep neural network.

**Methods.** The paper proposes a vibration diagnostics method based on the numerical modeling of mechanical processes, experimental vibration testing, and the application of an artificial neural network for technical condition classification. Diagnostics involves analyzing the obtained mechanical AFCs using an accelerometer mounted on the enclosure and comparing them with a database of calculated AFCs generated for various technical states of the PCBA.

**Results.** To verify the proposed method experimentally, a PCBA mock-up was fabricated and installed inside an enclosure with various structural defects introduced into its design. A database of calculated mechanical AFCs was formed for both healthy and faulty states. After obtaining experimental AFCs, they were compared with the calculated data, and the introduced defects were identified using a deep neural network.

**Conclusions.** The developed vibration diagnostics method enables the highly accurate detection and classification of latent defects arising in radio-electronic equipment during production and operation. This improves the reliability of technical condition assessment of PCBAs.

**Keywords:** diagnostics, vibrational loading, radio-electronic equipment, PCBA, DNN

**For citation:** Uvaysov S.U., Dolmatov A.V., Vo T.H., Nguyen D.H., Pham X.H., Uvaysov R.M. Localization of structural defects of printed circuit board assembly by vibration diagnostics. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):43–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-43-59>, <https://www.elibrary.ru/EKRNQE>

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

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Система диагностирования включает в себя объект контроля, средства и методы определения технического состояния. Под средствами понимается комплекс аппаратных и программных средств для измерения и анализа диагностической информации от объекта контроля на всех этапах его жизненного цикла. В зависимости от взаимодействия между объектом и средством диагностирования различают функциональные и испытательные методы. Функциональные методы применяются для диагностирования объекта в его рабочем режиме, и информацию о техническом состоянии объекта получают с помощью датчиков. В этом случае средства диагностирования не оказывают влияние на объект. При использовании испытательных методов на вход объекта подается сигнал или группа сигналов для возбуждения процессов, информирующих о его техническом состоянии [1].

Метод диагностирования технического состояния конструкций радиоэлектронных средств (РЭС), выполненных в виде блоков с печатными узлами (ПУ), на основе анализа механических амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) при вибрационных воздействиях находит широкое использование в технической диагностике [2–4]. Дефекты в конструкции устройства приводят к изменению значений резонансных частот по сравнению со значениями резонансных частот в исправном состоянии [5]. На основе анализа этих характеристик можно разработать метод диагностирования конструкций ПУ для выявления и классификации дефектов устройств в процессе производства и эксплуатации, не нарушая их структуру.

В рамках данной работы авторами рассматриваются вопросы разработки метода неразрушающей диагностики, в т.ч. построение моделей и алгоритмов процесса автоматического обнаружения и выявления типов латентных дефектов в конструкции ПУ, влияющих на механические АЧХ конструкции блока. В исследовании не учитываются отказы, вызванные отклонениями электрических параметров электрорадиоэлементов (ЭРЭ). С целью повышения достоверности разработанного метода применяется процесс механического моделирования объекта исследования с учетом разбросов технологических параметров конструкции.

### 1. МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПУ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Большинство дефектов конструкции ПУ, возникающих в процессе производства и эксплуатации, вызваны воздействиями механического характера (удары, гармонические вибрации, акустические

шумы). Наиболее распространенными из них являются следующие: отсутствие или деформация ЭРЭ, образование трещины в конструкции, ослабление крепежа ПУ, неоднородность структуры материала печатной платы и т.д. Однако эти дефекты, которые проявляются в процессе эксплуатации оборудования, невозможно выявлять непосредственно при использовании устройства по назначению существующими методами [6], поскольку их применение, как правило, требует выключения аппаратуры и нарушения целостности конструкции блока, в котором установлен ПУ, что нежелательно для герметичных блоков.

Указанные дефекты могут возникать на этапе производства блоков, на котором определяется исходное качество оборудования, или в процессе эксплуатации. Для обнаружения и определения типа латентных дефектов предлагается использовать метод диагностирования, основанный на сравнении экспериментально полученной АЧХ на внешней поверхности блоков в определенной контрольной точке с набором расчетных АЧХ в этой же контрольной точке для различных видов технического состояния конструкции ПУ [7]. По результатам сравнения АЧХ делается вывод о техническом состоянии устройства. Использование данного метода позволит сократить трудозатраты, продолжительность диагностирования и снизить экономические расходы на контроль и диагностику конструкции ПУ [8, 9].

С помощью современных средств моделирования и распознавания АЧХ можно с высокой степенью достоверности выявить связь между типом дефекта и диагностическим признаком. Для сбора диагностической информации и последующего ее анализа необходимо провести ряд мероприятий:

- преобразование физических явлений в диагностические сигналы (путем измерения значения АЧХ с помощью акселерометра);
- сбор характеристик этого сигнала и их анализ (путем моделирования различных технических состояний);
- сравнение результатов анализа со значениями, определенными в технической документации;
- использование алгоритма искусственного интеллекта для принятия решений о техническом состоянии.

Структурная схема разработанного метода приведена на рис. 1.

Для диагностирования технического состояния конструкции ПУ необходимо на основании конструкторской документации (блок 1) разработать модель устройства, позволяющую проводить анализ механических процессов (блок 2). При этом модель конструкции блока с ПУ должна достоверно описывать геометрическую структуру, физико-механические

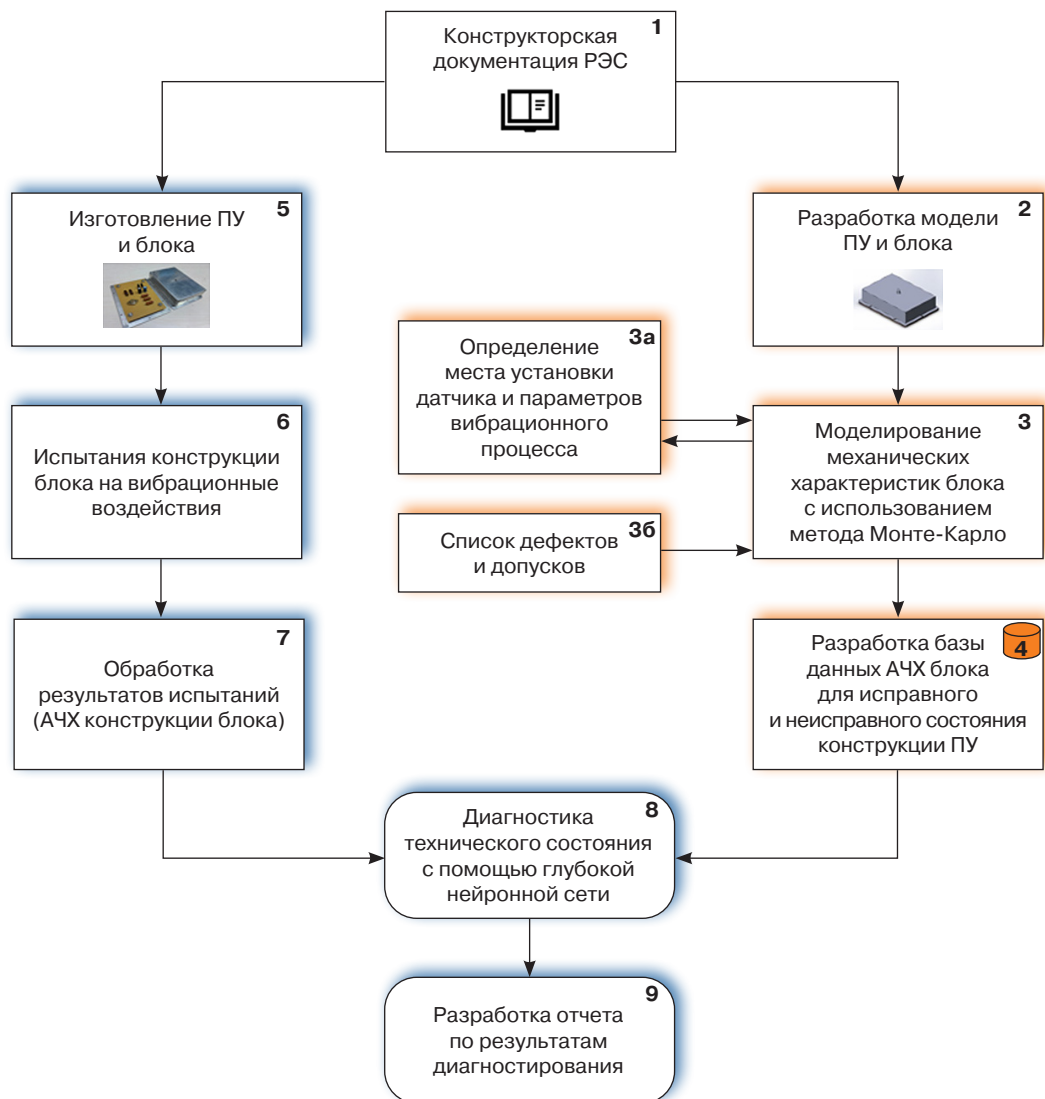


Рис. 1. Метод вибродиагностики ПУ

параметры материалов, механические характеристики каждого ЭРЭ моделируемого ПУ, т.е. модель должна быть адекватной и соответствовать данным, указанным в конструкторской документации на изделие.

Для моделирования механических процессов в блоке может использоваться любая система автоматизированного проектирования, позволяющая получать АЧХ в заданных точках устройства при вибрационных механических воздействиях. В данном методе используется программное средство *Solidworks*<sup>1</sup>.

Полученная в результате расчета механических процессов АЧХ блока зависит от выбора контрольной точки для расчета данной АЧХ, параметров воздействующей механической вибрации (амплитуда, частота гармонической вибрации) (блок 3а).

Положение контрольной точки для получения АЧХ выбирается исходя из наибольшей амплитуды колебаний (центральное положение на крышке корпуса блока). Амплитуда гармонических колебаний при диагностировании должна быть не более значения амплитуды колебаний  $A_{\max \text{ теор}}$ , при которой возникают механические разрушения конструкции блока и ПУ, и в то же время не менее значения  $A_{\min \text{ прак}}$ , которое может быть зафиксировано датчиком. Следовательно, минимальное  $A_{\min \text{ эффект}}$  и максимальное  $A_{\max \text{ эффект}}$  значения амплитуды гармонических колебаний в контрольной точке должны удовлетворять условию<sup>2</sup>:

$$[A_{\min \text{ эффект}}; A_{\max \text{ эффект}}] \in [A_{\min \text{ прак}}; A_{\max \text{ теор}}].$$

<sup>2</sup> Лью Нгок Тиен. *Акустико-эмиссионный метод контроля многослойных печатных плат радиоэлектронных устройств*: дис. ... к.т.н., М.: 2024, 169 с. [Lu Ngoc Tien. *Acoustic Emission Method of Control of Multilayer Printed Circuit Boards of Radio-Electronic Devices*: Cand. Sci. Thesis (Eng.). Moscow: 2024.]

<sup>1</sup> <https://www.solidworks.com/ru>. Дата обращения 23.03.2026. / Accessed March 23, 2026. (In Russ.).

Чтобы получить информацию о механических характеристиках конструкции блока для различных технических состояний ПУ необходимо провести моделирование механических процессов в исправном состоянии ПУ и при наличии различных дефектов. Перечень возможных дефектов составляется в блоке 3б. Стоит отметить, что чем больше возможных дефектов будет учтено в процессе моделирования, тем точнее будут результаты процесса диагностирования технического состояния устройства.

Физико-механические параметры  $\gamma_i$  реальных конструкций ПУ, как правило, имеют некоторый разброс, обычно в пределах 3–10%. Для того, чтобы учесть это, применяется статистическое моделирование методом Монте-Карло (блок 3) [10]. Результатом анализа является совокупность АЧХ, рассчитанных для случайных значений физико-механических параметров конструкции ПУ в пределах допустимых диапазонов. При этом распределение значений параметров описывается нормальной функцией распределения:

$$f(\gamma_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\gamma_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $f(\gamma_i)$  – плотность вероятности распределения физико-механического параметра  $\gamma_i$ ;  $\mu$  – математическое ожидание (номинальное значение) параметра,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение параметра.

В  $k$ -й реализации метода Монте-Карло  $i$ -й физико-механический параметр определяется по формуле:

$$\gamma_i = \gamma_i^{\text{НОМ}}(1 + \xi_k \delta_i),$$

где  $\gamma_i$  – текущее значение  $i$ -го параметра на  $k$ -й реализации метода Монте-Карло,  $\gamma_i^{\text{НОМ}}$  – номинальное значение  $i$ -го физико-механического параметра,  $\delta_i$  – относительный допуск на  $i$ -й физико-механический параметр,  $\xi_k \sim N(-1, 1)$  – случайная величина со стандартным нормальным распределением [11, 12].

Разработка базы данных расчетных АЧХ (блок 4) для различных технических состояний конструкции ПУ осуществляется с помощью программы *Microsoft Excel*. База данных используется для сравнения с АЧХ, полученными в результате натурных испытаний, и принятия окончательного решения о техническом состоянии ПУ.

Для определения технического состояния ПУ в процессе производства или эксплуатации у изготовленных в соответствии с конструкторской документацией устройств (блок 5) проводится экспериментальное снятие механических АЧХ с использованием вибростенда (блок 6). При испытаниях датчик, с помощью которого получают данные об АЧХ, должен быть установлен в той же контрольной точке,

в которой были получены расчетные АЧХ в процессе моделирования. В настоящем исследовании в качестве датчика вибрации используется модель VP-32 (IMV Corporation, Япония), представляющая собой пьезоэлектрический акселерометр с выходом в виде электрического заряда. Данный датчик обладает высокой чувствительностью, широким диапазоном рабочих частот (до 10 кГц) и высокой устойчивостью к ударным нагрузкам, что делает его подходящим для анализа вибраций в условиях интенсивных механических воздействий. Его основным элементом является кварцевый кристалл, который преобразует виброускорение в пропорциональное электрическое напряжение. Чувствительность датчика выражается в пКл/г, где пКл – пикокулон, г – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>. Диапазон измерений располагается в линейной области частотной характеристики датчика [13].

Экспериментально полученная механическая АЧХ конструкции блока преобразуется (блок 7) в таблицу данных, содержащую две составляющие: значения амплитуды и частоты, и затем сравнивается с механическими АЧХ, хранящимися в базе данных (блок 4), для обнаружения и определения вида дефектов с помощью искусственной нейронной сети (блок 8). При этом используется метод глубокой нейронной сети (deep neural network, DNN). По результатам сравнения экспериментальной и расчетных механических АЧХ формируется отчет о техническом состоянии ПУ (блок 9).

## 2. ПОЛУЧЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ АЧХ

Моделирование механических процессов в конструкции блока с ПУ при воздействии вибрационных механических нагрузок является важной частью описанного метода и во многом определяет точность результатов диагностирования. Моделирование проводится для различных видов технического состояния устройства. Чем больше будет рассмотрено различных видов технического состояния конструкции ПУ, тем точнее будет окончательный вывод по результатам диагностирования.

При диагностировании конструкции ПУ определяется перечень возможных латентных дефектов и проводится моделирование механических характеристик устройства (получение расчетной АЧХ в контрольной точке блока), соответствующих каждому из указанных в перечне дефектов. Затем снимается экспериментальная АЧХ на реальном образце устройства и выявляется возможный дефект путем сравнения экспериментальной АЧХ с расчетными АЧХ для каждого вида технического состояния. Результат сравнения будет свидетельствовать о том,

что ПУ находится в исправном состоянии или имеет неисправность<sup>3</sup>.

Для определения перечня выявляемых дефектов в конструкции ПУ разработан алгоритм, схема которого показана на рис. 2.

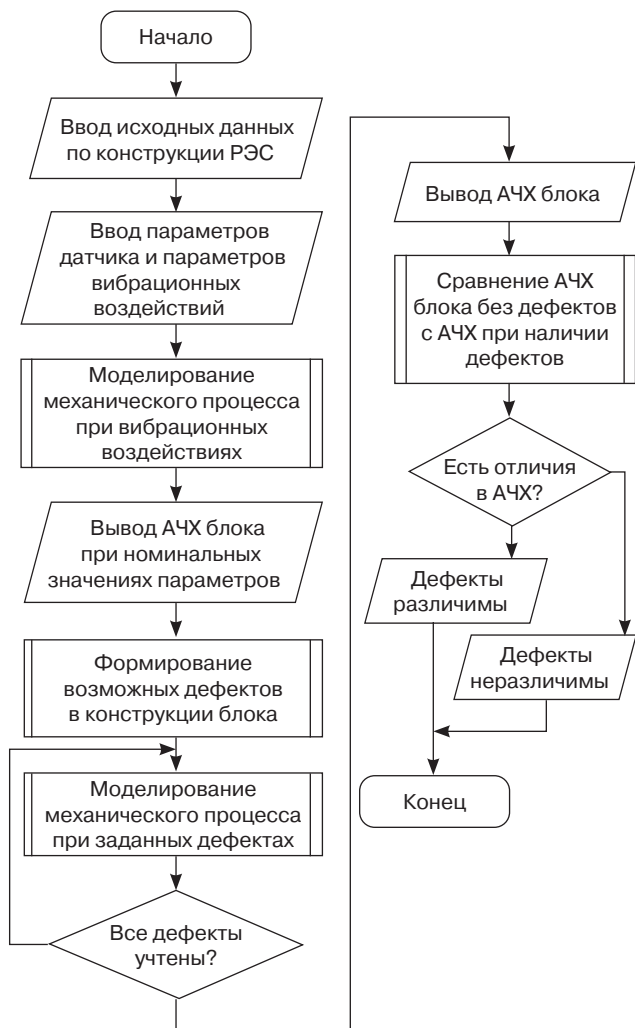


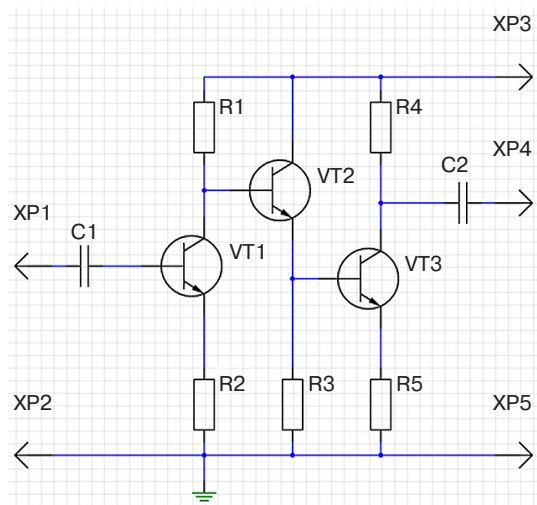
Рис. 2. Алгоритм определения перечня возможных дефектов

С помощью данного алгоритма можно определить возможность выявления того или иного дефекта в конструкции ПУ по анализу АЧХ и на основании этого принять решение о включении рассматриваемого дефекта в перечень выявляемых дефектов (блок 3б на рис. 1).

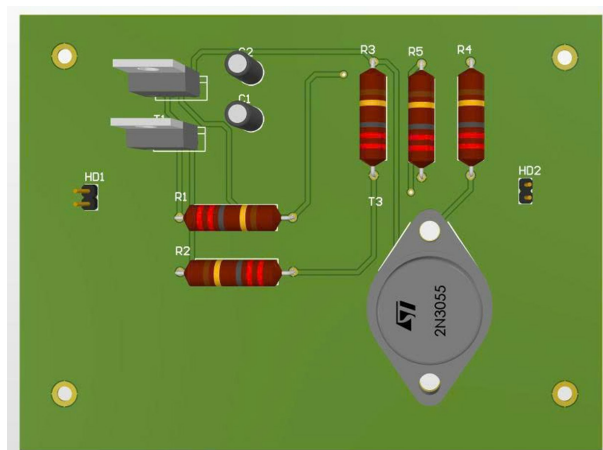
Расчет механических характеристик при вибрационных воздействиях проводится с помощью пакета анализа механических процессов *Solidworks Simulation*. Рассчитываются резонансные частоты конструкции блока при входном воздействии в виде гармонической вибрации в диапазоне частот от 0 до 2000 Гц.

<sup>3</sup> Malpass L. *SolidWorks 2009 API – Advanced Product Development*. 2009, 246 p.

В качестве объекта для проведения исследований взят усилитель мощности, электрическая схема и модель конструкции ПУ которого изображены на рис. 3. Модель конструкции исследуемого макета блока с ПУ показана на рис. 4. Исследуемый ПУ представляет собой макет, имитирующий распределение системы масс ЭРЭ на печатной плате и предназначен исключительно для проведения данного исследования путем вибромеханических испытаний конструкции данного устройства. При этом в модели не учитываются электрические параметры ЭРЭ, поскольку в данном исследовании проводится анализ не электрических характеристик устройства, а механических характеристик и динамического отклика конструкции.



(а)



(б)

Рис. 3. Электрическая схема (а) и модель конструкции ПУ (б) исследуемого объекта. Обозначения элементов схемы соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81<sup>4</sup>

<sup>4</sup> 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..)]

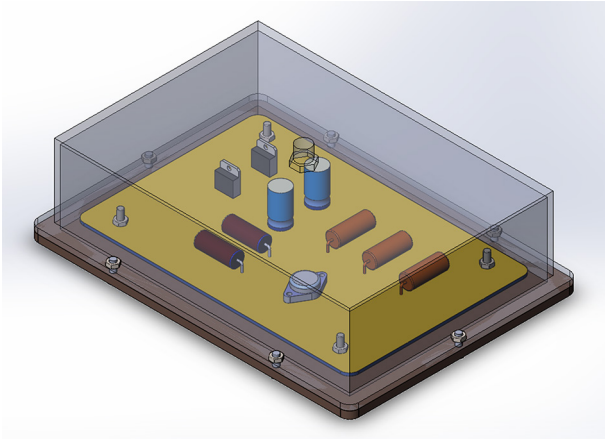


Рис. 4. Модель конструкции блока с ПУ

Полученная с помощью моделирования механическая АЧХ исследуемого макета в исправном состоянии (рис. 5) имеет резонансные частоты  $f_1 = 878.1$  Гц,  $f_2 = 1089.5$  Гц,  $f_3 = 1405.7$  Гц.

В случаях, когда исследуемый макет содержит один из дефектов, значение резонансных частот устройства изменяются соответствующим образом:

- Дефект А – отсутствие ЭРЭ (рис. 6):  
 $f_1 = 878.3$  Гц,  $f_2 = 1092.6$  Гц,  $f_3 = 1409.5$  Гц;
- Дефект Б – ослабление крепежа ПУ (рис. 7):  
 $f_1 = 878.2$  Гц,  $f_2 = 1090.6$  Гц,  $f_3 = 1428.8$  Гц;

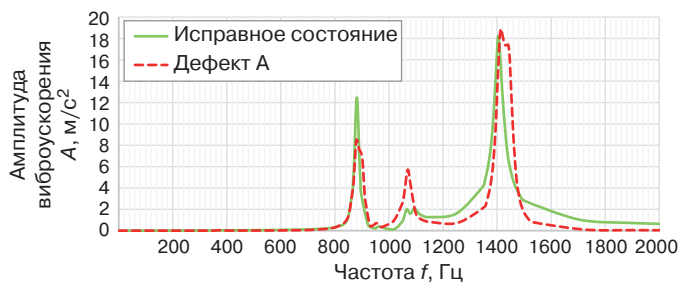


Рис. 6. АЧХ исследуемого макета с дефектом А

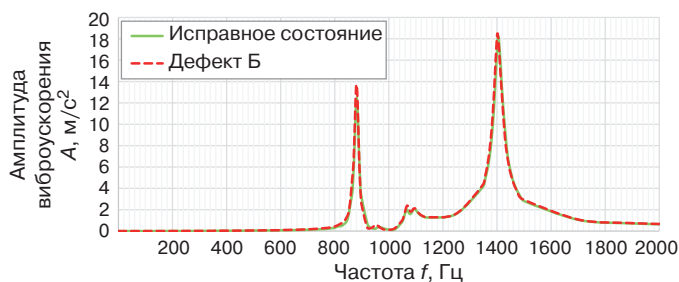


Рис. 7. АЧХ исследуемого макета с дефектом Б

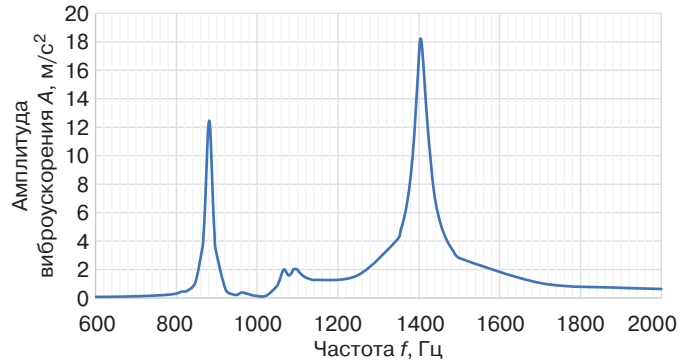
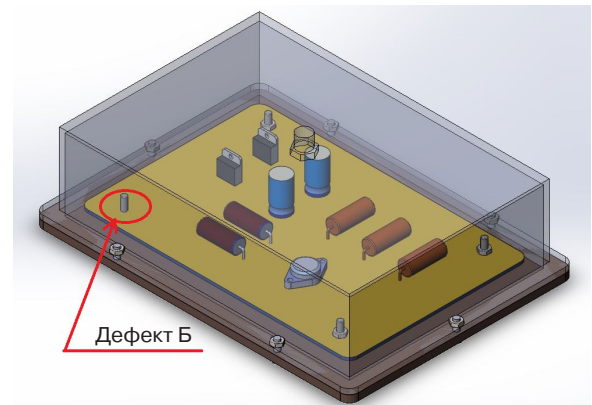
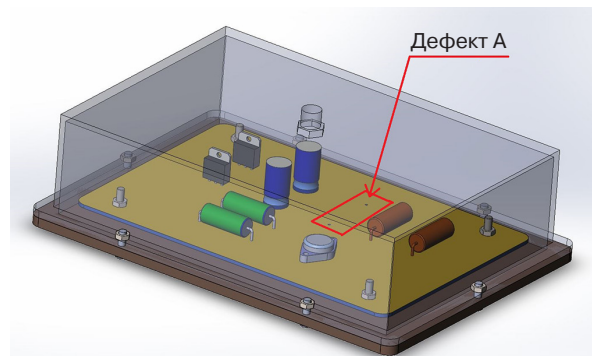


Рис. 5. АЧХ исследуемого макета в исправном состоянии

- Дефект В – деформация ЭРЭ (рис. 8):  
 $f_1 = 878.1$  Гц,  $f_2 = 1091.5$  Гц,  $f_3 = 1403.6$  Гц;
- Дефект Г – нарушения компоновки и размещения ЭРЭ на печатной плате (рис. 9):  
 $f_1 = 878.4$  Гц,  $f_2 = 1090.2$  Гц,  $f_3 = 1424.2$  Гц;
- Дефект Д – установка ЭРЭ, не соответствующего конструкторской документации (рис. 10):  
 $f_1 = 878.4$  Гц,  $f_2 = 1069.5$  Гц,  $f_3 = 1478.2$  Гц;
- Дефект Е – неоднородность структуры материала печатной платы (рис. 11):  
 $f_1 = 842.4$  Гц,  $f_2 = 878.4$  Гц,  $f_3 = 951.5$  Гц.



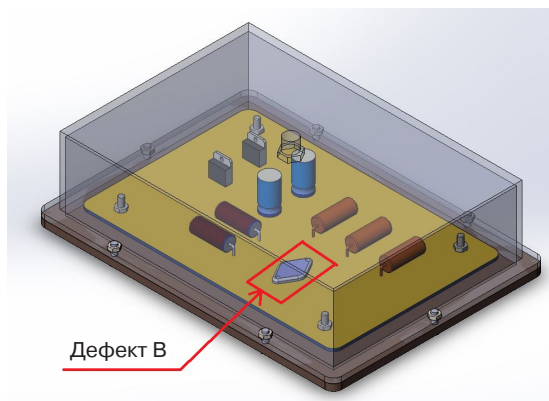
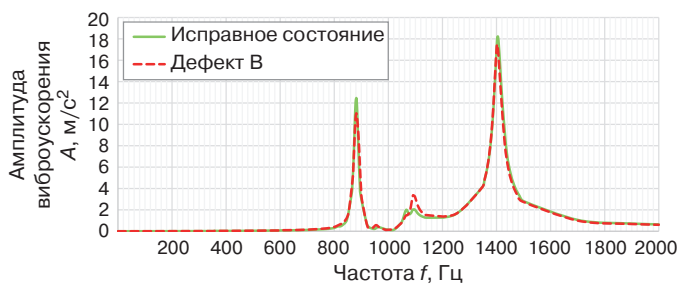


Рис. 8. АЧХ исследуемого макета с дефектом В

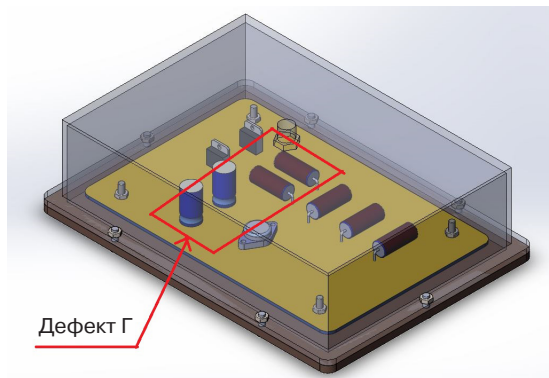
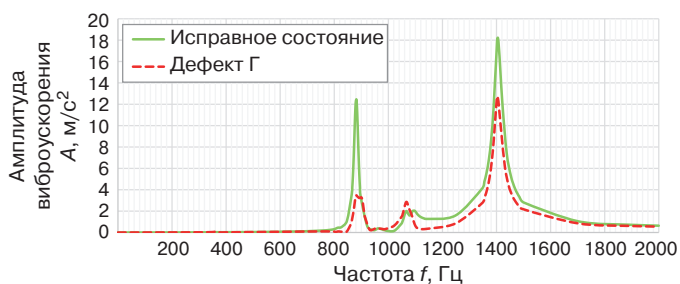


Рис. 9. АЧХ исследуемого макета с дефектом Г

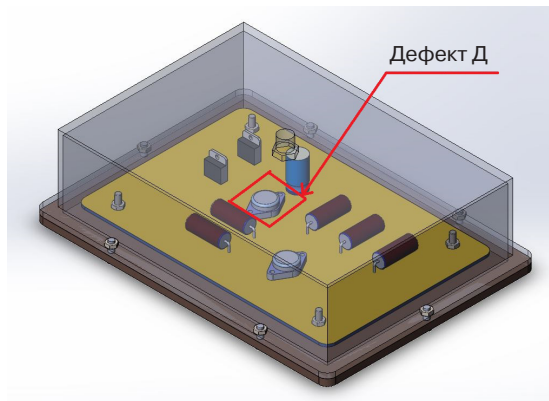
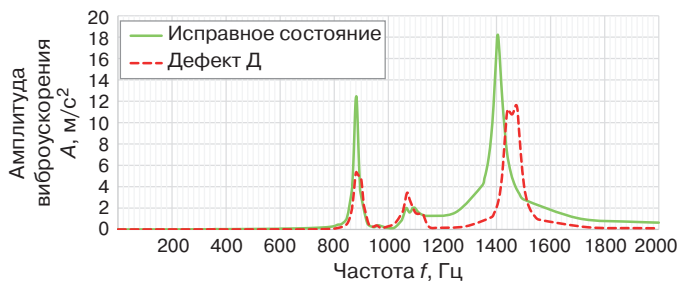


Рис. 10. АЧХ исследуемого макета с дефектом Д

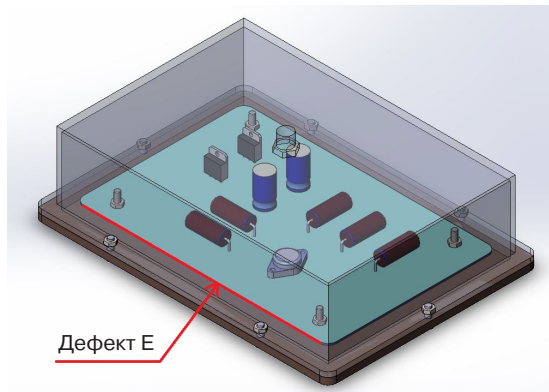
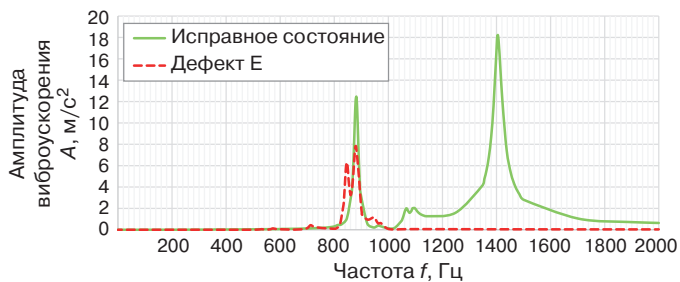


Рис. 11. АЧХ исследуемого макета с дефектом Е

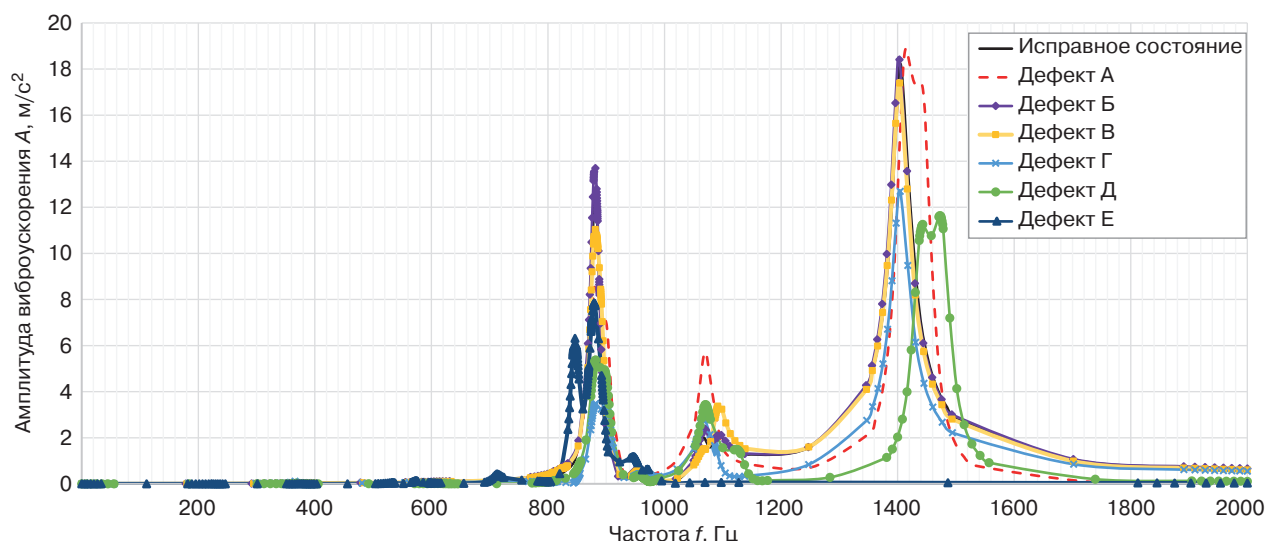


Рис. 12. Совокупность АЧХ исследуемого макета с различными дефектами

Таблица. Значения частоты и амплитуды виброускорения для различных технических состояний конструкции ПУ в процессе моделирования

Исправное состояние		Дефект А		Дефект Б		Дефект В		Дефект Г		Дефект Д		Дефект Е	
Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>	Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>	Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>	Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>	Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>	Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>	Частота, Гц	Амплитуда, м/с <sup>2</sup>
$1.59 \cdot 10^{-6}$	$3.68 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$1.02 \cdot 10^{-20}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$4.42 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$3.76 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$4.31 \cdot 10^{-19}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$7.53 \cdot 10^{-20}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$6.72 \cdot 10^{-20}$
9.5	$1.32 \cdot 10^{-5}$	8.1	$2.62 \cdot 10^{-7}$	7.8	$1.06 \cdot 10^{-5}$	7.9	$9.19 \cdot 10^{-6}$	8.0	$1.08 \cdot 10^{-5}$	8.0	$1.92 \cdot 10^{-6}$	4.9	$6.26 \cdot 10^{-7}$
19.1	$5.27 \cdot 10^{-5}$	16.5	$1.10 \cdot 10^{-6}$	15.9	$4.43 \cdot 10^{-5}$	16.1	$3.85 \cdot 10^{-5}$	16.3	$4.54 \cdot 10^{-5}$	16.5	$8.05 \cdot 10^{-6}$	9.9	$2.62 \cdot 10^{-6}$
28.6	0.0001	25.4	$2.60 \cdot 10^{-6}$	24.5	0.000105	24.8	$9.13 \cdot 10^{-5}$	25.1	$1.08 \cdot 10^{-4}$	25.3	$1.91 \cdot 10^{-6}$	15.3	$6.21 \cdot 10^{-6}$
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1952.5	0.6712	1962.0	0.0426	1959.0	0.6948	1959.0	0.6303	1959.1	0.5700	1964.1	0.1149	1929.4	0.03589
1968.3	0.6591	1975.3	0.0414	1973.3	0.6839	1973.4	0.6202	1973.4	0.5618	1976.7	0.1127	1954.1	0.0356
1984.2	0.6476	1987.9	0.0403	1987.0	0.6741	1987.0	0.6111	1987.0	0.5550	1988.6	0.1107	1977.6	0.0354
2000	0.6368	2000	0.0393	2000	0.6652	2000	0.6028	2000	0.5478	2000	0.1090	2000	0.0352

На рис. 12 показана совокупность АЧХ для всех перечисленных выше дефектов.

Наличие любого дефекта в конструкции ПУ вызовет изменение его АЧХ блока. Поэтому выявление дефекта путем сравнения АЧХ исследуемого макета с заранее полученными АЧХ, соответствующим различным возможным дефектам в конструкции ПУ, является наиболее эффективным способом контроля и определения технического состояния ПУ [14, 15].

Для сравнения АЧХ разработана таблица значений амплитуд виброускорений конструкции блока для различных технических состояний ПУ, полученных в контрольной точке при разных значениях частот вибрационного воздействия в диапазоне от 0 Гц до 2000 Гц.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТИ ПУ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИБРОСТЕНДА

Получение экспериментальных АЧХ исследуемого макета в исправном состоянии ПУ и при наличии дефекта осуществляется с помощью испытательного комплекса, состоящего из вибростенда и компьютера, на котором установлено специализированное программное обеспечение для анализа сигналов. В состав комплекса входят:

- вибростенд m030/MA1 (IMV Corporation, Япония), который отвечает за создание механических гармонических колебаний с определенной амплитудой и частотой, устанавливаемыми

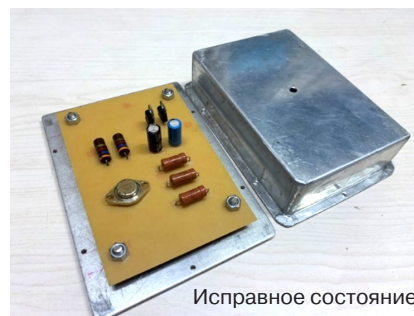
при проведении эксперимента. В представленном случае на объект исследований воздействует гармоническая вибрация с амплитудой виброускорения  $10 \text{ м/с}^2$  в диапазоне частот от 0 до 2000 Гц [15];

- акселерометр – датчик типа VP-32, регистрирующий виброускорение на крышке корпуса исследуемого макета (максимальное регистрируемое ускорение  $500 \text{ м/с}^2$  в диапазоне рабочих частот от 2 до 10000 Гц);
- персональный компьютер, который управляет вибростендом для создания гармонических колебаний, а затем сохраняет и отображает АЧХ, полученную с помощью акселерометра.

Конструкция исследуемого объекта представляет собой макет блока (рис. 13) с алюминиевым корпусом толщиной 3 мм и основанием толщиной 5 мм. На крышке корпуса блока просверлено отверстие для крепления акселерометра. Внутри корпуса находится макет печатной платы с установленными ЭРЭ, который закреплен на винтах на расстоянии 10 мм от основания.

Состав лабораторно-экспериментального комплекса для анализа механической АЧХ при вибрационном воздействии показан на рис. 14.

На рис. 15 приведены полученные при натуральных испытаниях на вибрационные воздействия механические АЧХ конструкции исследуемого макета.



Исправное состояние

Рис. 13. Конструкция исследуемого макета блока



Рис. 14. Лабораторно-экспериментальный комплекс для вибродиагностики конструкции ПУ

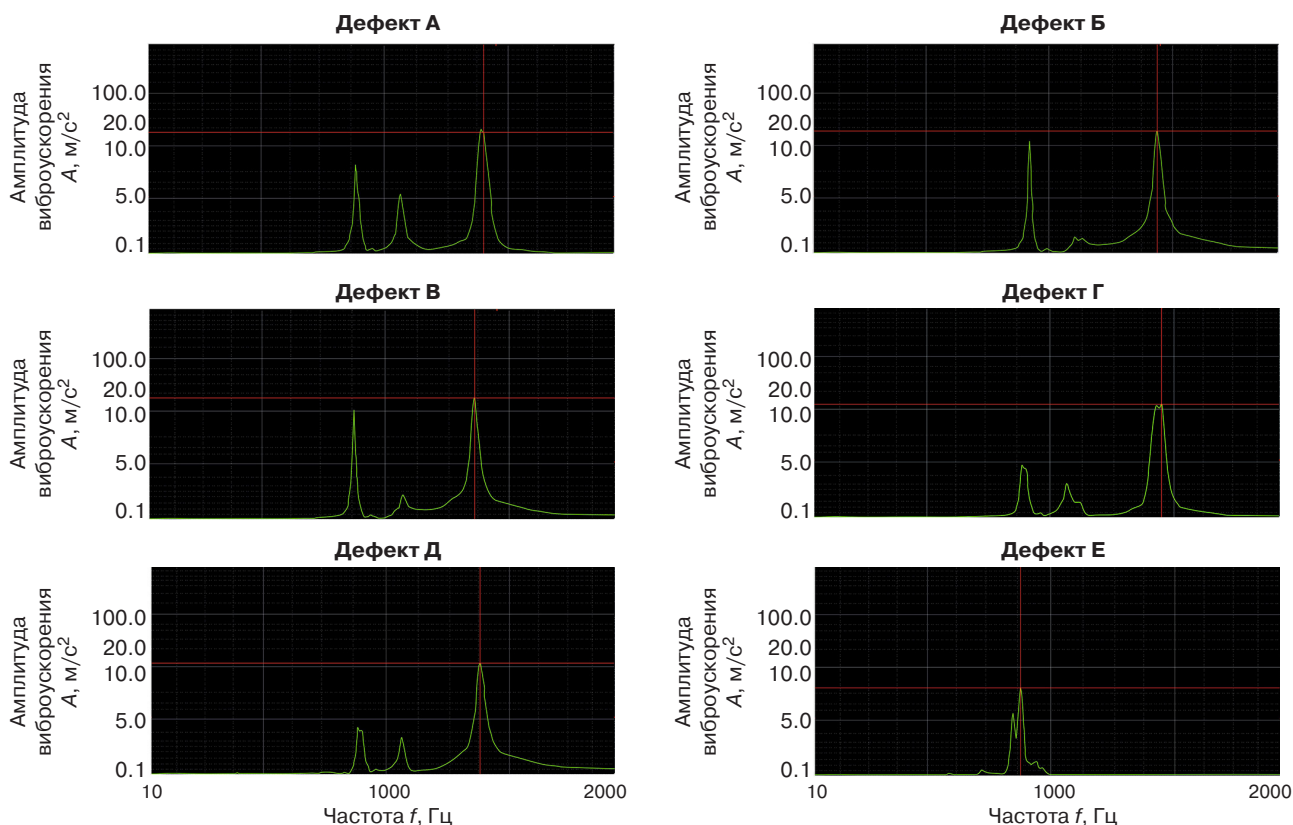


Рис. 15. Механические АЧХ конструкции макета, полученные при натуральных испытаниях на вибрационные воздействия

В результате проведенных экспериментальных измерений получены механические АЧХ макета для исправного состояния ПУ и для нескольких неисправных состояний при наличии описанных ранее дефектов. В дальнейшем полученные АЧХ после их обработки в формат, пригодный для сравнения с результатами моделирования, используются для определения технического состояния исследуемого макета блока и классификации дефектов.

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В ПУ

Глубокое машинное обучение представляет собой одно из направлений машинного обучения, основанное на применении искусственных нейронных сетей и алгоритмов, имитирующих работу человеческого мозга. Такой подход позволяет системе самостоятельно обучаться на больших массивах данных и выявлять скрытые закономерности между ними. Несмотря на то, что концепция глубокого обучения известна с 1960-х гг., широкое практическое применение она получила только с развитием вычислительных технологий и методов анализа больших данных, что позволило значительно повысить эффективность нейронных сетей [16].

Применение DNN обусловлено необходимостью распознавания сложных нелинейных зависимостей между формой и параметрами АЧХ и типом дефекта, что не реализуется в простых перцептронных моделях. Выбор DNN позволил добиться устойчивой сходимости и высокой точности классификации вида технического состояния.

Deep neural network представляет собой разновидность искусственной нейронной сети, состоящей из множества взаимосвязанных слоев. Глубина сети определяется количеством скрытых слоев и сложностью ее структуры [17, 18]. Каждый слой выполняет обработку данных, передавая результаты следующему, что обеспечивает возможность решения задач высокой вычислительной сложности.

К основным компонентам DNN относятся:

- входной слой, принимающий исходные данные модели, представленные в виде двумерной числовой матрицы, содержащей значения амплитуд виброускорения и соответствующие им частоты для различных технических состояний;
- скрытый слой, выполняющий обработку данных и передачу информации между слоями;
- выходной слой, формирующий окончательное решение о состоянии блока (исправное или с определенным дефектом).

Функция активации используется для обеспечения нелинейной аппроксимации зависимостей между параметрами АЧХ и типами дефектов конструкции ПУ.

Весовые коэффициенты и смещения (bias) являются настраиваемыми параметрами сети, обеспечивающими ее адаптацию к обучающим данным.

На рис. 16 представлена структура искусственного нейрона, используемого в глубокой нейронной сети, где  $x_i$  – входные сигналы нейрона;  $w_{ki}$  – весовые коэффициенты соответствующих входов;  $b_k$  – смещение (bias);  $\Sigma$  – операция суммирования;  $u_j$  – линейная комбинация входов нейрона (иногда называют взвешенной суммой или сумматором),  $j$  – количество входных сигналов сети, зависящее от частотного диапазона;  $\varphi(\cdot)$  – функция активации.

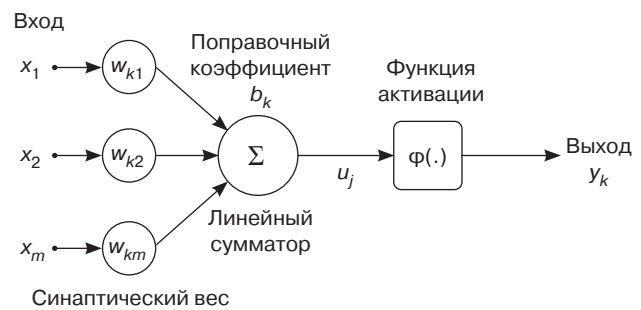


Рис. 16. Структура искусственного нейрона DNN

В рассматриваемом исследовании база данных дефектов конструкции исследуемого блока формировалась с объемом выборки  $n = 1000$ , что соответствует тысяче различных реализаций каждого состояния, полученных методом моделирования Монте-Карло. Количество нейронов выходного слоя равно семи, что соответствует одному исправному состоянию и шести видам потенциальных дефектов конструкции исследуемого ПУ.

Архитектура сети, реализованная в ходе моделирования, имеет следующий вид (рис. 17):

- входной слой – объединенные частоты и амплитуды;
- скрытый слой – нейроны с функцией активации ReLU (Rectified Linear Unit):

$$f(x) = \max(0, x);$$

- выходной слой – узлы с функцией активации softmax:

$$p_i = \frac{e^{z_j}}{\sum_{j=1}^7 e^{z_j}}, i = \overline{1, 7}; \quad (1)$$

где  $z_j$  – линейная комбинация входов на выходном слое;  $p_i$  – вероятность принадлежности к классу  $i$ .

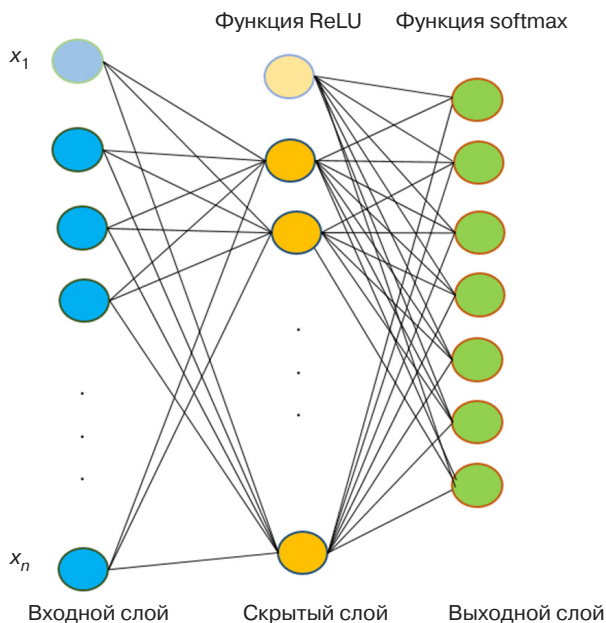


Рис. 17. Архитектура разработанной DNN-модели

Функция активации играет ключевую роль в работе нейронной сети, обеспечивая ее нелинейность и моделируя процесс передачи сигнала между нейронами.

ReLU является одной из наиболее распространенных функций активации, благодаря простоте реализации и высокой эффективности обучения. Она обладает рядом преимуществ по сравнению с функциями sigmoid и tanh:

- обеспечивает более быструю сходимость (скорость обучения в 6 раз выше, чем у tanh);
- требует меньших вычислительных затрат;
- предотвращает эффект насыщения градиента, что повышает стабильность обучения.

При использовании функции ReLU в задаче классификации дефектов скорость сходимости модели значительно возрастает, что подтверждено при обучении с числом *epoch* = 10, где *epoch* – количество полных циклов обучения модели на всем наборе данных для обновления весов нейронов.

Для классификации технического состояния использовалась DNN, реализованная в среде Python с применением библиотеки Keras. На вход модели подавались массивы данных, представляющие АЧХ

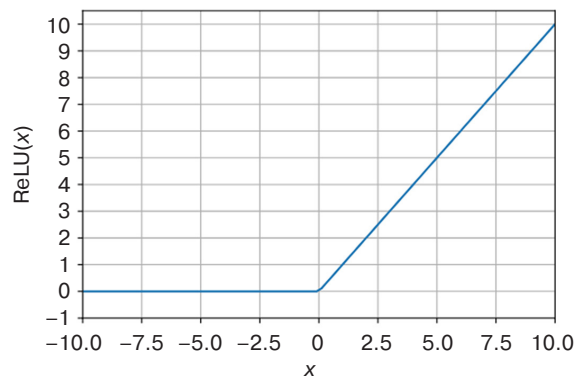


Рис. 18. График, представляющий функцию ReLU

в виде числовых пар «частота – амплитуда», сформированные по результатам моделирования и натуральных испытаний. В процессе обучения использовались функция потерь кросс-энтропии и оптимизатор Adam, число эпох составило 10.

Значение точности модели (*Model Accuracy*), рассчитанное при выполнении кода DNN на языке Python, приведено на рис. 19.

По результатам обучения точность модели составила 99,57%, что свидетельствует о высокой эффективности предложенного подхода.

Полученные результаты классификации и идентификации представлены в виде гистограмм (рис. 20–25), отражающих процентное распределение вероятности выявления дефектов, рассчитанной по формуле (1).

Из полученных результатов классификации дефектов видно, что использование DNN позволяет распознавать каждый тип дефекта в конструкции ПУ с достаточно высокой вероятностью: дефект А – 93.7%, дефект Б – 47.5%, дефект В – 44.1%, дефект Г – 95.7%, дефект Д – 87.4%, дефект Е – 98.7%.

Таким образом, разработанная DNN-модель подтвердила возможность точного распознавания скрытых дефектов конструкции ПУ на основе анализа механических АЧХ блока, полученных при вибрационных испытаниях.

```

▶ loss, acc = model.evaluate(X_test, y_test)
  print("Model accuracy: {:.2f}%".format(100*acc))

... 22/22 _____ 1s 30ms/step - accuracy: 0.9957 - loss: 0.6735
   Model accuracy: 99.57%
    
```

Рис. 19. Скриншот результатов расчета точности модели DNN в среде Google Colab<sup>5</sup>

<sup>5</sup> <https://colab.google/>. Дата обращения 23.03.2026. / Accessed March 23, 2026.

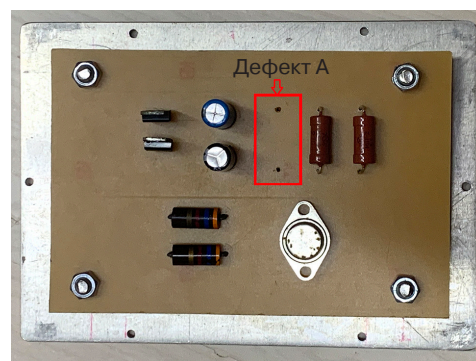
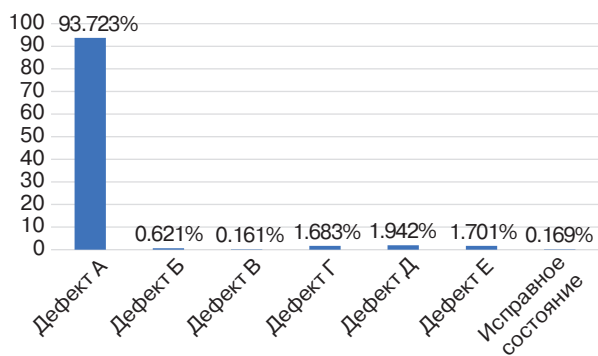


Рис. 20. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом А

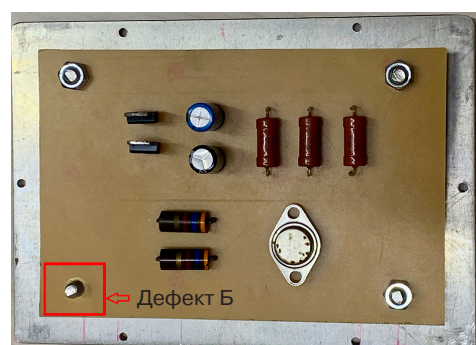
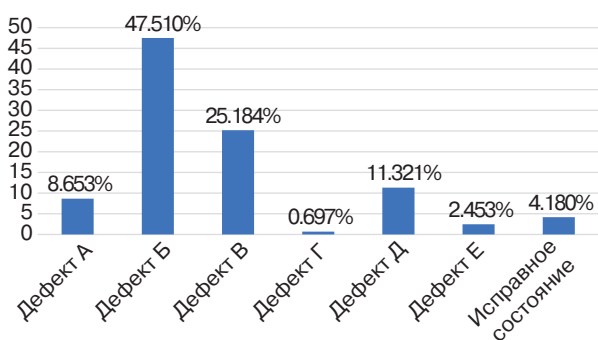


Рис. 21. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом Б

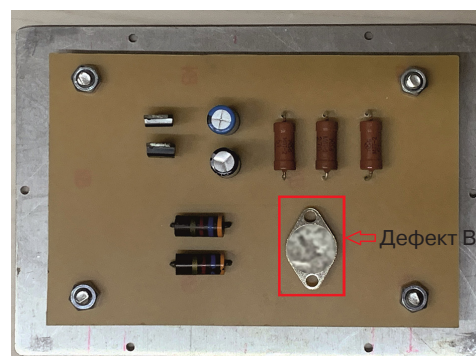
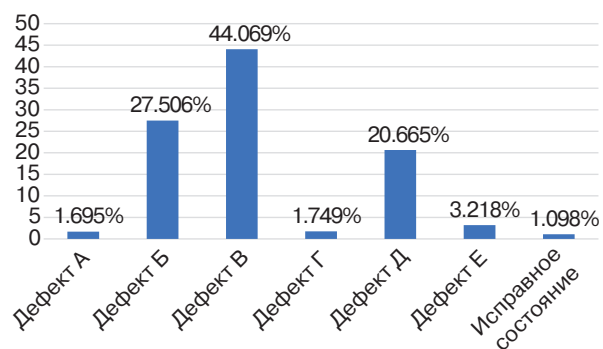


Рис. 22. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом В

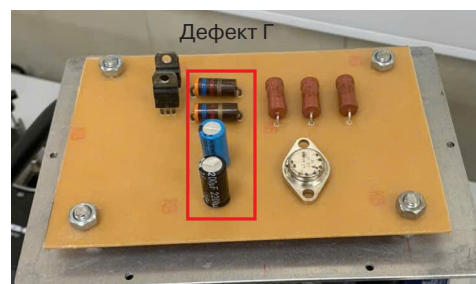
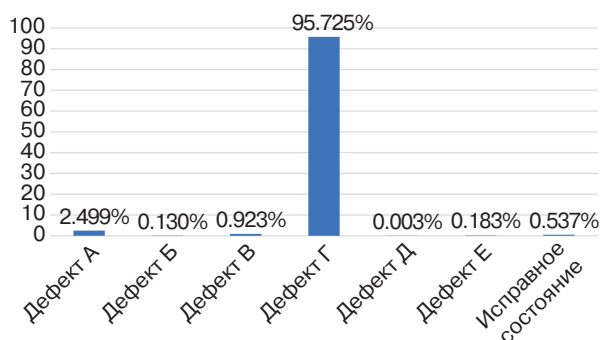


Рис. 23. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом Г

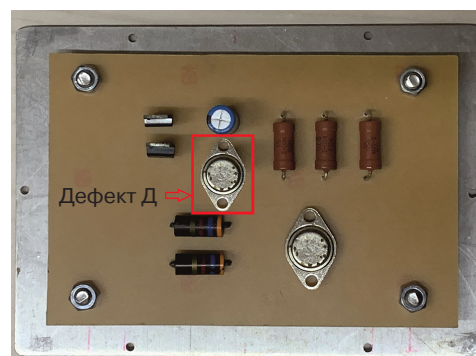
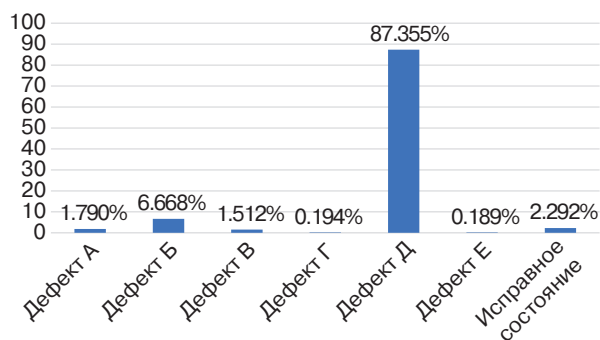


Рис. 24. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом Д

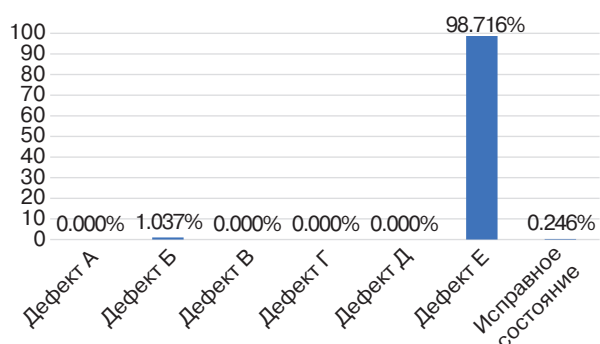


Рис. 25. Отчет о техническом состоянии исследуемого макета с дефектом Е

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования разработан и экспериментально апробирован метод вибродиагностики конструкций ПУ, основанный на анализе механических АЧХ блока и применении DNN для классификации дефектов.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- в ходе численных и натурных экспериментов подтверждено влияние различных конструктивных дефектов, указанных в разделе 2, на механические АЧХ конструкций блока при вибрационных воздействиях;
- разработан метод вибродиагностики ПУ, сочетающий численное моделирование механических процессов с натурными испытаниями, позволяющий с высокой точностью определять наличие и классифицировать латентный дефект в конструкции ПУ;
- реализована модель DNN, обеспечивающая точность классификации дефектов на уровне 99.6%;

- показана принципиальная возможность применения разработанного метода для диагностики ПУ на этапах производства и эксплуатации без необходимости вскрытия герметичных корпусов.

Таким образом, предложенный метод диагностирования ПУ при вибрационных воздействиях позволяет повысить эффективность процесса диагностирования за счет увеличения точности определения технического состояния. Применение численного моделирования и искусственной нейронной сети обеспечивает автоматизацию процедуры анализа механических АЧХ. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы в качестве научной основы для дальнейшего развития и углубленного исследования методов вибродиагностики конструкций ПУ.

**Вклад авторов.** Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

**Authors' contribution.** All authors contributed equally to the research work.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Увайсов С.У., Долматов А.В., Во Т.Х., Лью Н.Т., Нгуен К.Д. Диагностика нарушений целостности конструкций бортовых радиоэлектронных средств при испытаниях на ударные воздействия. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-28-38>
2. Долматов А.В., Сулейманов С.П., Увайсов Р.И. Диагностирование целостности конструкции электронной аппаратуры. *Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества*. 2004;1:99–100. <https://elibrary.ru/pfgsrx>
3. Костюков А.С., Башкиров А.В., Гостев М.Ю., Демихова А.С., Пирогова Ю.А. Сравнительный анализ программных комплексов для определения механических характеристик РЭС. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2020;16(4):117–126. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.16.4.016>
4. Шалумов А.С. АСОНИКА – российская САПР электроники в части виртуальных испытаний. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2022;3:82–83. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.214.3.82.83>
5. Резчикова Е.В., Льюнг К.Л. Виброзащита бортовой электронной аппаратуры от внешних воздействий. *Контроль. Диагностика*. 2021;24(11):22–30. <https://doi.org/10.14489/td.2021.11.pp.022-030>
6. Беляев А.А., Кононов Д.П., Кротов С.В. Проблемы диагностики современных тепловозных двигателей. *Бюллетень результатов научных исследований*. 2024;1:7–20. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2024-01-7-20>
7. Битюков В.К., Долматов А.В., Задерновский А.А., Стариковский А.И., Увайсов Р.М. Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования. *Russian Technological Journal*. 2023;11(6):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>
8. Занг В.Т., Дао А.К., Фам Л.К.Х., Нгуен В.Д., Нгуен В.Т., Увайсова А.С. Особенность применения технологии JTAG в диагностике печатных узлов. В сб.: *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции*. 2020. С. 427–431. <https://elibrary.ru/xpkskk>
9. Нехорошков Д.П., Юсипов М.Р., Сотникова С.Ю. Моделирование тепловых и механических процессов блока метеорологического спутника. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*. 2019;1:309–313. <https://elibrary.ru/ydlitd>
10. Исабекова Т.И., Савзиханова С.Э. Моделирование надежности электронных компонентов сверхбольших интегральных схем методом Монте-Карло. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2025;52(3):49–60. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-3-49-60>
11. Bach Phi Duong, Jong-Myon Kim. Prognosis of remaining bearing life with vibration signals using a sequential Monte Carlo framework. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019;146(4):EL358–EL363. <https://doi.org/10.1121/1.5129076>
12. Кашникова А.П., Беляева М.Б. Метод Монте-Карло в задачах моделирования процессов и систем. *Modern Science*. 2021;1-2:358–362. <https://elibrary.ru/ywleen>
13. Кофанов Ю.Н., Сотникова С.Ю. Повышение точности моделирования на основе идентификации. *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2015;1:176–178. <https://elibrary.ru/ukehyt>
14. Журавлёв А.О., Поляков А.О., Андриков Д.А. Методы вибродиагностики: от способов получения данных до их обработки современными средствами. *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2024;25(4):380–396. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396>
15. Ирзаев Г.Х. Обеспечение и оценка контролепригодности конструкции сложных радиоэлектронных средств на этапах их проектирования. *Контроль. Диагностика*. 2023;26(5):34–41. <https://doi.org/10.14489/td.2023.05.pp.034-041>
16. Рахманов П.А., Гаррыев С.С., Реджепгелдиев С.С. Глубокое обучение и машинное обучение: ключевые отличия и влияние на современные технологии. *Вестник науки*. 2024;4(73):651–654. <https://elibrary.ru/mvnyuu>
17. Полегаев А.А., Яблоков А.Е. Нейросетевой метод технической диагностики оборудования по спектрам виброускорения и виброускорений. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024;5:476–481. <https://www.elibrary.ru/nyfist>
18. Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Ломовцева Н.А. Диагностика состояния технического объекта с помощью классификации методами машинного обучения. *Программные продукты и системы*. 2021;4:572–578. <http://doi.org/10.15827/0236-235X.136.572-578>

## REFERENCES

1. Uvaysov S.U., Dolmatov A.V., Vo T.H., Luu N.T., Nguyen C.D. Diagnostics of structural integrity violations of avionics during impact tests. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-28-38>
2. Dolmatov A.V., Suleimanov S.P., Uvaysov R.I. Diagnosing the integrity of the electronic equipment design. *Problemy kachestva, bezopasnosti i diagnostiki v usloviyakh informatsionnogo obshchestva = Problems of Quality, Safety and Diagnostics in the Information Society*. 2004;1:99–100 (in Russ.). <https://elibrary.ru/pfgsrx>
3. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V., Gostev M.Yu., Demikhova A.S., Pirogova Yu.A. Comparative analysis of software complexes for determination of mechanical characteristics of RED. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2020;16(4):117–126 (in Russ.). <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.16.4.016>
4. Shalumov A.S. ASONIKA – Russian CAD electronics in terms of virtual tests. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2022;3:82–83 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.214.3.82.83>

5. Rezchikova E.V., Luong Q.L. Vibration protection of on-board electronic equipment from external influences. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2021;24(11):22–30 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/td.2021.11.pp.022-030>
6. Belyaev A.A., Kononov D.P., Krotov S.V. Problems of diagnostics of modern diesel locomotive engines. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy = Bulletin of Scientific Research Results*. 2024;1:7–20 (in Russ.). <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2024-01-7-20>
7. Bityukov V.K., Dolmatov A.V., Zadernovsky A.A., Starikovskiy A.I., Uvaysov R.M. Calculation permissible deviations of vibration accelerations of printed circuit assemblies by simulation modeling. *Russian Technological Journal*. 2023;11(6):28–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>
8. Zang V.T., Dao An.Q., Pham L.Q.H., Nguyen V.D., Nguyen V.T., Uvaysova A.S. Feature of application of JTAG technology in diagnostics of printed units. In: *Innovative, Information and Communication Technologies: Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference*. 2020. P. 427–431 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xpksskk>
9. Nekhoroshkov D.P., Yusipov M.R., Sotnikova S.Y. Modeling of thermal and mechanical processes of the meteorological satellite unit. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii = Innovative, Information and Communication Technologies*. 2019;1:309–313 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ydlitd>
10. Isabekova T.I., Savzikhanova S.E. Monte Carlo simulation of reliability of electronic components of very large-scale integrated circuits. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(3):49–60 (in Russ.). <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-3-49-60>
11. Bach Phi Duong, Jong-Myon Kim. Prognosis of remaining bearing life with vibration signals using a sequential Monte Carlo framework. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019;146(4):EL358–EL363. <https://doi.org/10.1121/1.5129076>
12. Kashnikova A.P., Belyaeva M.B. The Monte Carlo method in the problems of modeling processes and systems. *Modern Science*. 2021;1-2:358–362 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ywleem>
13. Kofanov Yu.N., Sotnikova S.Yu. Improving the accuracy of modeling based on identification. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologii = Innovations Based on Information and Communication Technologies*. 2015;1:176–178 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ukehyt>
14. Zhuravlev A.O., Polyakov A.O., Andrikov D.A. Vibration Diagnostic Methods from Methods of Obtaining Data to Processing It Using Modern Means. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):380–396 (in Russ.). <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-380-396>
15. Irzaev G.H. Provision and evaluation of testability of the design of complex radio-electronic means/devices at the stages of their design. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2023;26(5):34–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/td.2023.05.pp.034-041>
16. Rakhmanov P.A., Garryev S.S., Redzhepeldiev S.S. Deep learning and machine learning: key differences and impact on modern technologies. *Vestnik Nauki*. 2024;4(73):651–654 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rnyvuu>
17. Poletaev A.A., Yablokov A.E. Neural network method for technical diagnostics of food equipment based on vibration acceleration and vibration velocity spectra. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2024;5:476–481 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/nyfif>
18. Klyachkin V.N., Kuvaiskova Yu.E., Lomovtseva N.A. Diagnosing the condition of a technical object using classification machine learning classification. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2021;4:572–578 (in Russ.). <http://doi.org/10.15827/0236-235X.136.572-578>

## Об авторах

**Увайсов Сайгид Увайсович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvajsov@mirea.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, SPIN-код РИНЦ 3801-4816, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

**Долматов Алексей Вячеславович**, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dolmatov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3887-2405, <https://orcid.org/0000-0003-2969-2971>

**Во Тхе Хай**, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: thehai.ttrd@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 5210-3214, <https://orcid.org/0009-0009-7240-4374>

**Нгуен Дык Хай**, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: duchai09011997@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 5614-9517, <https://orcid.org/0009-0002-8109-9729>

**Фам Суан Хань**, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: phamxuanhanhld161@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 8103-7664, <https://orcid.org/0009-0002-6485-8404>

**Увайсов Руслан Магомедович**, аспирант, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ruslan27398@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 5906-9978, <https://orcid.org/0000-0003-0619-649X>

#### About the Authors

**Saygid U. Uvaysov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvajsov@mirea.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, RSCI SPIN-code 3801-4816, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

**Aleksey V. Dolmatov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dolmatov@mirea.ru, RSCI SPIN-code 3887-2405, <https://orcid.org/0000-0003-2969-2971>

**Vo The Hai**, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: thehai.ttrd@gmail.com. RSCI SPIN-code 5210-3214, <https://orcid.org/0009-0009-7240-4374>

**Nguyen Duc Hai**, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: duchai09011997@gmail.com. RSCI SPIN-code 5614-9517, <https://orcid.org/0009-0002-8109-9729>

**Pham Xuan Hanh**, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: phamxuanhanhld161@gmail.com. RSCI SPIN-code 8103-7664, <https://orcid.org/0009-0002-6485-8404>

**Ruslan M. Uvaysov**, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ruslan27398@yandex.ru. RSCI SPIN-code 5906-9978, <https://orcid.org/0000-0003-0619-649X>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы  
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 004.032.26+537.874.4+550.837.8  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-60-71>  
EDN LBUPEG



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Нейровизионное распознавание сигнальных радиоизображений

В.А. Кожемяко<sup>@</sup>,  
А.Д. Ярлыков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия  
<sup>@</sup> Автор для переписки, e-mail: kozhemyako@mirea.ru

• Поступила: 03.07.2025 • Доработана: 04.12.2025 • Принята к опубликованию: 23.03.2026

### Резюме

**Цели.** Целями работы являются: создание комбинированного нейровизионного алгоритма распознавания сигнальных радиоизображений объектов в режиме реального времени с использованием технологий машинного обучения и нейронной сети с полносвязной архитектурой и аугментацией данных; повышение вероятности правильной классификации при нейровизионной обработке сигналов.

**Методы.** В работе применены методы электродинамического моделирования, машинного обучения (линейная регрессия, классификация, случайный лес) и глубокого обучения (полносвязные нейронные сети). Применена техника бэггинга. Проведена оценка показателей точности классификации объектов и статистических критериев воспроизводимости радиоизображений.

**Результаты.** Разработан комбинированный нейровизионный метод распознавания объектов, показавший вероятность правильной классификации любого из переданных к обучению объектов с заданными форм-факторами не менее 0.97 при использовании аугментированных данных. Показано, что аугментация данных повышает вероятность правильной классификации нейронной сетью на 0.04. Полученные результаты подтвердили адекватность нейросетевых методов для задач нейровизионного распознавания объектов по сравнению с методами машинного обучения, прежде всего, при ограниченной базовой выборке объектов для обучения нейронной сети. Предложенный метод исследован для базисной классификации сферических и кубических моделей объектов в сантиметровом радиочастотном диапазоне частот.

**Выводы.** Нейронные сети с аугментацией данных демонстрируют вероятность правильной классификации свыше 0.97 в задачах нейровизионного распознавания радиоизображений в сравнении с нейронными сетями без аугментации данных (ниже на 0.04) и методами машинного обучения (ниже на 0.13). Методы машинного обучения уступают нейросетям в воспроизводимости радиоизображений, однако являются незаменимыми при ограниченных ресурсах вычислительной мощности. Для применения в реальных условиях требуются расширение базы данных за счет натуральных экспериментов и применение гибридных архитектур нейронных сетей.

**Ключевые слова:** нейровизионный метод, сигнальное радиоизображение, нейронная сеть, машинное обучение, классификация радиоизображений, линейная регрессия, метод случайного леса, электродинамическое моделирование

**Для цитирования:** Кожемяко В.А., Ярлыков А.Д. Нейровизионное распознавание сигнальных радиоизображений. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):60–71. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-60-71>, <https://www.elibrary.ru/LBUPEG>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Neurovisual recognition of signal radio images

Vladislav A. Kozhemyako @,  
Alexey D. Yarlykov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia  
@ Corresponding author, e-mail: kozhemyako@mirea.ru

• Submitted: 03.07.2025 • Revised: 04.12.2025 • Accepted: 23.03.2026

### Abstract

**Objectives.** The study set out to solve the problem of radiovision classification of objects based on identified features by developing a combined neurovision algorithm for real-time recognition of signal radio images of objects using machine learning (ML) technologies and a fully connected neural network with data augmentation, as well as to improve the probability of correct classification in neurovision signal processing.

**Methods.** In the study, several methods were used: electrodynamic modeling, machine learning (linear regression, classification, and Random Forest), and deep learning (fully connected neural networks). The bootstrap aggregating (bagging) technique was also employed. An assessment of object classification accuracy metrics and statistical criteria for the reproducibility of radio images was carried out.

**Results.** A combined neurovision object recognition method was developed that demonstrated a probability of correct classification of at least 0.97 for any of the objects transmitted for training with specified form factors when using augmented data. Data augmentation was shown to increase the neural network's probability of correct classification by 0.04. The obtained results confirm the adequacy of neural network approaches compared to classical ML methods for neurovision object recognition, particularly when dealing with a limited base dataset of objects for neural network training. The proposed method was tested for basic classification of spherical and cubic object models in the centimeter radio frequency range.

**Conclusions.** Neural networks with data augmentation demonstrate a probability of correct classification exceeding 0.97 for neurovision recognition of radio images as compared to neural networks without data augmentation (0.04 lower) and traditional ML methods (0.13 lower). Although ML methods are inferior to neural networks in radio image reproducibility, they remain indispensable in cases where computational resources are limited. For real-world applications, database expansion through field experiments and the implementation of hybrid neural network architectures are required.

**Keywords:** neuroimaging method, signal radio image, neural network, machine learning, signature classification, linear regression, random forest, electrodynamic modeling

**For citation:** Kozhemyako V.A., Yarlykov A.D. Neurovisual recognition of signal radio images. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):60–71. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-60-71>, <https://www.elibrary.ru/LBUPEG>

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

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Задача обнаружения и классификации объектов в пространстве является одной из ключевых в области радиовидения. При этом, как известно, распознавание формы, размера и радиофизических идентификаторов объектов в реальном времени при помощи нейросетевых алгоритмов требует поиска комбинированного подхода в обработке сигналов, сочетающего достоинства нейронных сетей и технологий машинного обучения, которые, в ряде случаев, имеют явное превосходство перед методами оптимальной обработки [1]. Корректная классификация объектов по их радиоизображениям с градиентным, резкопереходным и неоднородным импедансом поверхностной структуры имеет критическое значения для ряда научно-практических направлений, например, при создании радиовизоров с синтезированной апертурой для серии малых спутниковых группировок дистанционного зондирования Земли типа «Кондор», предназначенных для получения радиоизображений высокого и среднего разрешения<sup>1</sup>.

Так, например, в отличие от согласованных методов вейвлет-фильтрации сверхширокополосных сигналов в частотно-временной области [2], современные решения для распознавания радиоизображений более ориентированы на обработку данных при помощи технологий машинного обучения и методов нейросетевой обработки по классифицируемым признакам, не требующих предположений о вероятностном распределении данных [1]. Нейронные сети способны одновременно анализировать множество параметров сигналов, что в разы повышает скорость обработки и снижает вероятность ошибки на 5–15%.

В работе рассматривается применение методов машинного обучения (линейная регрессия, классификация и случайный лес), а также нейронной сети с полносвязной архитектурой для распознавания радиоизображений объектов различной радиофизической природы, описываемых суперпозицией базисных стереометрических фигур. Основное внимание уделено сравнению этих методов, а также рассмотрению возможности их комбинации.

Нейровизионное исследование включает в себя три этапа. Первый – формирование базы данных сигнальных радиоизображений с использованием среды

электродинамического моделирования *Ansys HFSS*<sup>2</sup>. Второй – обучение моделей машинного обучения и создание нейровизионного алгоритма с дальнейшим обучением нейронной сети. Третий – анализ точности классификации объектов, а также статистических критериев воспроизводимости радиоизображений.

Предложенный в работе нейровизионный комбинированный метод представляет практический интерес для развития технологий цифровой обработки вторичных сигналов аэроспутниковых и наземных радиовизоров, где необходимо достижение минимизации алгоритмического времени, необходимого для распознавания объектов при ограниченных ресурсах бортовых счетно-вычислительных модулей [3].

## 1. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ НЕЙРОВИЗИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Как известно, при работе с методами машинного обучения либо с нейронными сетями необходима база данных для обучения модели или архитектуры, поэтому первым этапом является создание и наполнение такой базы откликов сигналов от объектов. Для проведения программно-численного эксперимента, включающего в себя классификацию объектов по форме, исходя из откликов сигналов, подготовлена база данных радиовизионных откликов от сигнатур объектов базисной формы в среде электродинамического моделирования *Ansys HFSS* [4].

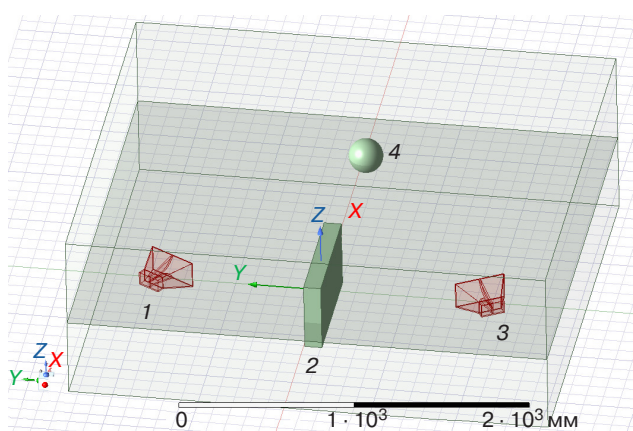
Для формирования радиоизображений в среде *Ansys HFSS* построена модель эксперимента (рис. 1). Синтезированы излучающая и приемная рупорные антенны, рассчитанные на частотный диапазон 0.5–2 ГГц. Антенны равноудалены друг от друга через радиопоглощающую перегородку с поворотом апертуры под углом 60° к оси *Y*. Исследуемый объект, представленный базисной стереометрической фигурой, помещается на линию визирования, проходящую через плоскость радиопоглощающей перегородки, на расстоянии, соответствующем зоне Фраунгофера. При этом приемной антенной регистрируется рассеянная сигнатурой базисной фигуры электрическая компонента переменного поля – собственно, сигнальное радиоизображение. Для эксперимента выбраны 2 типа масштабируемых объектов: 5 вариантов куба и 5 вариантов сфер. Кубы с длинами ребер 0.35, 0.4, 0.45, 0.5 и 0.55 м, соответственно. Сферы с диаметрами 0.35, 0.4, 0.45, 0.5 и 0.55 м, соответственно. Базисные объекты представляют собой стереометрические фигуры с идеально проводящими поверхностями.

<sup>1</sup> Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Кондор-ФКА». 2023. [https://ntsomz.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023.02.17.rukovodstvo.pol\\_zovatela.kondor-fka.dla\\_saita\\_.pdf](https://ntsomz.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023.02.17.rukovodstvo.pol_zovatela.kondor-fka.dla_saita_.pdf). Дата обращения 14.08.2025. [User's Guide to Earth Remote Sensing Data Obtained by the Kondor-FKA Space System – 2023. Nauchnyi Tsentr Operativnogo Monitoringa Zemli (Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth). [https://ntsomz.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023.02.17.rukovodstvo.pol\\_zovatela.kondor-fka.dla\\_saita\\_.pdf](https://ntsomz.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023.02.17.rukovodstvo.pol_zovatela.kondor-fka.dla_saita_.pdf). Accessed August 14, 2025. (In Russ.)]

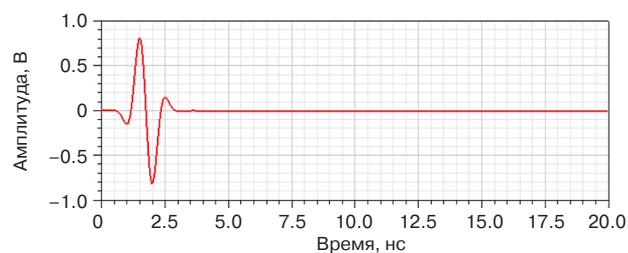
<sup>2</sup> <https://www.ansys.com/products/>. Дата обращения 14.08.2025. / Accessed August 14, 2025.

В качестве радиовизионного сигнала, облучающего сигнатуру объекта, используется модель моноцикла Гаусса (рис. 2) [4]. Моноцикл формирует сверхширокополосный спектр в области 0.7–1.0 ГГц, что соответствует длинам волн 42–30 см, при масштабируемых размерах исследуемых объектов 35–55 см.

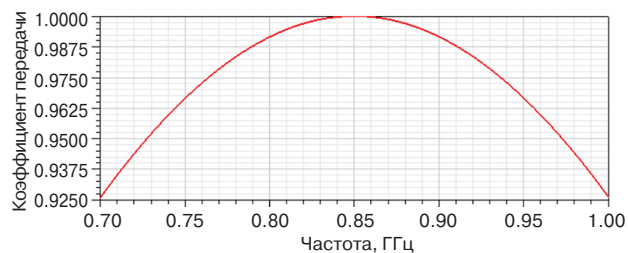
Для регистрации сигнала, рассеянного сигнатурой радиовизионного объекта, в модели эксперимента, представленной на рис. 1, необходимо формирование излучения моноцикла Гаусса, представленного на рис. 2. Расчет задаваемого амплитудного спектра моноцикла Гаусса также проводится в среде электродинамического моделирования *Ansys HFSS*. Как известно, при корректном завершении расчета



**Рис. 1.** Программно-численная электродинамическая модель эксперимента по формированию сигнальных радиоизображений объектов: 1 – приемная антенна, 2 – радиопоглощающая перегородка, 3 – излучающая антенна, 4 – радиовизионный объект, задаваемый сигнатурой базисной фигуры



(а)



(б)

**Рис. 2.** Представление моноцикла Гаусса во временной (а) и частотной (б) областях

программой *Ansys HFSS* транслируется цикл частотно-временных номограмм ближнего и дальнего поля в виде анимаций, демонстрирующих распространение радиовизионного зондирующего и рассеянного сигналов [5]. При моделировании длительность анимационного расчета задана равной 25 нс. На рис. 3 приведены стоп-кадры четырех номограмм распределения электрической компоненты рассеянного сигнатурой объекта поля радиовизионного импульса от куба с длиной ребра 0.55 м на моменты времени 4950 пс (рис. 3а), 11010 пс (рис. 3б) и сферы диаметром 0.35 м на моменты времени 5520 пс (рис. 3в) и 12030 пс (рис. 3г).

Кроме того, в модели помимо анимации номограмм распространения набегающих и рассеянных компонент электромагнитных полей представляется возможным получить выборки для построения радиопрофилей распределения рассеянного сигнатурой объекта электрического поля в выбранном направлении. Так, на рис. 4 представлен пример полученных диффузно рассеянных неоднородностями боковых поверхностей радиоизображений объектов: куба с длиной ребра 0.55 м и сферы радиусом 0.35 м [6].

Полученные радиоизображения можно экспортировать из среды *Ansys HFSS* в виде выборки данных из 965 мгновенных значений приведенной напряженности поля в мВ с шагом дискретизации 0.025 нс. Массивы программно-численных экспериментальных значений, составляющих базу нейровизионных данных, полученные для 5 сферических и 5 кубических объектов с разными форм-факторами приведены в табл. 1.

Полученная нейровизионная база данных является фреймом данных, в котором категориями для нейросетевой модели являются радиоизображения объектов, а индексами – мгновенные динамические значения сигнального радиопрофиля. Для представления и обработки нейровизионной базы данных откликов в заданный формат методами машинного обучения и нейронной сети разработана специальная программа на языке Python. Из полученной базы при помощи модуля *Pandas* (библиотека для обработки и анализа структурированных данных) радиовизионная выборка введена в программу отдельным типом данных – *DataFrame*, позволяющим хранить двумерные массивы информации, содержащие как числовые, так и строковые данные. Кроме того, использование модуля *Pandas* предоставляет исследователю доступ ко всем хранящимся данным. Однако для хранения и обработки информации модуль *Pandas* использует ресурсы памяти вычислительного устройства, т.к. работа ведется с копией исходных радиовизионных данных. Благодаря этому, полученная информация в виде *DataFrame* может использоваться для работы с методами машинного обучения и нейронными сетями [7].

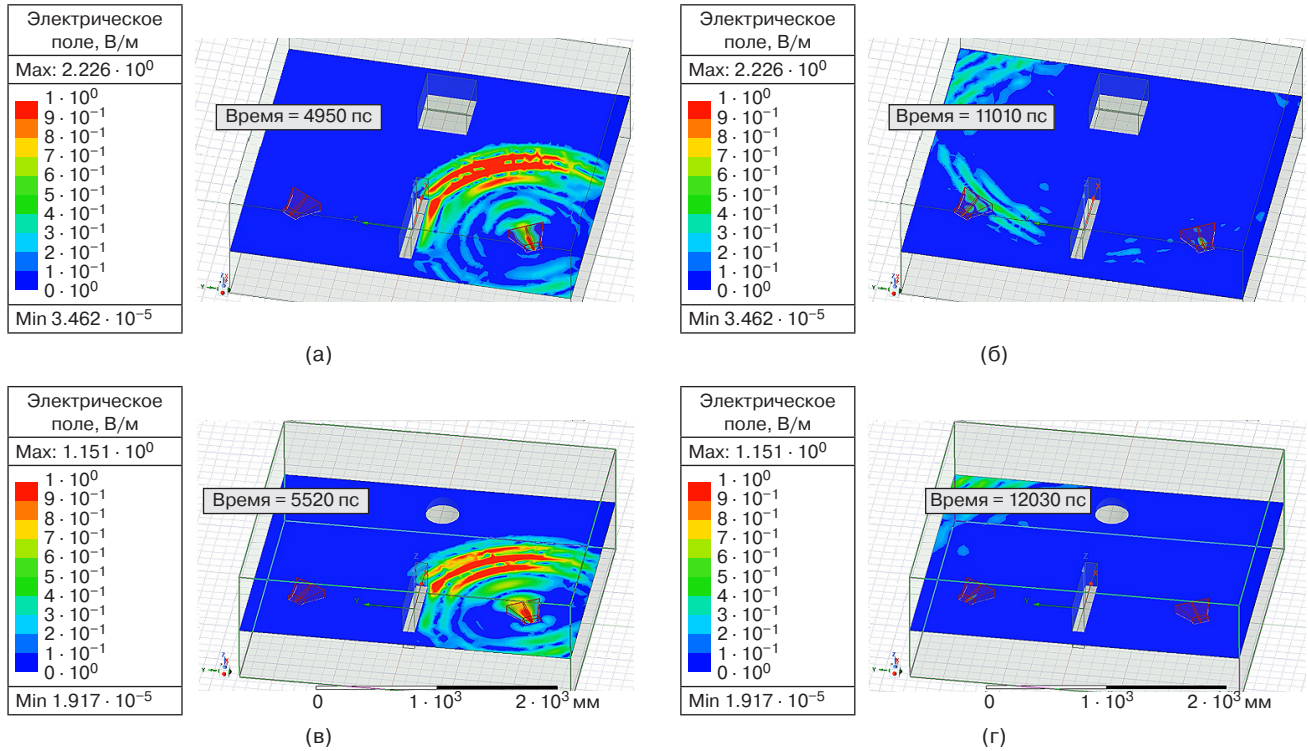


Рис. 3. Стоп-кадры номограмм распределения, рассеянного в дальней зоне поля от куба и сферы

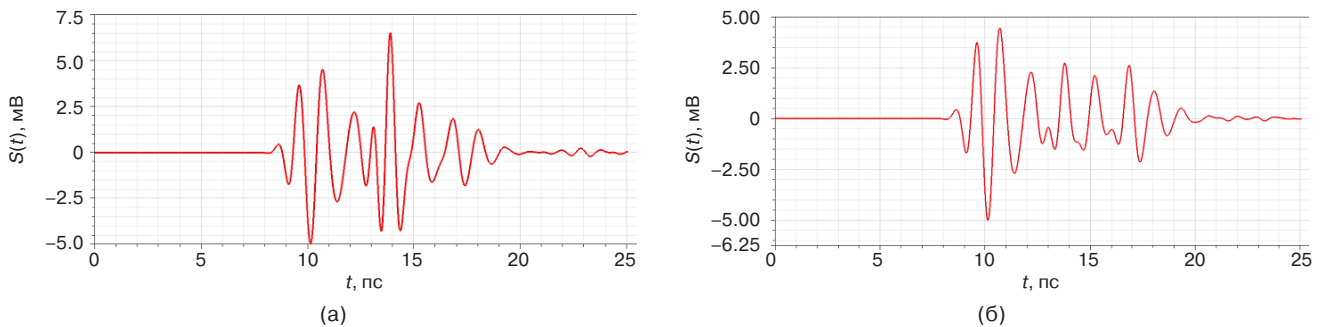


Рис. 4. Радиоизображения кубического (а) и сферического (б) объектов, полученные с заданного направления рассеяния, определяемого законом Снеллиуса

Таблица 1. Нейровизсионные данные радиоизображений с установленными форм-факторами

Тип объекта	Сфера (с форм-фактором $D$ , м)					Куб (с форм-фактором $L$ , м)				
Форм-фактор	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55
Индекс временного отсчета с шагом 25 пс	Мгновенные динамические значения импульсных радиоизображений, мВ									
340	-0.0195	-0.0514	0.0945	0.1146	-1.7058	-1.5478	-0.8098	1.7553	0.3806	0.3287
341	-0.1693	-0.2056	-0.0405	-0.0189	-1.5988	1.3636	-0.4782	1.1756	-0.2834	-0.3413
342	-0.3451	-0.3844	-0.1967	-0.1740	-1.4304	-1.1189	-0.0748	0.5183	-0.9570	-1.0179
343	-0.5208	-0.5632	-0.3781	-0.3554	-1.2007	-0.7913	0.3640	0.5183	-1.6125	-1.6716
344	-0.7138	-0.7572	-0.5595	-0.5367	-0.8847	-0.4636	0.8264	-0.1699	-2.2679	-2.3252
345	-0.9105	-0.9534	-0.7567	-0.7349	-0.5687	-0.0658	1.2975	-0.8719	-2.8737	-2.9239

Таблица 1. Продолжение

Тип объекта	Сфера (с форм-фактором $D$ , м)					Куб (с форм-фактором $L$ , м)				
Форм-фактор	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55
Индекс временного отсчета с шагом 25 пс	Мгновенные динамические значения импульсных радиоизображений, мВ									
346	-1.1041	-1.1445	-0.9564	-0.9362	-0.1779	0.3665	1.7685	-1.5597	-3.4262	-3.4663
347	-1.2774	-1.3120	-1.1510	-1.1332	0.2514	0.8218	2.2189	-2.2475	-3.9123	-3.9395
348	-1.4506	-1.4796	-1.3222	-1.3076	0.7083	1.2854	2.6359	-2.8865	-4.2756	-4.2872
349	-1.5870	-1.6069	-1.4934	-1.4819	1.1808	1.7489	3.0048	-3.4709	-4.6389	-4.6349
350	-1.6879	-1.6966	-1.6241	-1.6166	1.6533	2.1925	3.2758	-3.9862	-4.8615	-4.8405
351	-1.7456	-1.7412	-1.7168	-1.7135	2.1131	2.6034	3.5468	-4.3722	-4.9819	-4.4429
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
963	-0.0575	-0.0021	-0.0202	-0.0125	-0.0124	-0.0505	0.0309	-0.0059	-0.0279	0.0012
964	-0.0501	-0.0085	-0.0173	-0.0177	-0.0102	-0.0434	0.0329	-0.0094	-0.0274	0.0008
965	-0.0501	-0.0134	-0.0173	-0.0222	-0.0102	-0.0434	0.0347	-0.0119	-0.0255	0.0008

## 2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

В рамках нейровизионного исследования проведено сравнение результатов прогнозирования, полученных с помощью трех различных методов машинного обучения. Выбор алгоритмов был обусловлен целью охватить как классические линейные модели, так и более сложные нелинейные и ансамблевые подходы: линейную регрессию, метод классификации (на основе метода опорных векторов) и метод случайного леса. Так, в работе линейная регрессия выбрана как базовый и интерпретируемый метод, метод классификации – как мощный алгоритм для работы с высокоразмерными данными, а случайный лес – в качестве эталонного ансамблевого метода, устойчивого к переобучению [8]. Модели алгоритмов машинного обучения построены на языке программирования Python с использованием библиотеки Scikit-Learn (открытая библиотека для работы с предсказательным анализом данных).

Обратимся к рассмотрению семантических признаков каждого из алгоритмов:

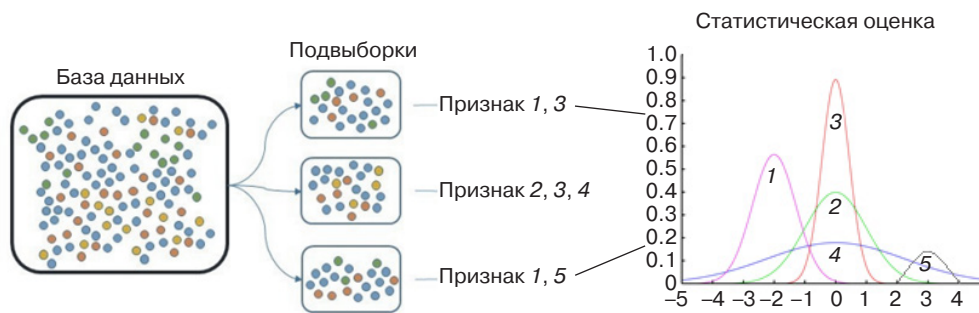
*А.* В случае с методом линейной регрессии используется уравнение вида  $Y = aX + b$ , где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, определяемые в ходе обучения [9]. Но, т.к. выходной параметр должен быть в числовом виде, т.е. целочисленным типом данных, значения названий

искомых категорий необходимо заменить, поэтому «сфера», «куб» заменены на признаки «1» и «2» соответственно.

*Б.* Метод классификации отличается от регрессии преимущественно тем, что в регрессии нет классов, и в результате предсказывается возможная величина выходного параметра, а в классификации количество классов или категорий строго ограничено, как и ограничивается выборка для предоставления ответа [10].

*В.* Метод случайного леса – более сложная версия простых ансамблевых моделей (рис. 5). Основное отличие от предыдущих методов в том, что для обучения признаки объектов в произвольном порядке из общего набора базы данных изымаются и распределяются в более мелкие наборы данных – подвыборки (датасеты). Причем признак одного и того же объекта может встречаться в нескольких новых подвыборках [9]. Так, метод случайного леса отличается от классических ансамблей, использующих систему всех допустимых признаков, возможностью выбора признака, по которому строго будет строиться нейросетевая модель.

Как можно заметить из рис. 5, метод случайного леса интересен тем, что искусственно увеличивает базу данных откликов сигналов для обучения, снижая вероятность возникновения ошибки нейровизионного распознавания.



**Рис. 5.** Формирование датасетов методом случайного леса по строго выбранным спектрально-временным радиовизионным признакам

Для сравнения рассмотренных алгоритмов получены пять дополнительных радиоизображений объектов: три – от сферических базисов с форм-факторами 0.35, 0.375 и 0.4 м; два – от кубических с форм-факторами 0.45 и 0.475 м. При этом полученные данные подгружены в базу данных обученных программных моделей для оценки корректности нейровизионного распознавания, а также для выявления вероятностей возникновения ошибок. Результаты работы нейровизионной модели по методу машинного обучения при распознавании объекта по форм-фактору при отсутствии влияния помех приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Вероятность правильной классификации для обученных моделей нейровизионного распознавания объекта с заданным форм-фактором

Метод	Линейная регрессия	Классификация	Случайный лес
Вероятность правильной классификации	0.3	0.72	0.85

В рамках настоящего исследования для оценки эффективности моделей машинного обучения и нейронных сетей применяются две взаимодополняющие метрики: коэффициент корреляции и вероятность правильной классификации.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) – мера сходства между предсказанием модели и эталонным образцом, служит пороговым критерием достоверности распознавания. Установленное пороговое значение  $r = 0.9$ , является решающим правилом: если вычисленный коэффициент превышает данный порог, результат классификации считается достоверным и принимается как корректный. В противном случае, при значении  $r < 0.9$  результат трактуется как недостаточно надежный, что указывает на потенциальную ошибку модели.

Вероятность правильной классификации определяется как доля тестовых случаев, для которых коэффициент корреляции превысил установленный порог 0.9. Данная метрика агрегирует итоговую

способность модели к точному распознаванию и вычисляется как отношение количества успешно классифицированных примеров (с корреляцией  $r \geq 0.9$ )  $N_{r \geq 0.9}$  к общему объему тестовой выборки  $N_{total}$ :

$$P = N_{r \geq 0.9} / N_{total}$$

Наивысшая вероятность правильной классификации, которой удалось достичь, применяя вышеперечисленные методы машинного обучения, равна 0.85 для метода случайного леса. Однако такая величина в отсутствие достаточной выборки данных для обучения способна привести к неудовлетворительному результату по сравнению с методами вейвлет-анализа [11].

### 3. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

Архитектура разработанной нейронной сети представляет собой полностью связанную многослойную нейронную сеть, состоящую из трех слоев: двух скрытых и одного выходного слоя (рис. 6) [12]. На вход нейронная сеть принимает 965 мгновенных значений приведенной напряженности поля в мВ с шагом дискретизации 25 пс. Первый скрытый слой, состоящий из 16 нейронов, преобразует входной сигнал поступившей размерности в 16 признаков. Второй скрытый слой, состоящий из 8 нейронов, преобразует входной сигнал из 16 признаков в 8 признаков. Выходной слой, состоящий из одного нейрона, преобразует входной сигнал из 8 признаков в одно выходное значение.

Выбор трехслойной полностью связанной архитектуры нейронной сети обусловлен поиском баланса между вычислительной эффективностью и устойчивостью модели к переобучению на ограниченном объеме исходной обучающей выборки. Увеличение количества слоев привело бы к значительному росту числа обучаемых параметров, что в условиях малого размера набора данных снизило бы обобщающую способность модели. Таким образом, принятая архитектура

обеспечивает достаточную выразительную способность для выделения иерархии признаков из радиосигналов при сохранении вычислительной эффективности, необходимой для задач реального времени.

Нейронная сеть реализована с применением принципов объектно-ориентированного программирования<sup>3</sup>. Фрагмент листинга кода, описывающий нейронную сеть, представлен на рис. 7. Он демонстрирует определение класса нейронной сети (рис. 6) с тремя полносвязными слоями [13].

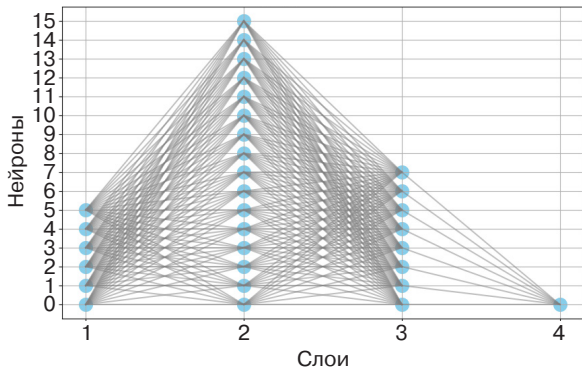


Рис. 6. Архитектура нейровизионной сети с тремя полносвязными слоями

В коде инициализируются весовые матрицы (**W1**, **W2**, **W3**) и векторы смещений (**b1**, **b2**, **b3**)

```
class NN: 1 usage
    def __init__(self, input_size):
        self.W1 = tf.Variable(tf.random.normal([input_size, 16]), name='weight1')
        self.b1 = tf.Variable(tf.zeros([16]), name='bias1')
        self.W2 = tf.Variable(tf.random.normal([16, 8]), name='weight2')
        self.b2 = tf.Variable(tf.zeros([8]), name='bias2')
        self.W3 = tf.Variable(tf.random.normal([8, 1]), name='weight3')
        self.b3 = tf.Variable(tf.zeros([1]), name='bias3')

    def forward(self, x): 3 usages (1 dynamic)
        z1 = tf.matmul(x, self.W1) + self.b1
        a1 = tf.nn.relu(z1)
        z2 = tf.matmul(a1, self.W2) + self.b2
        a2 = tf.nn.relu(z2)
        z3 = tf.matmul(a2, self.W3) + self.b3
        return tf.sigmoid(z3)

@property 2 usages (2 dynamic)
def trainable_variables(self):
    return [self.W1, self.b1, self.W2, self.b2, self.W3, self.b3]
```

Рис. 7. Фрагмент листинга кода, описывающий нейронную сеть

<sup>3</sup> Босенко Т.М. *Основы объектно-ориентированного анализа и программирования в Python: учебно-методическое пособие*. М.: Московский городской педагогический университет; 2023, 80 с. [Bosenko T.M. *Osnovy ob'ektno-orientirovannogo analiza i programmirovaniya v Python (Fundamentals of Object-Oriented Analysis and Programming in Python)*: A study guide. Moscow: Moscow City Pedagogical University; 2023, 80 p. (In Russ.)]

<sup>4</sup> Neural network – нейронная сеть.

соответствующих размерностей. Функция forward, являющаяся методом класса NN<sup>4</sup>, реализует прямое распространение сигнала через слои с функциями активации ReLU и сигмоидальной функцией на выходе.

В качестве функции активации для нейронов 1-го и 2-го слоя выбран оператор  $\text{ReLU} = \begin{cases} x, & x > 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases}$  (сокр. от англ. Rectified Linear Unit) [14].

В первую очередь, это обусловлено тем, что оператор ReLU позволяет работать с массивами данных, вычислительно эффективен, устраняет проблему затухающих градиентов и способствует разреженным активациям.

Матрицы весов **W1**, **W2**, **W3** инициализируются случайными значениями, а векторы смещений **b1**, **b2**, **b3** инициализируются нулями.

Прохождение данных через нейронную сеть осуществляется последовательно через три слоя: на первом слое входные данные подвергаются линейному преобразованию посредством умножения на матрицу весов **W1** с добавлением вектора смещений **b1**, после чего к результату применяется нелинейная функция активации ReLU; на втором слое выходные данные предыдущего слоя умножаются на матрицу

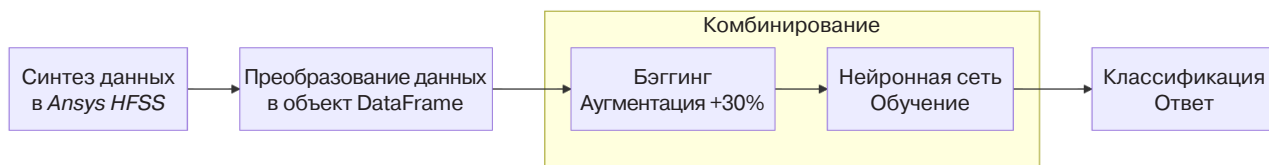


Рис. 8. Схема комбинированного алгоритма распознавания радиоизображений

весов  $W_2$  с добавлением вектора смещений  $b_2$  и аналогично применяется функция ReLU; на выходном слое полученные признаки преобразуются путем умножения на матрицу весов  $W_3$  с добавлением смещения  $b_3$ , а итоговое значение нормализуется с помощью сигмоидальной функции активации для получения вероятности принадлежности к целевому классу [12].

Обучение сети проводится с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. В качестве функции определения потерь используется бинарная перекрестная энтропия, которая измеряет разницу между предсказанными вероятностями и истинными метками. Свойство `trainable_variables` возвращает список всех обучаемых параметров для оптимизатора. В качестве оптимизатора применен алгоритм Adam (сокр. от англ. Adaptive Moment Estimation). Adam является гибридным алгоритмом оптимизации, он вычисляет адаптивные скорости обучения для каждого отдельно взятого параметра, используя оценки первого и второго моментов градиентов. Самым главным преимуществом Adam является возможность работы с большими данными [15]. Обучающая выборка данных предварительно увеличена на 30% в коде программы при помощи метода машинного обучения бэггинг [9].

Процесс обучения включает следующие этапы: прямой проход – вычисление предсказаний для входных значений; вычисление ошибки – сравнение предсказаний с истинными значениями; обратный проход – расчет градиентов, т.е. направлений изменения параметров [12]; обновление весов – корректировка параметров сети для уменьшения ошибки.

Для удаления лишней размерности из предсказаний использована функция `squeeze`, необходимая для корректного вычисления потерь, что позволяет согласовать размерности тензоров прогнозов и истинных значений для расчета функции потерь [16].

Оценку качества предсказаний модели выполняет функция `binary_crossentropy`, которая вычисляет бинарную кроссэнтропию между истинными метками и предсказанными значениями. Это мера различия между двумя распределениями вероятностей позволяет оценить эффективность модели в задачах бинарной классификации, количественно определяя расхождение распределений вероятностей, предсказанных моделью, и истинным распределением меток.

В качестве базы данных для обучения разработанной модели нейронной сети использовалась база нейровизионных данных радиоизображений объектов, представленная в табл. 1. Для проверки корректности вычислений и оценки обобщающей способности модели был создан независимый тестовый бенчмарк объемом в пять радиоизображений: три – от сферических базисов с форм-факторами 0.35, 0.375 и 0.4 м; два – от кубических с форм-факторами 0.45 и 0.475 м. Чрезвычайно важно, что тестовые объекты с промежуточными форм-факторами 0.375 и 0.475 м не были представлены в обучающей выборке, что обеспечивало объективность валидации. Хотя все данные были синтезированы в *Ansys HFSS*, тестовый набор состоял из принципиально новых для модели объектов. Представленная нейронная сеть показала вероятность правильной классификации 0.97 на независимом тестовом наборе. Вероятнее всего такой результат обусловлен тем, что набор данных для обучения – меньшего объема, чем необходимый размер, однако, если не проводить искусственное увеличение выборки данных при помощи бэггинга, то эта же нейронная сеть показывает вероятность правильной классификации 0.93, что на 0.04 меньше. Это существенно повышает итоговую точность модели и доказывает эффективность использования бэггинга для борьбы с переобучением на малых выборках.

Таким образом, разработанный комбинированный алгоритм реализует синергетический подход к обработке радиовизионных данных, последовательно объединяя методы машинного обучения и нейронную сеть. Как показано на схеме (рис. 8), процесс начинается с синтеза исходных данных в *Ansys HFSS* и их преобразования в объект `DataFrame`, после чего ключевой этап комбинирования интегрирует технику бэггинга для аугментации данных и полносвязную нейронную сеть для классификации. Такое сочетание позволяет преодолеть ограничения малого объема исходной выборки за счет искусственного расширения набора данных и одновременно использовать высокую распознающую способность нейросетевой модели, что в совокупности обеспечивает достижение высокой точности классификации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и исследован комбинированный нейровизионный метод распознавания сигнальных радиоизображений объектов на основе машинного обучения и нейронной сети. Метод, сочетающий полностью связанную нейронную сеть и метод машинного обучения бэггинг, позволяет в режиме реального времени классифицировать объекты базисной стереометрической формы по их радиоизображениям, синтезированным в сантиметровом диапазоне частот. Экспериментальные исследования алгоритма проведены на основе базы данных радиовизионных окликов, сгенерированной при помощи построенного программно-численного электродинамического стенда в среде *Ansys HFSS*, позволяющего синтезировать базу данных сигнальных радиоизображений для объектов с заданными форм-факторами и распознавать их при помощи разработанного в работе программного обеспечения на базе нейровизионной сети с тремя полностью связанными слоями и аугментацией данных.

На основе сравнительного анализа методов машинного обучения и нейронных сетей получены экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность предложенного комбинированного подхода для задач радиовидения:

- разработана трехслойная полностью связанная нейронная сеть с функциями активации ReLU и sigmoid, которая достигла вероятности правильной классификации сферических и кубических объектов 0.97;
- установлено, что применение техники аугментации данных (бэггинг) для увеличения обучающей выборки на 30% позволяет повысить вероятность правильной классификации нейронной сетью на 0.04 (с 0.93 до 0.97), что доказывает

эффективность для борьбы с переобучением на малых выборках;

- показано, что из рассмотренных методов машинного обучения алгоритм случайного леса обеспечивает наибольшую вероятность правильной классификации (0.85), что на 0.55 выше, чем у линейной регрессии (0.3), и на 0.12 выше, чем у метода классификации (0.72), однако уступает нейросетевым методам;
- разработан комбинированный алгоритм, интегрирующий технику бэггинга и нейронную сеть с аугментацией данных для классификации, который позволяет достичь вероятности правильной классификации 0.97.

Предложенный комбинированный метод демонстрирует эффективность за счет синергетического использования алгоритма машинного обучения (бэггинг) для аугментации данных и нейронной сети для классификации, что позволяет преодолеть ограничения каждого из методов в отдельности. Вместе с тем, комбинированный метод имеет ряд ограничений, включая зависимость от адекватности синтезированных данных, необходимость валидации объектов сложной геометрии в условиях влияния помех, что определяет направления для дальнейших исследований.

### Вклад авторов

**В.А. Кожемяко** – формулировка целей и задач, практическое исследование комбинированного нейровизионного метода и алгоритма распознавания сигнальных радиоизображений.

**А.Д. Ярлыков** – постановка плана исследований, формулировка выводов.

### Authors' contributions

**V.A. Kozhemyako** – formulation of aims and objectives, practical research of the combined neurovision method and algorithm for recognizing signal radio images.

**A.D. Yarlykov** – formulation of the research plan, formulation of conclusions.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терлецкий А.С., Терлецкая Е.С. *Нейронные сети и искусственный интеллект: Основы нейронных сетей на языке Python*. Липецк: Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тянь-Шанского; 2023, 76 с. <https://www.elibrary.ru/ugipee>
2. Торгаев С.Н., Лежнина И.А., Шульга И.Д. *Практическое руководство по цифровой обработке сигналов: цифровые фильтры и обработка ЭКГ сигналов*. Томск: ООО «СТТ»; 2020, 112 с. <https://www.elibrary.ru/rupfct>
3. Царегородцев М.А. Многопоточная численная реализация криптографических алгоритмов параллельного действия для защиты конфиденциальной информации в оборонно-промышленных комплексах при ее обработке, хранении и передаче в облачное хранилище больших данных. *Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии*. 2023;4(12):104–112. <https://www.elibrary.ru/vvtbii>
4. Курушин А.А. *Гибридное моделирование в HFSS ANSYS: учебное пособие*. М.: СОЛОН-Пресс; 2023, 292 с.
5. Банков С.Е., Курушин А.А. *Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft*. М.: ЗАО «НПП «РОДНИК»; 2009, 256 с.
6. Кожемяко В.А. Получение отклика сигнала от объекта в САПР Ansys. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2024»)*: Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции. Москва, 18–22 ноября 2024 г. М.: РТУ МИРЭА; 2024. С. 381–384. <https://www.elibrary.ru/mwzoxe>

7. Иванова В.Ю., Соловьев Д.О. Обзор методов обработки больших данных с использованием Apache Spark, библиотеки Pandas и SQL. *Наукосфера*. 2024;5(1):43–47. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11241367>, <https://www.elibrary.ru/uljwcm>
8. Хабиб Ж.М.Т., Погуда А.А. Сравнение методов анализа настроений глубокого обучения, включая LSTM и машинное обучение. *Открытое образование*. 2023;27(4):60–71. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2023-4-60-71>
9. Казанцев Т. *Искусственный интеллект и машинное обучение. Основы программирования на Python*. ЛитРес: Самиздат; 2020, 123 с.
10. Большаков Н.И., Сидорова Е.В. Сравнительный анализ методов машинного обучения для задач классификации данных. *Математические методы в технологиях и технике*. 2023;8:66–71. <https://elibrary.ru/zdgmrk>
11. Kouemou G., Opitz F. Impact of Wavelet-Based Signal Processing Methods on Radar Classification Systems Using Hidden Markov Models. In: *2008 International Radar Symposium*. Wroclaw, Poland. 2008. <https://doi.org/10.1109/IRS.2008.4585763>
12. Шевченко А.С., Самарин В.А. *Нейронные сети: учебное пособие*. М.: Ай Пи Ар Медиа; 2025, 181 с.
13. Смирнов Е.Е., Костылева В.В., Муртазина А.Р., Разин И.Б. Сравнение сверточных и полносвязных нейронных сетей применительно к задачам распознавания изображений. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2023;5(407):236–242. <https://elibrary.ru/gvpmmpa>
14. Парамонов А.А., Нгуен В., Нгуен М. Многозадачная нейронная сеть в задаче распознавания вида QAM- и PSK-модуляции в условиях параметрической априорной неопределенности. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):49–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-49-58>
15. Абдулкадиров Р.И., Алиханов А.А., Айдамиров Н.О., Бабаян Р.А., Дадалян А.А., Давыдов Н.М. Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации на примере различных тестовых функций. В сб.: *Высокопроизводительные вычисления для решения прикладных задач: Сборник материалов XII (69-й) ежегодной научно-практической конференции студентов, преподавателей и молодых ученых Северо-Кавказского федерального университета, Ставрополь, 14–27 апреля 2025 года*. Ставрополь; 2025. С. 17–21. <https://elibrary.ru/dqdcfh>
16. Гаунов С.Р., Баймурадов У.Г., Ситников С.Ю. Машинное обучение на Python: использование библиотек Tensorflow и Scikit-Learn. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2024;8(12-153):72–81. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.12.08.009>

## REFERENCES

1. Terletskii A.S., Terletskaya E.S. *Neironnye seti i iskusstvennyi intellekt: Osnovy neironnykh setei na yazyke Python (Neural Networks and Artificial Intelligence: Fundamentals of Neural Networks in Python)*. Lipetsk: Lipetsk State Pedagogical P. Semenov-Tyan-Shansky University; 2023, 76 p. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/ugipee>
2. Torgaev S.N., Lezhnina I.A., Shul'ga I.D. *Prakticheskoe rukovodstvo po tsifrovoi obrabotke signalov: tsifrovye fil'try i obrabotka EHKG signalov (A Practical Guide to Digital Signal Processing: Digital Filters and ECG Signal Processing)*. Tomsk: STG; 2020, 112 p. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/rupfct>
3. Tsaregorodtsev M.A. Multithreaded numerical implementation of cryptographic algorithms of parallel action for protecting confidential information in defense-industrial complexes during its processing, storage and transmission to the cloud storage of big data. *Al'manakh Permskogo voennogo instituta voisk natsional'noi gvardii = Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard Troops*. 2023;4(12):104–112 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vvtbii>
4. Kurushin A.A. *Gibridnoe modelirovanie v HFSS ANSYS (Hybrid Modeling in HFSS ANSYS): A tutorial*. Moscow: SOLON-Press; 2023, 292 p. (In Russ.).
5. Bankov S.E., Kurushin A.A. *Raschet antenna i SVCh struktur s pomoshch'yu HFSS Ansoft (Calculation of Antennas and Microwave Structures using HFSS Ansoft)*. Moscow: RODNIK; 2009, 256 p. (In Russ.).
6. Kozhemyako V.A. Getting a signal response from an object in Ansys CAD. In: *Actual Problems and Prospects for the Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems ("Radioinfocom-2024")*: Collection of scientific articles based on the materials of the 8th International Scientific and Practical Conference. Moscow: RTU MIREA; 2024. P. 381–384 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/mwzoxe>
7. Ivanova V.Yu., Solovyev D.O. Overview of Big Data Processing Methods Using Apache Spark, Pandas Library, and SQL. *Naukosfera = Naukosphere*. 2024;5(1):43–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.11241367>, <https://www.elibrary.ru/uljwcm>
8. Habib J.M.T., Poguda A.A. Comparison of Deep Learning Sentiment Analysis Methods, Including LSTM and Machine Learning. *Otkrytoe Obrazovanie = Open Education*. 2023;27(4):60–71 (in Russ.). <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2023-4-60-71>
9. Kazantsev T. *Iskusstvennyi intellekt i mashinnoe obuchenie. Osnovy programmirovaniya na Python (Artificial Intelligence and Machine Learning. Fundamentals of Python Programming)*. LitRes: Samizdat; 2020, 123 p. (In Russ.).
10. Bolshakov N.I., Sidorova E.V. Comparative Analysis of Machine Learning Methods for Problems of Data Classification. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike = Mathematical Methods in Technology and Engineering*. 2023;8: 66–71 (in Russ.). <https://elibrary.ru/zdgmrk>
11. Kouemou G., Opitz F. Impact of Wavelet-Based Signal Processing Methods on Radar Classification Systems Using Hidden Markov Models. In: *2008 International Radar Symposium*. Wroclaw, Poland. 2008. <https://doi.org/10.1109/IRS.2008.4585763>
12. Shevchenko A.S., Samarina V.A. *Neironnye seti (Neural Networks): A Tutorial*. Moscow: Ai Pi Ar Media; 2025, 181 p. (In Russ.).
13. Smirnov E.E., Kostyleva V.V., Murtazina A.R., Razin I.B. Comparison of Convolutional and Fully Connected Neural Networks in Relation to Image Recognition Tasks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti = Textile Industry Technology. Series: Proceedings of Higher Educational Institutions*. 2023;5(407): 236–242 (in Russ.). <https://elibrary.ru/gvpmmpa>

14. Paramonov A.A., Nguyen V.M., Nguyen M.T. Multi-task neural network for solving the problem of recognizing the type of QAM and PSK modulation under parametric a priori uncertainty. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):49–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-49-58>
15. Abdulkadirov R.I., Alikhanov A.A., Aidamirov N.O., Babayan R.A., Dadalyan A.A., Davydov N.M. Comparative analysis of optimization algorithms using various test functions. In: *High-Performance Computing for Solving Applied Problems: Collection of materials of the 12th (69th) Annual Scientific and Practical Conference of Students, Teachers, and Young Scientists of the North Caucasus Federal University*. Stavropol; 2025. P. 17–21 (in Russ.). <https://elibrary.ru/dqdcfh>
16. Gaunov S.R., Baimuradov U.G., Sitnikov S.Yu. Machine learning in Python: using Tensorflow and Scikit-Learn libraries. *Ehkonomika i upravlenie: problemy, resheniya = Economics and Management: Problems, Solutions*. 2024;8(12-153):72–81 (in Russ.). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.12.08.009>

#### Об авторах

**Кожемяко Владислав Александрович**, 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: kozhemyako@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4210-0353, <http://orcid.org/0009-0009-8512-2288>

**Ярлыков Алексей Дмитриевич**, к.т.н., старший преподаватель, 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: yarlykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57290652000, SPIN-код РИНЦ 3450-1587, <https://orcid.org/0000-0002-7232-8588>

#### About the Authors

**Vladislav A. Kozhemyako**, 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: kozhemyako@mirea.ru. SPIN-code RSCI 4210-0353, <http://orcid.org/0009-0009-8512-2288>

**Alexey D. Yarlykov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, 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: yarlykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57290652000, RSCI SPIN-code 3450-1587, <https://orcid.org/0000-0002-7232-8588>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния  
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 537.632

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-72-82>

EDN JXIQMS



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Применение метода Берремана при моделировании магнитооптических эффектов Керра в многослойных структурах

И.В. Гладышев, А.Н. Юрасов, М.М. Яшин ©

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

© Автор для переписки, e-mail: [yashin@mirea.ru](mailto:yashin@mirea.ru)

• Поступила: 22.04.2025 • Доработана: 05.05.2025 • Принята к опубликованию: 24.03.2026

### Резюме

**Цели.** Материалы, состоящие из множества ультратонких слоев, каждый из которых имеет толщину порядка нескольких нанометров, являются перспективным классом композитных структур с уникальными физическими характеристиками, не присущими традиционным материалам. Они представляют значительный интерес в научной и промышленной сферах благодаря своей многофункциональности и широким возможностям применения. Особое внимание исследователей привлекают структуры, включающие как магнитные, так и немагнитные слои. Исследование магнитооптических явлений, в частности эффекта Керра, в данных структурах способствует углублению понимания их физических свойств и расширению возможностей их практического применения. Для корректной интерпретации экспериментальных данных необходимо учитывать возможные интерференционные эффекты. В связи с этим возникает потребность в разработке математической модели структуры и сопоставлении экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. Целью настоящего исследования является анализ одного из методов моделирования многослойных структур, в которых всесторонне теоретически рассматриваются все три магнитооптических эффекта Керра (полярный, меридиональный, экваториальный) с получением универсальных формул.

**Методы.** Для моделирования всех трех магнитооптических эффектов Керра в многослойных тонкопленочных структурах применяется метод Берремана, основанный на матричном представлении дифференциальных уравнений Максвелла.

**Результаты.** Для оптически изотропных материалов получены матрицы Берремана, соответствующие экспериментальным геометриям, необходимым для наблюдения экваториального, полярного и меридионального эффектов Керра. Предложен метод учета толстых слоев в исследуемой структуре.

**Выводы.** Использование метода Берремана с применением матриц, представленных в данной работе, для анализа магнитооптических эффектов Керра в изотропной среде позволило получить точные формулы магнитооптических эффектов и обеспечило более точное моделирование сложных многослойных структур, а также способствует углубленному пониманию их физических характеристик, открывая возможности для анализа и поиска широкого спектра материалов.

**Ключевые слова:** магнитооптические эффекты Керра, метод Берремана, матрица Берремана, тензор диэлектрической проницаемости, многослойные структуры

**Для цитирования:** Гладышев И.В., Юрасов А.Н., Яшин М.М. Применение метода Берремана при моделировании магнитооптических эффектов Керра в многослойных структурах. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):72–82. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-72-82>, <https://www.elibrary.ru/JXIQMS>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Application of the Berreman formalism for modeling magneto-optical Kerr effects in multilayered structures

Igor V. Gladyshev, Alexey N. Yurasov, Maxim M. Yashin <sup>®</sup>

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>®</sup> Corresponding author, e-mail: [yashin@mirea.ru](mailto:yashin@mirea.ru)

• Submitted: 22.04.2025 • Revised: 05.05.2025 • Accepted: 24.03.2026

### Abstract

**Objectives.** Materials composed of numerous ultrathin layers, each having a thickness on the order of several nanometers, constitute an advanced class of composite structures exhibiting unique physical properties not typically found in conventional materials. These materials are of significant interest in both scientific and industrial sectors due to their adaptability and broad potential for application. Researchers are particularly intrigued by structures incorporating both magnetic and non-magnetic layers. The investigation of magneto-optical phenomena—particularly the Kerr effect—within these structures contributes to a deeper understanding of their physical characteristics, as well as enhancing prospects for their practical implementation. Since, to ensure the accurate interpretation of experimental data, it is imperative to consider potential interference effects, it becomes necessary to develop a mathematical model of the structure for comparing experimental findings with theoretical calculations. The purpose of this study is to analyze one of the modeling methods for multilayer structures in which magneto-optical Kerr effects can manifest themselves in individual or all layers.

**Methods.** The Berreman method, which is based on the matrix representation of Maxwell's differential equations, is used to model all three magneto-optical Kerr effects (polar, longitudinal, transverse) in multilayer thin-film structures.

**Results.** For optically isotropic materials, Berreman matrices have been derived for experimental configurations required to observe the transverse, polar, and longitudinal Kerr effects. A method is additionally proposed to account for the influence of thick layers within the investigated structure.

**Conclusions.** For the matrices presented in this paper, the Berreman method was used to analyze magneto-optical Kerr effects in an isotropic medium. As well as allowing us to obtain accurate formulas for magneto-optical effects, this provided more accurate modeling of complex multilayer structures, as well as contributing to an in-depth understanding of their physical characteristics, which provides new opportunities for analyzing and searching a wide range of materials.

**Keywords:** magneto-optical Kerr effects, Berreman method, Berreman matrix, dielectric constant tensor, multilayer structures

**For citation:** Gladyshev I.V., Yurasov A.N., Yashin M.M. Application of the Berreman formalism for modeling magneto-optical Kerr effects in multilayered structures. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):72–82. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-72-82>, <https://www.elibrary.ru/JXIQMS>

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

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Открытие Майклом Фарадеем в 1845 г. взаимодействия света с намагниченным веществом привело впоследствии к открытию множества линейных и нелинейных, прямых и обратных магнитооптических эффектов как в видимой, так и в инфракрасной, ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. Эта область физики получила название магнитооптики или магнитофотоники. Эффекты Керра, включая магнитооптические эффекты отражения, являются фундаментальной основой для метода магнитооптической керр-спектроскопии. Данный метод позволяет проводить анализ магнитного состояния локальных областей образца на глубине формирования магнитооптического сигнала. Исследование спектральных зависимостей магнитооптического эффекта Керра при различных длинах волн излучения предоставляет возможность получения информации о магнитооптических переходах, отражающих электронную, кристаллическую и магнитную структуру исследуемого локального участка образца [1–4]. Таким образом магнитооптическая спектроскопия является важным инструментом исследования микро- и наноструктур, включая многослойные системы.

Многослойные магнитные структуры обладают значительным потенциалом для применения в различных областях науки и техники, что делает их объектом повышенного интереса со стороны исследователей. В последние годы отмечается рост научного интереса к изучению и разработке данных структур, что сопровождается увеличением числа научных публикаций, посвященных их исследованию. Особое внимание уделяется системам, состоящим из сильномагнитных (ферромагнетики и ферримагнетики) и слабомагнитных материалов [5–8].

Однако моделирование структур, включающих слои материалов с магнитооптическими свойствами, представляет собой более сложную задачу по сравнению с расчетом оптических систем, состоящих из изотропных сред. Получение аналитических выражений для определенного количества магнитных слоев, таких как в [9], при возможном увеличении их числа представляет собой трудоемкую задачу, а при значительном количестве магнитных слоев становится нереализуемым. В рамках метода матриц Джонса, как правило, рассматривается случай нормального падения света на структуру.

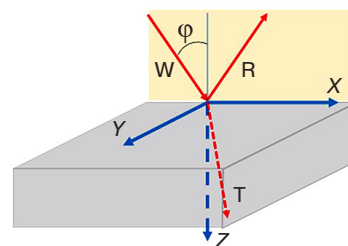
## МЕТОД БЕРРЕМАНА

Более полувека назад Берреман предложил метод расчета распространения электромагнитных волн с использованием комплексных матриц размером  $4 \times 4$ , основанный на матричном представлении уравнений Максвелла [10]. Этот метод отличается высокой

точностью и универсальностью, что позволяет учитывать особенности распространения света в сложных анизотропных структурах, включая многослойные системы. Однако, несмотря на его преимущества, метод Берремана не получил широкого распространения из-за высокой вычислительной сложности и сложности расчета матриц в общем случае. Тем не менее, при решении задач, связанных с оптической анизотропией (одноосной, двуосной) и необходимостью учета магнитной анизотропии или оптической активности среды, преимущества метода Берремана часто оказываются значительными, что делает его применение обоснованным в соответствующих условиях. Одной из наиболее сложных задач в методе Берремана является вычисление экспоненты матрицы. Однако существует ряд приемов, разработанных для вычисления данной экспоненты с различной степенью точности [11]. При недостаточной точности можно разделить рассчитываемый слой на более мелкие подслои. Кроме того, в научной литературе представлен достаточно точный и эффективный алгоритм, позволяющий вычислять матрицы Берремана для слоев значительной толщины [12]. В отдельных случаях, таких как одноосная среда, матрица Берремана может быть вычислена аналитически. В данной работе также приведены точные матрицы для однородных сред с индуцированной оптической активностью для геометрий, соответствующих экваториальному, полярному и меридиональному эффектам Керра.

В методе Берремана анализируется распространение плоской монохроматической волны через однородную среду. Одномерная неоднородная среда может быть описана посредством системы плоскопараллельных слоев, каждый из которых может считаться однородным.

Рассмотрим суть метода, используя систему координат, представленную на рис. 1. Предположим также, что по обеим сторонам исследуемого слоя находится воздух. Следовательно, среда, из которой свет падает на слой материала и в которую он проходит после прохождения через этот слой, является однородной, непоглощающей и имеет показатель преломления, равный единице.



**Рис. 1.** Используемая система координат:  $X, Y, Z$  – оси координат;  $\varphi$  – угол падения света;  $W$  – падающий,  $R$  – отраженный и  $T$  – прошедший лучи света

Поскольку волна является монохроматической, временная зависимость всех составляющих электрического ( $E$ ) и магнитного ( $H$ ) полей имеет следующую форму:  $e^{-i\omega t}$ . В рамках рассматриваемой геометрии проекция волнового вектора на ось  $x$ , обозначаемая как  $k_x$ , одинакова для всех волн и принимает следующее значение:

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота,  $\varphi$  – угол падения,  $c$  – скорость света в вакууме.

Тогда систему уравнений Максвелла можно записать в виде:

$$\mathbf{R}\Psi = -i\omega\mathbf{M}\Psi, \quad (2)$$

где  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{M}$  – блочные матрицы размерности  $6 \times 6$ ,  $\Psi$  – матрица-столбец, содержащие следующие элементы:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{rot} \\ -\mathbf{rot} & \mathbf{O} \end{pmatrix}, \mathbf{M} = \begin{pmatrix} \hat{\varepsilon} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \hat{\mu} \end{pmatrix}, \Psi = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix}.$$

Здесь  $\mathbf{O}$  – нулевая матрица размерности  $3 \times 3$ , и для нашего случая,

$$\mathbf{rot} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & -ik_x \\ 0 & ik_x & 0 \end{pmatrix},$$

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix},$$

$$\hat{\mu} = \mu_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные, соответственно.

В процессе решения соотношения (2) формируется система, включающая два линейных однородных алгебраических уравнения и четыре дифференциальных уравнения. Алгебраические уравнения разрешаются относительно компонент поля  $E_z$  и  $H_z$ , после чего полученные выражения подставляются в дифференциальные уравнения. В результате

получается система из четырех линейных однородных дифференциальных уравнений 1-го порядка, содержащая неизвестные компоненты полей  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$  и  $H_y$ :

$$\frac{\partial}{\partial z} \xi = i\omega\Delta\xi, \quad (3)$$

где  $\xi$  – матрица-столбец вида:

$$\xi = \begin{pmatrix} E_x \\ H_y \\ E_y \\ -H_x \end{pmatrix},$$

а  $\Delta$  – дифференциальная матрица распространения для данной среды, размерности  $4 \times 4$ .

Как было указано ранее, среда делится на слои, в пределах которых компоненты матрицы  $\Delta$  не зависят от координаты  $z$ . В каждом слое толщиной  $h$  решение соответствующего однородного дифференциального уравнения первого порядка (3) имеет вид:

$$\xi(z+h) = e^{i\omega h\Delta} \xi(z) \equiv \mathbf{P}(h)\xi(z).$$

Таким образом, матрица  $\mathbf{P}$  – матрица Берремана данного слоя выглядит следующим образом:

$$\mathbf{P}(h) = e^{i\omega h\Delta}. \quad (4)$$

Когда оптические параметры среды зависят от  $z$ , например, для структуры из однородных слоев, в пределах которых оптические параметры рассматриваются постоянными, интегрирование уравнения (3) сводится к перемножению соответствующих матриц для индивидуальных слоев:

$$\mathbf{P} = \prod_{j=1}^n \mathbf{P}_j.$$

Матрица следующего слоя умножается на предыдущие слева:

$$\xi(h) = \{\mathbf{P}_n \cdot \mathbf{P}_{n-1} \cdot \mathbf{P}_{n-2} \cdot \dots \cdot \mathbf{P}_3 \cdot \mathbf{P}_2 \cdot \mathbf{P}_1\} \xi(0).$$

Электромагнитное поле с одной стороны структуры определяется суперпозицией падающей и отраженной волн, а с другой имеется только прошедшая волна. Тогда:

$$\xi_T = \mathbf{P}(\xi_W + \xi_R). \quad (5)$$

Индексы W, R и T обозначают, соответственно, падающую, отраженную и прошедшую волны согласно обозначениям, представленным на рис. 1. Умножая обе части уравнения (5) слева на матрицу  $\mathbf{F} = \mathbf{P}^{-1}$ , обратную матрице Берремана слоя, получаем систему линейных уравнений, которая может быть решена относительно компонентов отраженной и прошедшей волн. Для идентификации

принадлежности к соответствующей волне, присвоим компонентам поля верхние индексы, соответствующие обозначениям на рис. 1. Нижние индексы компонентов поля указывают на направление проекции рассматриваемого компонента на соответствующую ось. Перечислим их, чтобы читатели могли применить их в своей деятельности.

$$E_y^T = \frac{2(\chi_1 E_y^W - \alpha \chi_2 E_x^W)}{d - ag}, E_x^T = \frac{2\chi_2 E_x^W - g E_y^T}{b},$$

$$E_y^R = \beta_3 E_x^T + \gamma_3 E_y^T - E_y^W, \quad (6)$$

$$E_x^R = \beta_1 E_x^T + \gamma_1 E_y^T - E_x^W,$$

где

$$a = \frac{\beta_4 + \chi_1 \beta_3}{\beta_2 + \chi_2 \beta_1}, b = \beta_2 + \chi_2 \beta_1, g = \gamma_2 + \chi_2 \gamma_1, d = \gamma_4 + \chi_1 \gamma_3,$$

$$\beta_1 = f_{11} + \chi_2 f_{12}, \gamma_1 = f_{13} + \chi_1 f_{14},$$

$$\beta_2 = f_{21} + \chi_2 f_{22}, \gamma_2 = f_{23} + \chi_1 f_{24},$$

$$\beta_3 = f_{31} + \chi_2 f_{32}, \gamma_3 = f_{33} + \chi_1 f_{34},$$

$$\beta_4 = f_{41} + \chi_2 f_{42}, \gamma_4 = f_{43} + \chi_1 f_{44},$$

$$\chi_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \varphi, \chi_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi},$$

$f_{11}, f_{12}, \dots, f_{44}$  – элементы матрицы  $\mathbf{F} = \mathbf{P}^{-1}$ , обратной матрице Берремана.

Зная величины компонент поля световой волны, можно рассчитать поворот поляризации, а также коэффициенты отражения  $K_R$  и пропускания  $K_T$ :

$$K_R = \frac{|E_x^R / \cos \varphi|^2 + |E_y^R|^2}{|E_x^W / \cos \varphi|^2 + |E_y^W|^2}, \quad (7)$$

$$K_T = \frac{|E_x^T / \cos \varphi|^2 + |E_y^T|^2}{|E_x^W / \cos \varphi|^2 + |E_y^W|^2},$$

но предварительно необходимо определить матрицы Берремана для моделируемой структуры и ее отдельных слоев.

## МАТРИЦЫ БЕРРЕМАНА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ КЕРРА

Магнитооптические явления проявляются в изменении оптических свойств пленки (структуры) в зависимости от наличия или отсутствия магнитного поля. В связи с этим, для их моделирования требуется определить матрицы Берремана для обоих сценариев. В рассматриваемых нами случаях, они все могут быть получены аналитически.

Путь для нахождения матрицы для изотропного слоя в отсутствие магнитного поля показан Берреманом в одной из первых работ [10]. Подставляя в уравнение (2) тензор диэлектрической проницаемости в виде:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \epsilon \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

получаем дифференциальную, размерности  $4 \times 4$ , матрицу распространения  $\Delta_0$  для данной среды:

$$\Delta_0 = \begin{pmatrix} 0 & U_a & 0 & 0 \\ U_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_s \\ 0 & 0 & U_d & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где

$$U_a = \frac{\mu_0}{\epsilon} (\epsilon - \sin^2 \varphi), U_b = \epsilon_0 \epsilon, U_s = \mu_0, \quad (9)$$

$$U_d = \epsilon_0 (\epsilon - \sin^2 \varphi).$$

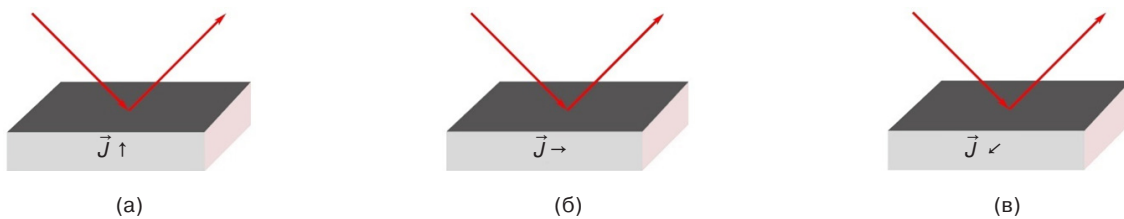
В соответствии с уравнением (4), для получения матрицы Берремана необходимо взять экспоненту от матрицы (8), умноженной на  $i\omega h$ . Наиболее простой и наглядный способ это сделать – разложить экспоненту в ряд Тейлора. Суммируя члены ряда, можно заметить, что элементы получающейся матрицы также представляют собой разложения в ряд Тейлора некоторых функций. В результате для матрицы Берремана изотропной однородной среды  $\mathbf{P}_0$  можно записать:

$$\mathbf{P}_0(h) = \begin{pmatrix} \cos(\omega h \chi_0) & i\beta_0 \sin(\omega h \chi_0) & 0 & 0 \\ i\beta_0^{-1} \sin(\omega h \chi_0) & \cos(\omega h \chi_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega h \chi_0) & i\delta_0^{-1} \sin(\omega h \chi_0) \\ 0 & 0 & i\delta_0 \sin(\omega h \chi_0) & \cos(\omega h \chi_0) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Здесь

$$\chi_0 = \frac{1}{c} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}, \beta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}}{\varepsilon}, \delta_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}. \quad (11)$$

В зависимости от конфигурации магнитного поля и падения света на пленку или структуру различают три магнитооптических эффекта Керра: полярный, меридиональный и экваториальный. Полярный эффект Керра возникает при ориентации вектора намагниченности  $\vec{J}$ , в частности, создаваемой внешним магнитным полем, перпендикулярно плоскости пленки и параллельно плоскости падения света (рис. 2а). Меридиональный эффект Керра проявляется, когда вектор намагниченности ориентирован параллельно поверхности пленки и лежит в плоскости падения света (рис. 2б). Экваториальный эффект Керра наблюдается при ориентации вектора намагниченности перпендикулярно плоскости падения света и параллельно структуре пленки (рис. 2в).



**Рис. 2.** Геометрия наблюдения магнитооптических эффектов Керра:

(а) полярного, (б) меридионального, (в) экваториального. Направления осей координат показаны на рис. 1

Необходимо отметить, что  $s$ - и  $p$ -компоненты электрического поля световой волны в данной геометрии связаны с проекциями на оси следующим образом:  $E_s = E_y, E_p = E_x / \cos \varphi$ . Зная  $E_s$  и  $E_p$ , можно вычислить угол поворота плоскости поляризации для плоскополяризованной волны  $\theta_0 = \arctg(|E_s|/|E_p|)$  или, при наличии ненулевой разности фаз  $\phi$  между  $E_s$  и  $E_p$ , азимутальный угол  $\theta_\phi$ , который составляет с плоскостью падения главная ось эллипса поляризации  $\theta_\phi = \arctg(|E_s|/|E_p|) \cos \phi$ . Эллиптичность  $e$  может быть рассчитана по формуле:  $e = \tg[0.5 \arcsin(-2 \operatorname{Im}(\Xi)/(1 - |\Xi|^2))]$ , где  $\Xi = (|E_s|/|E_p|) e^{i\phi}$  [13, 14]. Именно эти величины измеряются в меридиональном и полярном эффекте Керра, в экваториальном же эффекте главное – это изменение интенсивности отраженной электромагнитной волны.

Начнем рассмотрение именно с экваториального эффекта Керра (рис. 2в). В этом случае тензор диэлектрической проницаемости среды в принятой системе координат можно записать в виде:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_0 \varepsilon \begin{pmatrix} 1 & 0 & iQ \\ 0 & 1 & 0 \\ -iQ & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где  $Q$  – магнитооптический параметр.

В этом случае в результате решения уравнения (2) получаем следующую матрицу распространения  $\Delta_T$  (Т – экваториальный эффект Керра (англ. transverse Kerr effect)):

$$\Delta_T = \begin{pmatrix} i\eta & U_a & 0 & 0 \\ U_b^* & -i\eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_s \\ 0 & 0 & U_d & 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Здесь

$$U_b^* = U_b(1 - Q^2), \eta = \frac{\sin \varphi}{c} Q.$$

Матрицу (12) можно представить в виде суммы матриц:

$$\Delta_T = \Delta_T^J + \Delta_T^* = \begin{pmatrix} i\eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i\eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & U_a & 0 & 0 \\ U_b^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_s \\ 0 & 0 & U_d & 0 \end{pmatrix}.$$

Ввиду того, что структура матрицы  $\Delta_T^*$  идентична структуре матрицы  $\Delta_0$ , экспонента матрицы  $\Delta_T^*$  будет иметь форму, аналогичную (10). Экспоненту матрицы  $\Delta_T^J$ , домноженной на  $i\omega h$ , также будем искать через разложение в ряд Тейлора. К счастью, в этом случае элементы получающейся матрицы также представляют из себя разложения в ряд. В результате получаем:

$$e^{i\omega h \Delta_T^J} = \begin{pmatrix} e^{-\omega h \eta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\omega h \eta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Окончательно, матрица Берремана в данном случае будет иметь вид:

$$\mathbf{P}_T(h) = e^{i\omega h \Delta_T^J} e^{i\omega h \Delta_T^*}, \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_T(h) = \begin{pmatrix} e^{-\omega h \eta} \cos(\omega h \chi_T) & i e^{-\omega h \eta} \beta_T \sin(\omega h \chi_T) & 0 & 0 \\ i e^{\omega h \eta} \beta_T^{-1} \sin(\omega h \chi_T) & e^{\omega h \eta} \cos(\omega h \chi_T) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega h \chi_0) & i \delta_0^{-1} \sin(\omega h \chi_0) \\ 0 & 0 & i \delta_0 \sin(\omega h \chi_0) & \cos(\omega h \chi_0) \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где

$$\chi_T = \chi_0 \sqrt{1 - Q^2}, \quad \beta_T = \beta_0 / \sqrt{1 - Q^2}.$$

В процессе вычисления матрицы (14) был осуществлен переход от операции сложения матриц к операции умножения их экспонент, которые также являются матрицами. Следует отметить, что операция умножения матриц, в отличие от операции сложения, в общем случае не является коммутативной. В случае использования обратного порядка умножения матрица (14) будет иметь другой вид – изменения затронут элементы  $P_{12}$  и  $P_{21}$ , входящие в них экспоненты поменяются местами.

Порядок умножения, показанный в (13), был выбран по следующим причинам. Во-первых, из общих соображений, модификации, вызванные магнитооптическим эффектом, проявляются после прохождения светового излучения через пленку (структуру), а не до его взаимодействия с ней, а, во-вторых, результаты расчетов [15] величины экваториального эффекта Керра для пленки кобальта на кремниевой подложке (рис. 3) демонстрируют, что при использовании порядка умножения (13) достигается результат, который по характеру спектральной зависимости и порядку величины согласуется с экспериментами. В то же время, применение обратного порядка умножения приводит к результатам моделирования, которые полностью не соответствуют экспериментальным данным.

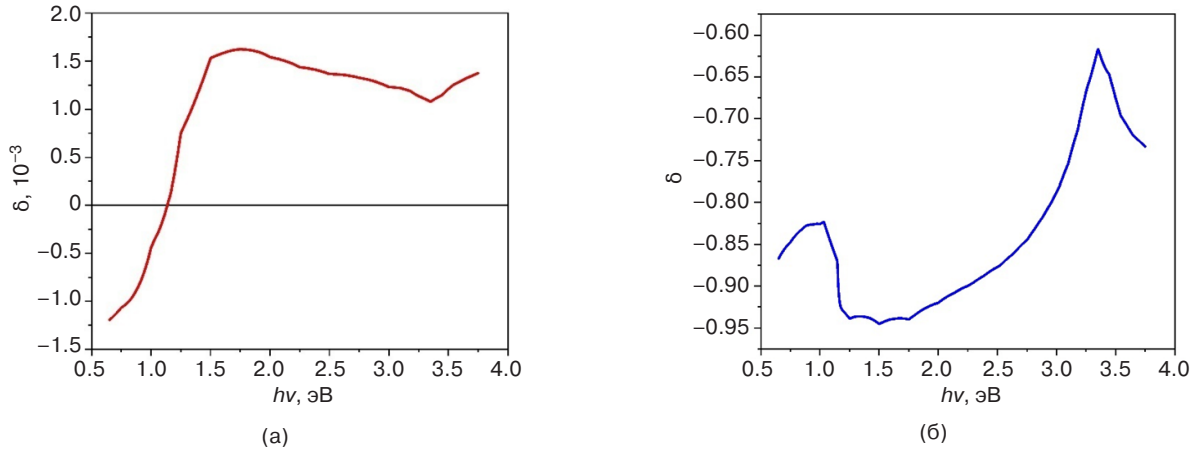
Для случая полярного эффекта Керра (рис. 2а) тензор диэлектрической проницаемости в используемых координатах может быть представлен как

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_0 \varepsilon \begin{pmatrix} 1 & iQ & 0 \\ -iQ & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Из (2) получаем:

$$\Delta_P = \begin{pmatrix} 0 & U_a & 0 & 0 \\ U_b & 0 & i\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_s \\ -i\zeta & 0 & U_d & 0 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где  $\zeta = \varepsilon_0 \varepsilon Q$ .



**Рис. 3.** Результаты моделирования спектральной зависимости экваториального эффекта Керра (\$\delta\$) пленки кобальта на кремниевой подложке с учетом порядка перемножения матриц: (а) представленного в (13), (б) обратного. \$h\nu\$ – энергия фотона

Здесь также можно рассмотреть сумму матрицы (7) и

$$\Delta_P^J = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -i\zeta & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

В силу того, что уже вторая степень матрицы (16) равняется нулю,

$$e^{i\omega h \Delta_P^J} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\omega h \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \omega h \zeta & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Порядок умножения матриц рассмотрен при выводе выражения для экваториального эффекта. В результате матрица Берремана для полярного эффекта принимает вид:

$$\mathbf{P}_P(h) = \begin{pmatrix} \cos(\omega h \chi_0) & i\beta_0 \sin(\omega h \chi_0) & 0 & 0 \\ i\beta_0^{-1} \sin(\omega h \chi_0) & \cos(\omega h \chi_0) & -\omega h \zeta \cos(\omega h \chi_0) & -i\omega h \zeta \delta_0^{-1} \sin(\omega h \chi_0) \\ 0 & 0 & \cos(\omega h \chi_0) & i\delta_0^{-1} \sin(\omega h \chi_0) \\ \omega h \zeta \cos(\omega h \chi_0) & i\omega h \zeta \beta_0 \sin(\omega h \chi_0) & i\delta_0 \sin(\omega h \chi_0) & \cos(\omega h \chi_0) \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Применяя аналогичные рассуждения, можно вывести матрицу Берремана для случая меридионального эффекта Керра (рис. 2б). В этом случае:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_0 \varepsilon \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & iQ \\ 0 & -iQ & 1 \end{pmatrix}$$

и

$$\mathbf{P}_M(h) = \begin{pmatrix} \cos(\omega h \chi_0) & i\beta_0 \sin(\omega h \chi_0) & -\rho \cos(\omega h \chi_M) & -i\rho \delta_M^{-1} \sin(\omega h \chi_M) \\ i\beta_0^{-1} \sin(\omega h \chi_0) & \cos(\omega h \chi_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega h \chi_M) & i\delta_M^{-1} \sin(\omega h \chi_M) \\ i\rho \beta_0^{-1} \sin(\omega h \chi_0) & \rho \cos(\omega h \chi_0) & i\delta_M \sin(\omega h \chi_M) & \cos(\omega h \chi_M) \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Здесь

$$\rho = \frac{\omega}{c} Q \sin \varphi, \quad \chi_M = \frac{1}{c} \sqrt{\varepsilon(1+Q^2) - \sin^2 \varphi}, \quad \delta_M = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{\varepsilon(1+Q^2) - \sin^2 \varphi}.$$

## УЧЕТ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ

В методе Берремана учитываются интерференционные эффекты. Однако в моделируемых структурах могут присутствовать достаточно толстые слои, толщина которых превосходит длину когерентности источника света  $l_{\text{coh}}$ . Такие слои, как правило, представляют собой подложки, на которые наносятся пленки и сложные структуры, но при этом и исследуемые структуры могут включать в себя определенное количество толстых слоев. Принцип учета таких слоев основывается на методе усреднения, при котором отклонения от когерентности рассматриваются как случайные величины, подчиняющиеся нормальному распределению [16]. Данный подход требует привлечения дополнительных вычислительных мощностей, однако он позволяет учитывать слои промежуточной толщины, в которых наблюдается частичное нарушение условия когерентности. В элементах матрицы Берремана толстого слоя производится замена частоты  $\omega$  на сумму  $(\omega + w)$ , где  $w$  – случайная величина, распределенная по нормальному закону. Все характеристики среды, зависящие от частоты, при этом не изменяются. Таким образом, введение переменной  $w$  влияет только на изменение фазы. Математическое ожидание  $M_w = 0$ . Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_w$  зависит от толщины слоя и берется из условия, что при толщине слоя, равном длине когерентности излучения, произойдет набег фазы  $\pi$ :

$$\sigma_w = \frac{h}{l_{\text{coh}}} \pi.$$

Усреднению подлежит величина рассчитываемого эффекта для всей структуры. Рассмотрим случай, когда тонкопленочная структура наносится на толстую подложку с толщиной  $h_{\text{sub}}$ . Тогда отражение от такой структуры вычисляется как:

$$\langle R \rangle = \frac{1}{\sqrt{2\pi^3}} \cdot \frac{l_{\text{coh}}}{h_{\text{sub}}} \int_{-\infty}^{\infty} R'(w) e^{-\frac{l_{\text{coh}}^2 - w^2}{2\pi^2 h_{\text{sub}}^2}} dw.$$

Значения  $R'(w)$  определяются в соответствии с уравнением (7) для частоты излучения  $\omega_0$ . При этом в матрицах всех слоев, кроме слоя, подвергающегося усреднению, берется  $\omega = \omega_0$ . В усредняемом слое берется  $\omega = \omega_0 + w$ . Все характеристики материалов для всех слоев берутся для частоты  $\omega_0$ . Если толстых слоев несколько, проводится кратное интегрирование.

Другая проблема толстых слоев связана с тем, что при большом поглощении в процессе выполнения промежуточных вычислений для матрицы или ее обратной матрицы может возникнуть ситуация

переполнения. Для решения данной проблемы предлагается ввести определенную погрешность в расчеты. Максимальная допустимая толщина поглощающих слоев будет определяться, исходя из условия, что при прохождении этих слоев амплитуда световой волны уменьшается на 5–7 порядков. Это позволит избежать ситуации переполнения данных, и при этом внесенная погрешность будет заведомо меньше погрешностей эксперимента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования предложено использовать метод Берремана для моделирования всех трех магнитооптических эффектов Керра – полярного, меридионального и экваториального. Матричный метод Берремана, представленный в данной работе, позволяет системно анализировать магнитооптические эффекты Керра в изотропной среде в рамках полученных точных формул магнитооптических эффектов. Это обеспечивает хорошую базу для более точного моделирования сложных многослойных структур, а также способствует углубленному пониманию их физических характеристик, открывая возможности для поиска широкого спектра перспективных магнитных материалов. В работе предложены подходы к учету наличия в моделируемой структуре пленок, толщина которых превышает длину когерентности источника света, что расширяет рассматриваемые классы микро- и наноструктур.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005).

## ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment for Universities No. FGFZ-2023-0005).

### Вклад авторов

**И.В. Гладышев** – разработка методики, моделирование, обсуждение результатов, подготовка статьи и ее редактирование.

**А.Н. Юрасов, М.М. Яшин** – обсуждение результатов, подготовка статьи и ее редактирование.

### Authors' contributions

**I.V. Gladyshev** – methodology development, modeling, discussion of the results, drafting an article and its editing.

**A.N. Yurasov, M.M. Yashin** – discussion of the results, preparation of the article and its editing.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыльков В.В., Емельянов А.В., Николаев С.Н., Никируй К.Э., Ситников А.В., Фадеев Е.А., Демин В.А., Грановский А.Б. Транспортные свойства магнитных наногранулированных композитов с диспергированными ионами в изолирующей матрице. *Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ)*. 2020;158(1):164–183. <https://doi.org/10.31857/S0044451020070159>
2. Martyshev M.N., Emelyanov A.V., Demin V.A., et al. Multifilamentary Character of Anticorrelated Capacitive and Resistive Switching in Memristive Structures Based on  $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  Nanocomposite. *Phys. Rev. Appl.* 2020;14:034016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.034016>
3. Gao C.N., Yang Y.X., Xiong Y.Q., et al. Low critical current density for spin-transfer torque in Fe-MgO granular film at room temperature. *J. Phys. D*. 2014;47(4):045003. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/4/045003>
4. Ганьшина Е.А., Гаршин В.В., Перова Н.Н., Припеченков И.М., Юрасов А.Н., Яшин М.М., Рыльков В.В., Грановский А.Б. Магнитооптическая Керр-спектроскопия нанокompозитов. *Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ)*. 2023;164(4):662–672.
5. Павлов В.В., Усачев П.А., Неведов С.Г., Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Писарев Р.В. Оптические и магнитооптические свойства многослойных наноразмерных пленок  $[\text{Co}/\text{TiO}_2]_n$ . *Физика твердого тела (ФТТ)*. 2018;60(11):2203–2212. <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.11.46664.26NN>
6. Gladyshev I.V., Ganshina E.A., Simdyanova M.A., et al. Optical and Magneto-Optical Properties of Multilayer Magnetic Structures Based on Permalloy. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024;88(1):S76–S79. <https://doi.org/10.1134/S1062873824708821>
7. Яшин М.М., Рябухин В.Е., Юрасов А.Н. Магнитооптический экваториальный эффект Керра в нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$ . *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):115–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-115-121>
8. Макаров Д.Г., Данилов В.В., Коваленко В.Ф. Многослойные структуры с управляемым магнитным полем пропусканием света. *Журнал технической физики (ЖТФ)*. 2004;74(5):77–82.
9. Маевский В.М. Теория магнитооптических эффектов в многослойных системах с произвольной ориентацией намагниченности. *Физика металлов и металловедение*. 1985;50(2):213–219.
10. Berreman D.W. Optics in Stratified and Anisotropic Media: 4x4-Matrix Formulation. *J. Opt. Soc. Am.* 1972;62(4):502–510. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.000502>
11. Moler C., Van Loan C. Nineteen Dubious Ways to Compute the Exponential of a Matrix, Twenty-Five Years Later. *SIAM Review*. 2003;45(1):3–49. <https://doi.org/10.1137/s00361445024180>
12. Палто С.П. Алгоритм решения оптической задачи для слоистых анизотропных сред. *Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ)*. 2001;119(4):638–648. [https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r\\_119\\_0638.pdf](https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r_119_0638.pdf)
13. Наседкина Ю.Ф., Семенов Д.И. Распределение поляризации в гауссовом пучке, отраженном от резонансной среды. *Письма в Журнал технической физики*. 2006;32(8):1–9.
14. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн. Линейные и нелинейные волны*. М.: Ленанд; 2019, 448 с.
15. Гладышев И.В. *Программа расчета величины экваториального эффекта Керра многослойной тонкопленочной структуры: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*. 2025617039 РФ. Заявка № 2025615502; заявл. 13.03.2025; опубл. (зарег.) 21.03.2025.
16. Гладышев И.В. Отражение света от многослойных структур, включающих как когерентные, так и некогерентные слои. В сб.: *Оптические технологии, материалы и системы («Оптотех 2024»): сборник докладов конференции*. Москва. 2024. С. 520–525. <https://www.elibrary.ru/otpmij>

### REFERENCES

1. Rylkov V.V., Emelyanov A.V., Nikolaev S.N., et al. Transport Properties of Magnetic Nanogranular Composites with Dispersed Ions in an Insulating Matrix. *J. Exp. Theor. Phys.* 2020;131(1):160–176. <https://doi.org/10.1134/S1063776120070109> [Original Russian Text: Rylkov V.V., Emel'yanov A.V., Nikolaev S.N., Nikiryu K.E., Sitnikov A.V., Fadeev E.A., Demin V.A., Granovskii A.B. Transport Properties of Magnetic Nanogranular Composites with Dispersed Ions in an Insulating Matrix. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki (ZhETF)*. 2020;158(1):164–183 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044451020070159> ]
2. Martyshev M.N., Emelyanov A.V., Demin V.A., et al. Multifilamentary Character of Anticorrelated Capacitive and Resistive Switching in Memristive Structures Based on  $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  Nanocomposite. *Phys. Rev. Appl.* 2020;14:034016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.034016>
3. Gao C.N., Yang Y.X., Xiong Y.Q., et al. Low critical current density for spin-transfer torque in Fe-MgO granular film at room temperature. *J. Phys. D*. 2014;47(4):045003. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/4/045003>
4. Gan'shina E.A., Garshin V.V., Perova N.N., et al. Magneto-optical Kerr spectroscopy of nanocomposites. *J. Exp. Theor. Phys.* 2023;137(4):572–581. <https://doi.org/10.1134/S1063776123100151> [Original Russian Text: Gan'shina E.A., Garshin V.V., Perova N.N., Pripechenkov I.M., Yurasov A.N., Yashin M.M., Ryl'kov V.V., Granovskii A.B. Magneto-optical Kerr spectroscopy of nanocomposites. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki (ZhETF)*. 2023;164(4):662–672 (in Russ.).]
5. Pavlov V.V., Usachev P.A., Nefedov S.G., et al. Optical and magneto-optical properties of multilayer nanosized  $[\text{Co}/\text{TiO}_2]_n$  films. *Phys. Solid State*. 2018;60(11):2244–2253. <https://doi.org/10.1134/S1063783418110239> [Original Russian Text: Pavlov V.V., Usachev P.A., Nefedov S.G., Stognii A.I., Novitskii N.N., Pisarev R.V. Optical and magneto-optical properties of multilayer nanosized  $[\text{Co}/\text{TiO}_2]_n$  films. *Fizika tverdogo tela (FTT)*. 2018;60(11):2203–2212 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.11.46664.26NN> ]

6. Gladyshev I.V., Ganshina E.A., Simdyanova M.A., et al. Optical and Magneto-Optical Properties of Multilayer Magnetic Structures Based on Permalloy. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024;88(1):S76–S79. <https://doi.org/10.1134/S1062873824708821>
7. Yashin M.M., Ryabukhin V.E., Yurasov A.N. Magneto-optical transverse Kerr effect in  $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$  nanocomposites. *Russian Technological Journal.* 2025;13(1):115–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-115-121>
8. Makarov D.G., Danilov V.V., Kovalenko V.F. Multilayer structures with light transmission controlled by a magnetic field. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki.* 2004;74(5):77–82 (in Russ.).
9. Maevskii V.M. Theory of magneto-optical effects in multilayer systems with arbitrary orientation of magnetization. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography.* 1985;59(2):213–219 (in Russ.).
10. Berreman D.W. Optics in Stratified and Anisotropic Media: 4x4-Matrix Formulation. *J. Opt. Soc. Am.* 1972;62(4):502–510. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.000502>
11. Moler C., Van Loan C. Nineteen Dubious Ways to Compute the Exponential of a Matrix, Twenty-Five Years Later. *SIAM Review.* 2003;45(1):3–49. <https://doi.org/10.1137/s00361445024180>
12. Palto S.P. An algorithm for solving the optical problem for stratified anisotropic media. *J. Exp. Theor. Phys.* 2001;92(4):552–560. <https://doi.org/10.1134/1.1371338>  
[Original Russian Text: Palto S.P. An algorithm for solving the optical problem for stratified anisotropic media. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki (ZhETF).* 2001;119(4):638–648 (in Russ.). [https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r\\_119\\_0638.pdf](https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r_119_0638.pdf)]
13. Nasedkina Yu.F., Sementsov D.I. Polarization distribution in a Gaussian beam reflected from a resonant medium. *Tech. Phys. Lett.* 2006;32(4):323–326. <https://doi.org/10.1134/S1063785006040158>  
[Original Russian Text: Nasedkina Yu.F., Sementsov D.I. Polarization distribution in a Gaussian beam reflected from a resonant medium. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki (Pis'ma v ZhTF).* 2006;32(8):1–9 (in Russ.).]
14. Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Suhorukov A.P. *Teoriya voln. Lineinye i nelineinye volny. (Theory of Waves. Linear and Nonlinear Waves).* Moscow: Lenand; 2019, 448 p. (In Russ.).
15. Gladyshev I.V. *Program for Calculating the Magnitude of the Equatorial Kerr Effect of a Multilayer Thin-Film Structure:* Certificate of state registration of computer program. 2025617039 RF. Publ. (registered) 21.03.2025 (in Russ.).
16. Gladyshev I.V. Reflection of light from multilayer structures, including both coherent and incoherent layers. In: *Optical Technologies, Materials and Systems (“Optotech 2024”):* Conference Proceedings. Moscow. 2024. P. 520–525 (in Russ.).

## Об авторах

**Гладышев Игорь Васильевич**, к.ф.-м.н., доцент, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: i\_gladyshev@mirea.ru. ResearcherID N-1535-2016, Scopus Author ID 6701612553, SPIN-код РИНЦ 6735-1887, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

**Юрасов Алексей Николаевич**, д.ф.-м.н., профессор, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: alexey\_yurasov@mail.ru. ResearcherID M-3113-2016, Scopus Author ID 6602974416, SPIN-код РИНЦ 4259-8885, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3529>

**Яшин Максим Михайлович**, к.ф.-м.н., доцент, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57210607470, SPIN-код РИНЦ 2438-6135, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

## About the Authors

**Igor V. Gladyshev**, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: i\_gladyshev@mirea.ru. ResearcherID N-1535-2016, Scopus Author ID 6701612553, RSCI SPIN-code 6735-1887, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

**Alexey N. Yurasov**, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alexey\_yurasov@mail.ru. ResearcherID M-3113-2016, Scopus Author ID 6602974416, RSCI SPIN-code 4259-8885, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3529>

**Maxim M. Yashin**, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57210607470, RSCI SPIN-code 2438-6135, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния  
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 004.832.32  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-83-105>  
EDN QIONGI



ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

## Физически неклонлируемые функции в аналоговых интегральных схемах

Е.Ф. Певцов<sup>@</sup>, Т.А. Деменкова, М.И. Малето,  
А.С. Сигов, Ю.А. Коротаев<sup>@</sup>, Н.Д. Евгеньев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия  
<sup>@</sup> Авторы для переписки, e-mail: korotaevyua@yandex.ru, pevtsov@mirea.ru

• Поступила: 16.09.2025 • Доработана: 20.10.2025 • Принята к опубликованию: 27.03.2026

### Резюме

**Цели.** Целью работы является комплексный обзор аналоговых и пассивных физически неклонлируемых функций (ФНФ), анализ уязвимостей к атакам на основе машинного обучения и разбор практических сценариев применения в современных интегральных схемах и устройствах интернета вещей.

**Методы.** Используются методы количественной оценки различий реализаций ФНФ и признаков их формального описания, включая вычислимость, уникальность, реализуемость, сложность создания клонов, защиту от несанкционированного доступа.

**Результаты.** Показано, что аналоговые ФНФ относятся к классу «сильных» ФНФ, но требуют специальных мер для подавления влияния факторов внешней среды и старения. Приведены примеры, демонстрирующие близкую к идеальной уникальность ( $\text{inter-HD}^1 \approx 50\%$ ) при высокой стабильности ( $\text{intra-HD}^2 < 1\%$ ) и рекордные энергетические показатели (единицы – десятки фДж/бит). Пассивные ФНФ характеризуются высокой стабильностью, но относятся к «слабым» ФНФ. Рассмотрены атаки на основе машинного обучения, показано, что конволюционные нейронные сети и многослойные перцептроны превосходят классические подходы. Средства защиты на уровне протокола, ограничивающие объем доступной злоумышленнику информации, позволяют избежать модификации архитектуры ФНФ.

**Выводы.** Аналоговые и пассивные ФНФ расширяют спектр средств аппаратной аутентификации и защиты от подделок, особенно для маломощных и ресурсно-ограниченных устройств интернета вещей. Наиболее перспективны архитектуры с внутренней калибровкой и малыми накладными расходами по площади/потреблению, а также пассивные решения для задач однократной идентификации и контроля вмешательства. Остаются открытыми задачи стандартизации процедур чтения/оцифровки, повышения устойчивости к изменениям внешней среды и различным атакам, а также совмещения с коррекцией ошибок и постобработкой на кристалле. Для выбора архитектур ФНФ необходимо тщательное моделирование угроз и применение стратегий глубокой защиты с учетом будущих достижений машинного обучения.

**Ключевые слова:** физически неклонлируемая функция, аналоговые ФНФ, пассивные ФНФ, ML-атаки, аппаратная безопасность, аутентификация устройств, интернет вещей

<sup>1</sup> Inter-Hamming distance – внешнее расстояние Хэмминга.

<sup>2</sup> Intra-Hamming distance – внутреннее расстояние Хэмминга.

**Для цитирования:** Певцов Е.Ф., Деменкова Т.А., Малето М.И., Сигов А.С., Коротаев Ю.А., Евгеньев Н.Д. Физически неклонируемые функции в аналоговых интегральных схемах. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):83–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-83-105>, <https://www.elibrary.ru/QIOHGI>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REVIEW ARTICLE

# Physically unclonable functions in analog integrated circuits

Evgenii Ph. Pevtsov<sup>@</sup>, Tatyana A. Demenkova, Mikhail I. Maletov,  
Alexander S. Sigov, Yuri A. Korotaev<sup>@</sup>, Nikita D. Evgenev

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>@</sup> Corresponding authors, e-mail: korotaevyua@yandex.ru, pevtsov@mirea.ru

• Submitted: 16.09.2025 • Revised: 20.10.2025 • Accepted: 27.03.2026

### Abstract

**Objectives.** The paper provides a comprehensive overview of analog and passive physical unclonable functions (PUFs), analyzing their vulnerabilities to machine-learning (ML) attacks, and assessing their practical deployment in modern integrated circuits and Internet of Things (IoT) devices.

**Methods.** Quantitative metrics were used to compare PUF implementations and their formal properties, such as computability, uniqueness, implementability, difficulty of cloning, and protection against unauthorized access.

**Results.** Analog PUFs were shown to belong to the class of “strong” PUFs. However, special measures are required to counteract environmental and ageing effects. Examples are cited to demonstrate their near-ideal uniqueness (inter-Hamming distance  $\approx 50\%$ ), high stability (intra-Hamming distance  $< 1\%$ ), and excellent energy performance (from units to tens of femtojoules per bit). While characterized by high stability, passive PUFs are classified as “weak” PUFs. A consideration of ML-based modeling attacks confirmed that convolutional neural networks and multilayer perceptrons outperform classical approaches. By limiting the amount of data available to an attacker, protocol-level protection prevents the PUF architecture from being modified.

**Conclusions.** Analog and passive PUFs expand the range of tools available for hardware authentication and anti-counterfeiting, particularly in low-power, resource-constrained IoT nodes. The most promising directions include architectures with on-chip self-calibration and minimal area/power overhead, as well as passive schemes for one-time identification and tamper evidence. However, open challenges remain in terms of standardizing readout and digitization procedures, increasing robustness to environmental variation and diverse attacks, and integrating error correction and post-processing on the chip. The practical adoption and selection of architectures requires conservative threat modeling and defense-in-depth strategies that account for current attack capabilities and likely future advances in ML.

**Keywords:** physically unclonable function, analog PUFs, passive PUFs, ML attacks, hardware security, device authentication, Internet of Things

**For citation:** Pevtsov E.Ph., Demenkova T.A., Maletov M.I., Sigov A.S., Korotaev Yu.A., Evgenev N.D. Physically unclonable functions in analog integrated circuits. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):83–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-83-105>, <https://www.elibrary.ru/QIOHGI>

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

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Физически неклонлируемые функции (ФНФ) служат аппаратной основой доверия для аутентификации, защиты от подделок и безопасного вывода ключей. В первой части цикла [1] рассматривались цифровые ФНФ. Вторая часть посвящена аналоговым и пассивным ФНФ, а также современным атакам на основе машинного обучения (machine learning, ML) и практическим сценариям внедрения.

Аналоговые ФНФ используют непрерывные технологические разбросы параметров активных и пассивных элементов в качестве источника энтропии. В отличие от цифровых примитивов аппаратной безопасности, где наблюдаемый эффект формируется дискретной логикой, аналоговые ФНФ опираются на тонкие вариации пороговых напряжений, токов, емкостей и сопротивлений, которые после включения схемы приводят к воспроизводимым стационарным уровням напряжения/тока, уникальным для каждого кристалла. Оцифровка выполняется компаратором или аналого-цифровым преобразователем. Устойчивость откликов обеспечивается схемными приемами подавления дрейфа и шумов. Аналоговые реализации потенциально предоставляют более высокую плотность энтропии и больший набор пар «запрос – ответ» (challenge to response pairs, CRP), что позволяет относить многие из них к классу «сильных» ФНФ. Вместе с тем работа с характеристиками транзисторных и пассивных структур чувствительна к внешним факторам, что требует применения специальных мер для коррекции возможных ошибок.

Пассивные ФНФ – резистивные «отпечатки» силовых сетей, Via PUF<sup>3</sup> на вероятностном формировании контактов и Coating PUF<sup>4</sup> со специфическим «рисунком» случайного покрытия, отличающиеся минимальными накладными расходами по площади, высокой стабильностью и, в ряде случаев, с идеальной стабильностью, но ограниченным числом пар «запрос – ответ».

Бурное развитие сферы ML радикально изменило понимание безопасности ФНФ: вместо традиционного криптоанализа на первый план вышли атаки, ориентированные на извлечение закономерностей из пар «запрос – ответ». Исследовательское сообщество параллельно продвигает все более совершенные ML-подходы к моделированию ФНФ и контрмеры

<sup>3</sup> Via physically unclonable function (PUF) – технология ФНФ, основанная на использовании микроскопических отверстий (via) в металлических слоях полупроводников. [Via PUF is a technology based on the use of microscopic via holes in metallic layers of semiconductors.]

<sup>4</sup> ФНФ на основе защитного покрытия. [Coating PUF is a technology that utilizes a protective coating for its operation.]

на уровне архитектуры и протоколов, уточняя фундаментальные границы стойкости. В работе дан сводный обзор текущего состояния: теоретические основы, классы атак на основе ML, практические контрмеры и их последствия для проектирования и развертывания ФНФ.

## АНАЛОГОВЫЕ ФНФ

Измерение оригинальных параметров электрической или электронной величины может служить процедурой для идентификации устройств. Источником энтропии служат вариации пороговых напряжений транзисторов (TV<sup>5</sup>- / ICID<sup>6</sup>-PUF), токовые арбитры, диодные структуры, схемы квазиadiaбатической логики (QUAL-PUF<sup>7</sup>) и адиабатические SRAM<sup>8</sup>.

В наиболее простом варианте TV-PUF, который применяется для идентификации интегральных схем (ИС), обычно анализируется изменение пороговых напряжений интегральных транзисторов, имеющее место в результате неизбежных вариаций технологии на этапе производства. Запросом является номер или расположение транзисторного компонента, а ответом – значение соответствующего порогового напряжения.

Один из методов применения ФНФ, позволяющих присвоить уникальную идентификационную метку каждому отдельному экземпляру обычной ИС без необходимости специальных этапов обработки или программирования после изготовления, предложен в [2]. В устройстве, именуемом ICID-PUF, несколько транзисторов одинаковой конструкции объединены в адресуемую матрицу (рис. 1).

В ICID-PUF адресуемый транзистор управляет резистивной нагрузкой. Из-за особенностей изготовления пороговые напряжения этих транзисторов различаются, и ток, проходящий через эту нагрузку, будет частично случайным. Напряжение на нагрузке измеряется и преобразуется в последовательность битов с помощью компаратора с автоматическим обнулением. Этот метод был экспериментально проверен на 55 микросхемах, изготовленных по технологии 0.35 мкм КМОП<sup>9</sup>. При наибольших

<sup>5</sup> Threshold voltage – пороговое напряжение.

<sup>6</sup> Integrated circuit identification – идентификация интегральной схемы.

<sup>7</sup> Quasi-adiabatic logic based PUF.

<sup>8</sup> Static random access memory – статическая память с произвольным доступом.

<sup>9</sup> Комплементарная структура металл – оксид – полупроводник – набор полупроводниковых технологий построения интегральных микросхем и соответствующая ей схемотехника микросхем. [The complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) structure is a collection of semiconductor technologies used for the fabrication of integrated circuits and the related circuitry in microcircuits.]

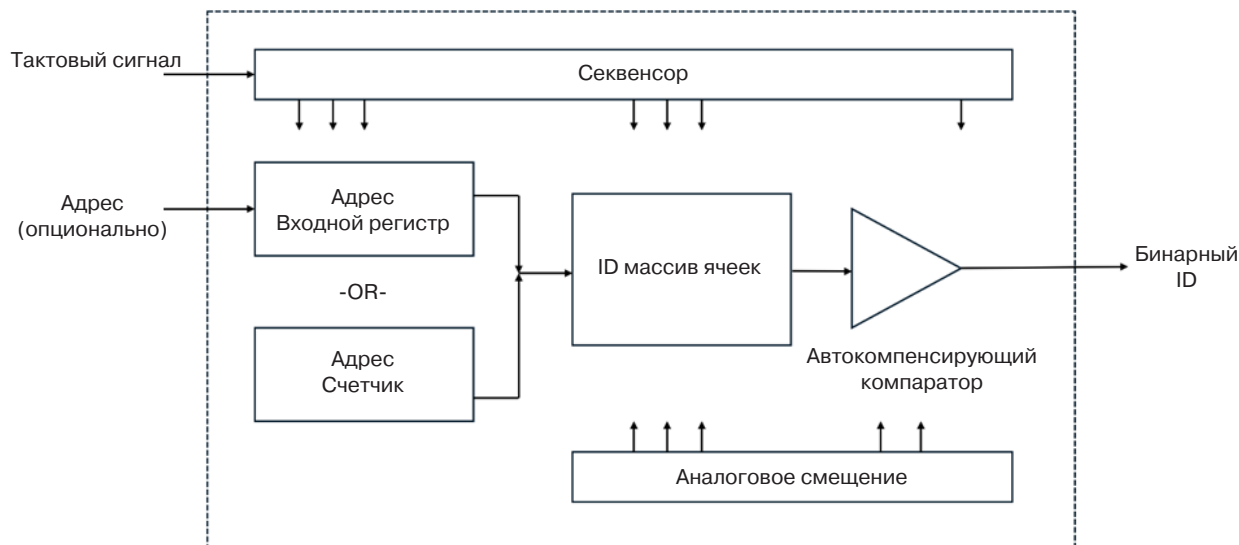


Рис. 1. Блок-схема устройства для идентификации ИС на основе ФНФ [2]. ID (identifier) – идентификатор

колебаниях окружающей среды получено значение  $\text{intra-HD}^{10} \mu_{\text{intra}} = 1.3\%$ , в то время как  $\text{inter-HD}^{11} \mu_{\text{inter}}$  очень близко к 50%. При тактовой частоте 1 ГГц на входе усилителя конструкция ФНФ с 64-битными ключами на транзисторах потребляет мощность 0.18 мВт/бит при 50% показателях уникальности и единообразия. Показано, что воспроизводимость этого варианта ФНФ не зависит от процессов старения ИС и уровня топологических норм 45-нм, 65-нм и 90-нм.

В работе [3] предложен каскад из трех ступеней по 20 КМОП-инверторов и транзисторов в диодном включении, формирующих делитель напряжения, выходное напряжение которого зависит от вариаций порогового напряжения. Данная ФНФ продемонстрировала  $\text{inter-HD} \approx 50.65\%$ ,  $\text{intra-HD} \approx 6.96\%$ . За счет работы ниже порогового напряжения схема демонстрирует низкое энергопотребление (не более 0.43 пДж/бит), однако чувствительна к шуму компаратора. Для повышения надежности распознавания авторы использовали усреднение по 15-кратным выборкам.

Следует отметить, что эти характеристики могут быть изменены в условиях повышенного шума, например, из-за изменения параметров библиотечных элементов («характеризация по углам»: вариации технологического процесса, рабочего напряжения и температуры – process, voltage, temperature, PVT) или из-за старения активного устройства, что приводит к проблемам с надежностью ответов ФНФ.

Точное измерение разности номинально идентичных токов при открытии транзисторов выполнено

в [4] при помощи специализированного элемента аппаратной реализации искусственных нейронных сетей WTA (winner takes all), выступающего в роли арбитра. Получены значения  $\text{intra-HD} \approx 1.57\%$ ,  $\text{inter-HD} \approx 49.8\%$  и надежности 97.7% в диапазоне температур от  $-20^\circ\text{C}$  до  $+120^\circ\text{C}$  и варьировании напряжения питания  $\pm 300$  мВ. Энергия потребления схемы составила 5.67 пДж/бит. В усовершенствованном варианте этой схемы, реализованной в топологии 130 нм, для надежного поддержания рабочей точки на уровне около 50 нА применяется пара каскодных токовых зеркал с двукратным  $\text{gain-boosting}^{12}$  усилением, что увеличивает выходное сопротивление. В результате нестабильность бита не превышает 1.56% в диапазоне изменений питающих напряжений 0.6–2 В и температуры 0–75 °C, а  $\text{intra-HD}$  в среднем не превышает 0.49% при практически идеальной уникальности ( $\text{inter-HD} \approx 50\%$ ), что вместе с энергией 5.36 фДж/бит и площадью 72  $\mu\text{m}^2/\text{бит}$  делает ячейку особенно привлекательной для встраивания в модули интернета вещей. Эксперименты на 21 кристалле по 128 бит подтверждают статистическую устойчивость решения и демонстрируют один из лучших совокупных показателей обобщающего фактора качества ФНФ  $\text{FOM}^{13} = 17$  отн. ед., сохраняя простоту интеграции в ИС и возможность дальнейшего масштабирования.

<sup>12</sup> Gain-boosting – прием аналоговой схемотехники, при котором вспомогательное усиление в петле обратной связи повышает эффективное усиление каскодного узла, что приводит к увеличению его выходного сопротивления. [Gain-boosting is an analog circuit technique in which auxiliary gain in the feedback loop increases the effective gain of the cascade node, thereby increasing its output resistance.]

<sup>13</sup> Figure of merit.

<sup>10</sup> Intra-Hamming distance – внутреннее расстояние Хэмминга.

<sup>11</sup> Inter-Hamming distance – внешнее расстояние Хэмминга.

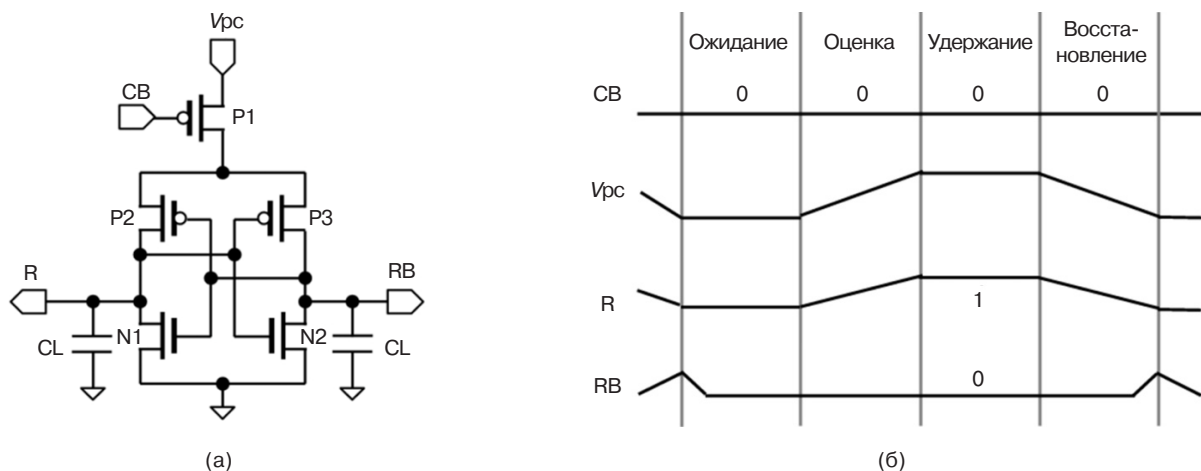
В работе [5] реализован другой вариант аналоговой диодной ФНФ, в котором сигнатура устройства формируется из диодов, присутствующих в выходных портах ИС. Для повышения уникальности сигнатур предусмотрены меры компенсации перепадов температуры и потерь в подводящих проводниках.

В другой работе [6], также посвященной реализации ФНФ на основе диодных структур в ИС, продемонстрировано, что вызванные технологическим процессом нелинейные изменения проводимости диодов Шоттки на основе оксидных полупроводников обеспечивают подходящий источник энтропии для реализации ФНФ без операции переключения. Показано, что, используя мягкую обработку кислородной плазмой, можно частично устранить область накопления электронов, которая естественным образом образуется в оксидной полупроводниковой пленке, что приводит к значительному изменению нелинейности как экзотического источника энтропии. Диоды Шоттки, обработанные мягкой плазмой, показали почти идеальную однородность и уникальность в среднем на 50%, а также идеальное значение энтропии без необходимости в дополнительной площади оборудования и затратах электроэнергии. Подчеркивается, что эти результаты являются перспективными вариантами для разработки встроенных в аппаратное обеспечение ФНФ, обеспечивающих реализацию энергоэффективного криптографического оборудования.

ФНФ на основе схем с квазиadiaбатической логикой (QUAL-PUF) формируется из составных конденсаторных и транзисторных компонентов

adiaбатической логической схемы (энергоэффективной системы, которая основана на преобразовании в сигнал заряда, накопленного в нагрузочном конденсаторе после выполнения операций), обусловленной изменениями в технологии на этапе производства. Схемы, допускающие такую полную рециркуляцию, как правило, сложны и имеют большую площадь, поэтому в работе [7] используется квазиadiaбатическая схема, которая восстанавливает только большую часть заряда конденсатора. Как показано на рис. 2, в этой реализации ФНФ к двум теоретически идентичным транзисторным элементам в схеме подается повышающееся напряжение.

Различия, возникающие при производстве, приводят к несоответствию параметров транзисторов, в результате чего один из них обладает большей проводимостью и быстрее заряжает нагрузочный конденсатор. Это создает устойчивый бит отклика каждой элементарной ячейки схемы, аналогично эффекту рассогласования МОП-транзисторов в традиционных ФНФ. Поскольку aдиабатическая логика работает в определенных циклах зарядки/разрядки, уникальной особенностью данной реализации является то, что любая ячейка ФНФ оценивается только на одном из четырех одинаковых временных интервалов. Чтобы учесть это, каждая битовая единица ФНФ состоит из четырех таких ячеек, работающих с временным сдвигом на четверть такта. Сказанное иллюстрируется рис. 3, где изображена реализация модуля 4-разрядной aдиабатической ФНФ, составленной из четырех QUAL-PUF.

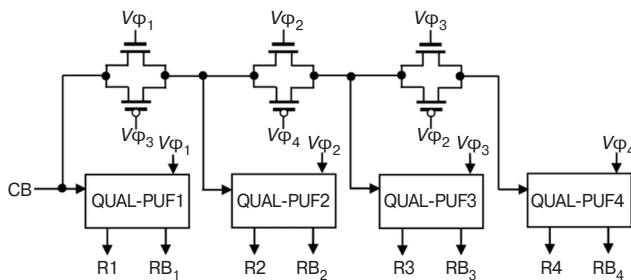


**Рис. 2.** ФНФ на основе схем QUAL-PUF [7].

(а) QUAL-PUF; (б) временная диаграмма.

$V_{pc}$  (power clock) – питающий тактовый сигнал, CB (challenge bit) – бит запроса, P1 – управляющий транзистор, P2 и P3 –  $p$ -МОП<sup>14</sup>-транзисторы бистабильного элемента, R (response) – основной бит отклика, RB (response bit) – комплементарный выход бита отклика, N1 и N2 –  $n$ -МОП-транзисторы бистабильного элемента, CL – эквивалентная нагрузочная емкость выходного узла

<sup>14</sup> Металл – оксид – полупроводник. [Metal–oxide–semiconductor.]



**Рис. 3.** Модуль 4-разрядной адиабатической ФНФ, составленной из четырех QUAL-PUF [7]

Каждая элементарная ячейка управляется битом запроса СВ, задающим процесс инициализации, и четырьмя тактовыми импульсами  $V_{\phi_1} - V_{\phi_4}$ , представляющими собой трапецеидальные power-clock сигналы квазиадиабатической логики, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ . Эти фазы соответствуют состояниям ожидания, оценки, удержания и восстановления. Каждый локальный блок QUAL-PUF1 – QUAL-PUF4 формирует пару выходных сигналов – основной бит отклика R1 – R4 и его комплементарный выход  $RB_1 - RB_4$ . Связи между блоками осуществляются проходными ключами, управляемыми соответствующими фазовыми сигналами  $V_{\phi_i}$ , что обеспечивает последовательные циклы зарядки и восстановления энергии нагрузки.

Если первая ячейка, как показано на рис. 3, работает в фазе удержания, то следующая – в фазе восстановления, а две остальные – в фазах ожидания и оценки соответственно. Одновременная выборка всех четырех выходов позволяет получить четыре бита отклика. При выборке в разные фазы тактового сигнала формируются различные комбинации битов, что дает возможность четырем модулям ФНФ генерировать до 16 бит отклика, при этом в каждом модуле содержится четыре повторяющихся случайных бита. Такая структура значительно усложняет моделирование ФНФ потенциальным злоумышленником.

В работе [7] приведен пример такой реализации ФНФ 4-разрядного маломощного чипа с памятью по схеме 6Т адиабатической ячейки памяти, изготовленной по стандартному КМОП-процессу 0.18 мкм с напряжением питания 1.8 В. Размеры модуля –  $58.7 \times 5.7$  мкм. Результаты моделирования показывают, что значение inter-ND составляет 47.58%, надежность – 95.10%, а рассеиваемая энергия – 29.73 фДж/бит/цикл.

Эти результаты подтверждены в более поздних реализациях аналогичной схемы [8], в которых показано, что при моделировании такая ФНФ обеспечивает среднюю надежность в 98.51% при колебаниях температуры и напряжения питания, при уникальности 49.75% и потреблении 15.92 фДж/бит/цикл. Эти оценки хорошо согласуются с результатами

измерений изготовленных образцов, которые продемонстрировали требуемую функциональность ФНФ и надежность 96.92% при комнатной температуре.

Пример схемы на основе адиабатической SRAM с использованием КМОП-технологии 0.18 мкм, которая потребляет меньше энергии, чем обычные ФНФ на основе памяти, и обладает хорошей уникальностью и надежностью, приведен также в работе [9]. При моделировании SPICE<sup>15</sup> потребление энергии предложенной схемы составляет 13.88 фДж/бит/цикл, а значения уникальности и надежности при подключении схемы ФНФ в 4-битном каскаде составляют 50.07% и 99.51% соответственно.

### ФНФ НА ОСНОВЕ ПАССИВНЫХ УСТРОЙСТВ

К аналоговым ФНФ можно также отнести пассивные устройства, в которых используются статистические вариации пассивных элементов или структур, формирующие постоянный уникальный «отпечаток» устройства. Пассивные ФНФ обычно не требуют подачи специального стимулирующего сигнала, их случайные параметры заложены в структуре изначально и считываются напрямую.

Ниже рассматриваются три примера пассивных ФНФ: 1) на основе вариаций сопротивления проводников, 2) на основе переходных отверстий (Via PUF) и 3) ФНФ с использованием защитного покрытия (Coating PUF).

Различия в картах распределения мощности в ИС, вызванные вариациями при изготовлении соединений компонентов, также могут служить признаками уникальности конкретного экземпляра. Для реализации ФНФ в этом случае в устройство добавляются дополнительные компоненты, так что каждая ветвь сети распределения электроэнергии может быть подсоединена к шине земли, минуя уже существующие компоненты. Чтобы сформировать сигнатуру устройства, измеряются падения напряжений этих участков цепи (или значения сопротивления). Незначительные флуктуации толщины, ширины и зернистости металла при производстве приводят к тому, что сопротивления сегментов питающей шины слегка различаются от кристалла к кристаллу. Считывание может осуществляться путем подачи тестовых токов через определенные участки силовой сети и измерения возникающих падений напряжения, которые зависят от суммарного сопротивления цепи. Комбинируя результаты нескольких таких

<sup>15</sup> Simulation program with integrated circuit emphasis – симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. [Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (SPICE) is an open-source simulator for general-purpose electronic circuits.]

измерений, формируется уникальный вектор ответов, характеризующий данный экземпляр микросхемы. Запрос заключается в количестве или расположении участков схемы, а ответ – в соответствующем значении падения напряжения или сопротивления. Пример такой разработки представлен в [10], где приводятся результаты измерения изменений эквивалентных сопротивлений в системе распределения питания двадцати четырех идентичных микросхем, изготовленных по 65-нм технологии.

Поскольку в основе лежат пассивные металлические структуры, резистивная ФНФ обладает высокой стабильностью к внешним условиям. Вариации сопротивления металла линейно зависят от температуры и слабо зависят от напряжения питания, что упрощает компенсацию внешних воздействий по сравнению с транзисторными эффектами. В частности, транзисторным (активным) ФНФ обычно требуются калибровки или алгоритмы коррекции для учета изменений PVT-параметров, тогда как пассивная металлическая сеть обеспечивает более воспроизводимые результаты без сложной подстройки. Кроме того, использование уже существующей в каждом чипе распределенной сети питания означает минимальные накладные расходы по площади – добавляются лишь схемы для опроса и оцифровки отклика. Распределенный характер металлической решетки создает широкий разброс статистических вариаций по разным участкам, что повышает уникальность: вероятность того, что два чипа случайно дадут одинаковый «резистивный» отпечаток, пренебрежимо мала. Преимущество такой ФНФ и в аппаратной устойчивости – правильно спроектированная металлизация не деградирует со временем (электромиграция устранена подбором размеров проводников). Сложность подделки тоже высока: попытка скопировать сопротивления во всех узлах питания «клона» практически невозможно без воспроизведения полного технологического процесса оригинала. К ограничениям данного подхода можно отнести относительно небольшой объем генерируемых данных (как правило, получается уникальный ключ/ID, хотя можно варьировать точки измерения для получения нескольких бит), а также необходимость прецизионных аналоговых измерений малых разниц сопротивлений. Тем не менее, экспериментальные образцы резистивной ФНФ показали жизнеспособность: например, в 65-нм КМОП по разбросам силовой сети удалось надежно различать все 36 испытанных кристаллов.

В работе [10], описывающей аналоговую ФНФ, предложено фиксировать перепады напряжения и эквивалентные сопротивления в цепях питания микросхем, поскольку на эти электрические параметры влияют случайные факторы технологии

изготовления. Результаты экспериментов на чипах, изготовленных по 65-нм КМОП-технологии, показали, что при измерениях эквивалентных сопротивлений количественные характеристики  $\mu_{intra}$  и  $\mu_{inter}$  составляют примерно 0.04 и 1.5 Ом соответственно.

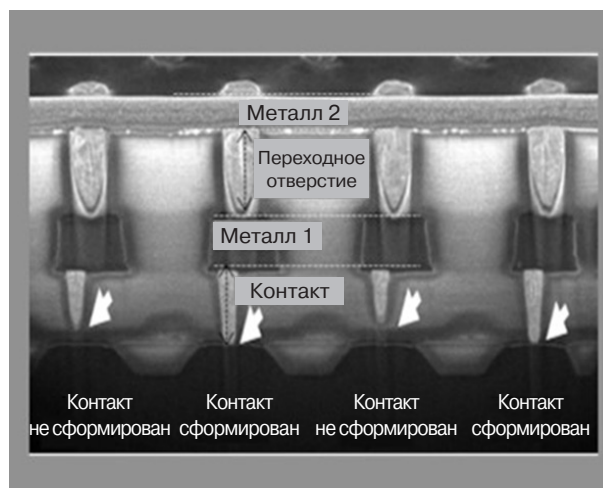
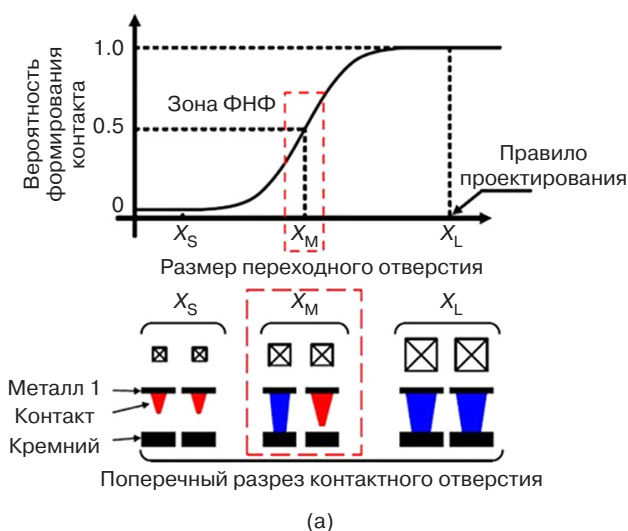
Идея ФНФ на основе вариаций формирования переходных отверстий (Via PUF) состоит в преднамеренном нарушении проектных норм переходных отверстий в топологии ИС: используются размеры немного меньше минимально допустимых. При точном размере каждое отверстие имеет порядка 50% шанса успешно заполниться металлом и образовать соединение между слоями либо остаться разомкнутым [11]. Эти события происходят случайно вследствие неконтролируемых флуктуаций технологического процесса. В результате после изготовления чипа множество заложенных в него соединений оказываются либо проводящими («1»), либо обрывом («0»), формируя уникальный для кристалла шаблон. Считывание Via PUF осуществляется посредством измерения сопротивления заложенных контактов: высокое сопротивление свидетельствует об отсутствии металлического соединения («0»), низкое – о сформированном контакте («1»). Важным достоинством данного подхода является исключительная надежность: контакт либо сформировался, либо нет, и металлическое соединение не подвержено влиянию изменений температуры или напряжения питания. Экспериментально показано, что битовая ошибка (bit error rate, BER) практически нулевая, поэтому для ФНФ на основе формирования переходных отверстий не требуется коррекция ошибок с помощью избыточных кодов. Дополнительная обработка, например, двухступенчатое XOR-преобразование, применяется для устранения смещений и достижения лучшей равномерности битов. Преимущества Via PUF включают также высокую уникальность отпечатков (межкристалльные расстояния Хэмминга ~50%) и устойчивость к старению. Благодаря тому, что подобные «случайные» контакты можно распределить по всему кристаллу среди обычных переходных отверстий, затрудняется их обнаружение при обратном проектировании чипа злоумышленником. Кроме того, реализация не требует нестандартных технологических процессов – используются стандартные слои и материалы КМОП, добавляются лишь «заложенные» контакты особого размера. К ограничениям Via PUF можно отнести то, что число генерируемых бит фиксировано схемой (обычно выступает как уникальный идентификатор, а не многократный challenge-response), а также необходимость калибровать размер отверстий под конкретный техпроцесс для обеспечения ~50% вероятности заполнения и отбраковывать пограничные случаи во избежание нестабильных битов.

В работе<sup>16</sup>, посвященной способам повышения доверенности системы на кристалле на базе микропроцессоров на базе ядра Arm Cortex-M4 (производитель – Arm, Великобритания), в обосновании выбранного способа формирования ФНФ отмечается, что существует средняя по размеру зона (условно именуемая как зона ФНФ), в которой вероятность образования сквозного отверстия или контакта составляет 50%, если размер сквозного отверстия или контактного отверстия меньше, чем обычно задается при проектировании (рис. 4а).

Микроскопическое изображение кремния Via PUF в поперечном сечении показано на рис. 4б, где отчетливо видны контактные отверстия разного качества: 1) контакт разомкнут если не обеспечивает соединения с кремниевой подложкой; 2) контакт замкнут, если он обеспечивает электрическое соединение между слоями. Для формирования ФНФ после завершения изготовления требуется исключение из рассмотрения отверстий, которые являются слабыми с точки зрения надежности, путем измерения сопротивления сквозного или контактного соединения. Например, в одном технологическом узле сопротивление более 1 МОм идентифицируется как «разрыв цепи», а сопротивление менее 50 кОм – как «замыкание», в то время как все отверстия, которые находятся между этими двумя

значениями, отсекаются. При этом значения отключения подбираются отдельно для каждого технологического процесса. Как только соединение классифицируется как короткое замыкание или обрыв, оно остается неизменным независимо от изменения PVT, что гарантирует нулевое значение битовых ошибок (BER). Это важная характеристика Via PUF, подтверждающая надежность технологии.

Как отмечено выше, достижение полной случайности имеет решающее значение для ФНФ, где идеальная случайность определяется расстоянием Хэмминга, равным 0.5 или 50%. Для повышения надежности в этой работе применен двухэтапный отбор по критерию XOR (рис. 5). Было изготовлено 405 тестовых чипов, в которых было сформировано 16 различных размеров отверстий по 7680 бит на каждый размер отверстия, что в общей сложности составляет 122800 бит исходных данных для ФНФ. Первый этап XOR сокращает их до 7680 бит, которые проходят через второй этап XOR, генерируя 640 бит в качестве конечного результата, при котором достигается значение  $\mu_{inter} = 0.4972$  при стандартном отклонении  $\sigma_{inter} = 0.0205$ . Рисунок 5 иллюстрирует отбор чипов с Via PUF по результатам стандартных тестов на случайность SP 800-22 и SP 800-90В Национального института стандартов и технологий США<sup>17</sup>.



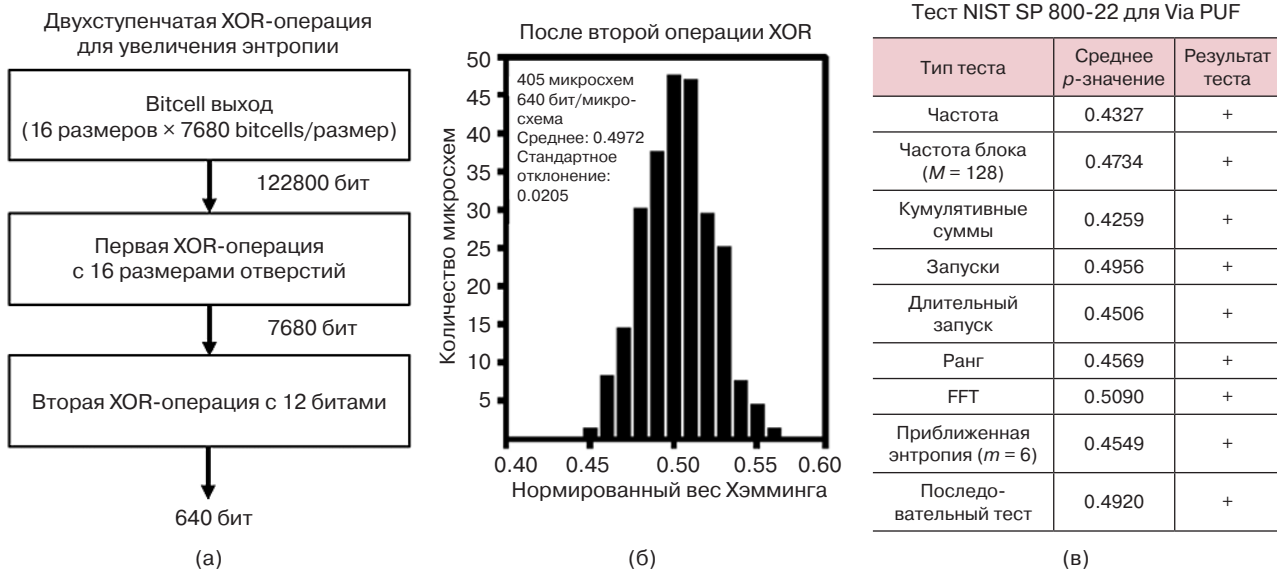
**Рис. 4.** Реализация ФНФ на основе вариаций формирования переходных отверстий:  
(а) вероятности формирования контакта в зависимости от размера переходного отверстия;  
(б) поперечный разрез микроскопического изображения Via PUF<sup>18</sup>.

$X_S$  – размер переходного отверстия, при котором контакт не формируется;  
 $X_L$  – размер переходного отверстия, определенный правилами проектирования;  
 $X_M$  – промежуточный размер переходного отверстия, при котором формирование контакта имеет вероятностный характер

<sup>16</sup> Lee T.K. *Via PUF technology as a root of trust in IoT supply chain*. Global Semiconductor Alliance; 2024. <https://www.gsaglobal.org/forums/via-puf-technology-as-a-root-of-trust-in-iot-supply-chain>. Дата обращения 16.06.2025. / Accessed June 16, 2025.

<sup>17</sup> The National Institute of Standards and Technology, NIST. <https://www.nist.gov/>. Дата обращения 16.06.2025. / Accessed June 16, 2025.

<sup>18</sup> Там же. [*Ibid.*]



**Рис. 5.** Алгоритм двухэтапного отбора Via PUF по критерию XOR и результаты тестов NIST<sup>19</sup>. FFT (fast Fourier transform) – быстрое преобразование Фурье,  $M$  – длина блока в тесте частоты в пределах блока,  $m$  – длина битового шаблона в тесте приближительной энтропии. Блок представляет собой фрагмент битовой последовательности фиксированной длины, на которые тест NIST делит всю проверяемую последовательность

Аналогичная ФНФ, использующая бинарный ответ на уникальность (LRR-DPUF<sup>20</sup>), основана на вариациях литографии межсоединений, также используется в работе [12].

ФНФ на основе защитного покрытия (Coating PUF) использует внешнее случайное диэлектрическое покрытие, наносимое поверх кристалла, для формирования уникального отпечатка. Классическая реализация была предложена в работах [13, 14]: поверх ИС располагается решетка из металлических проводников (например, гребенчатая структура электродов), а все пространство между ними заливается оптически непрозрачным полимером, в который заранее добавлены случайно распределенные диэлектрические наночастицы. Благодаря хаотичному расположению, размерам и диэлектрическим свойствам этих частиц, электрическая емкость между каждой парой проводников является случайной величиной. Иными словами, номинально одинаковые конденсаторы, образованные верхними проводниками, приобретают разброс значений емкости, уникальный для каждого экземпляра микросхемы. Считывая множество таких конденсаторов (например, с помощью измерения токов утечки или временных постоянных заряда/разряда), можно получить набор случайных бит, зависящий от локальных вариаций диэлектрической проницаемости покрытия. Эти биты составляют уникальный идентификатор устройства, физически

неклонировуемый ввиду неповторимости распределения частиц в слое покрытия.

В работе [15] показано, что при нанесении непрозрачного и химически инертного слоя диэлектрика на верхний слой металлизации ИС измерения значений электрических емкостей участков цепи относительно других участков или земли питания носят случайный характер, индивидуальный для каждого экземпляра чипа. Схему реализации и принцип работы ФНФ на основе покрытия иллюстрирует рис. 6.

Оцифрованные результаты измерения на 36 изготовленных чипах, в каждом из которых тестировался 31 емкостный датчик, показали высокую степень случайности ( $\mu_{\text{inter}} \approx 50\%$ ) и низкий уровень шума ( $\mu_{\text{intra}} < 5\%$ ).

ФНФ на основе защитного покрытия обладает двумя важными достоинствами. Во-первых, улучшается аппаратная защищенность кристалла: непрозрачный верхний слой препятствует прямому оптическому изучению и считыванию внутренних схем, действуя как защитная маска. Любая попытка снять или повредить этот слой неизбежно изменит распределение частиц и емкости, что уничтожит исходный «отпечаток» устройства. Таким образом, Coating PUF не только предоставляет уникальный ключ, но и служит своего рода сенсором вскрытия – при вмешательстве оригинальный идентификатор теряется, выявляя факт взлома. Во-вторых, благодаря крупномасштабному случайному процессу

<sup>19</sup> Lee T.K. Via PUF technology as a root of trust in IoT supply chain. Global Semiconductor Alliance; 2024. <https://www.gsaglobal.org/forums/via-puf-technology-as-a-root-of-trust-in-iot-supply-chain>. Дата обращения 16.06.2025. / Accessed June 16, 2025.

<sup>20</sup> Learning resilient and reliable digital PUF – устойчивая к обучению надежная цифровая ФНФ.

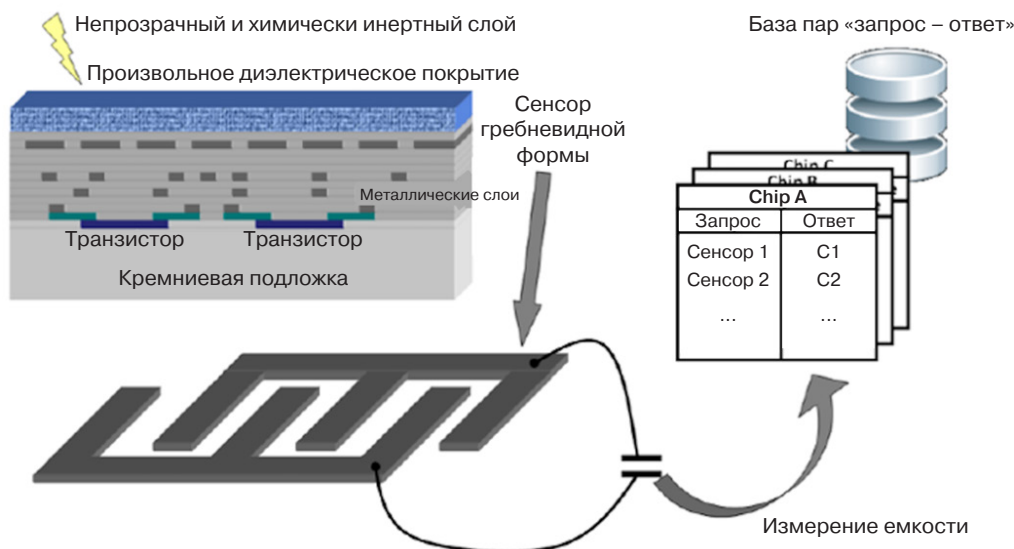


Рис. 6. Пример реализации пассивной ФНФ на основе инертного слоя диэлектрика [14]

формирования (смешивание миллионов частиц), вероятность совпадения двух таких ФНФ крайне мала, а воспроизведение требует копирования процессов на атомарном уровне, что практически невыполнимо. Из недостатков отмечается необходимость дополнительной технологической стадии при изготовлении – нанесение и отверждение специального покрытия, что увеличивает себестоимость. Кроме того, для чтения отпечатка нужны аналоговые схемы или внешние измерения с высокой точностью, а сами измерения могут зависеть от внешних условий (например, температуры, влияющей на диэлектрик). Устройства с Coating PUF продемонстрировали жизнеспособность в системах аутентификации, в частности, при реализации метки RFID<sup>21</sup>, где случайное эпоксидное

покрытие используется как источник 128-битного ключа, уничтожающегося при попытке физического доступа.

В таблице обобщены данные публикаций, в которых приводятся оригинальные результаты по реализации ФНФ на основе аналоговых схем и схем с вариациями переходных отверстий. В качестве ключевых метрик выбраны: расстояние между двумя ответами ФНФ от разных экземпляров ФНФ, использующих один и тот же вызов – inter-HD, и расстояние между двумя ответами ФНФ, полученными от одного и того же экземпляра ФНФ и использующими один и тот же вызов – intra-HD. В ряде публикаций они имеют названия уникальность (uniqueness) и надежность (reliability), соответственно.

Таблица. Характеристики аналоговых и пассивных ФНФ

Тип ФНФ / ссылка	Год публикации	Характеристики ФНФ					Оценочная сложность реализации
		Inter-HD	Intra-HD	Платформа	Чувствительность к внешним условиям		
					Температура	Напряжение	
Subthreshold <sup>22</sup> [3]	2019	50.65%	~7%	SPICE model TSMC 65 нм КМОП	От -20°C до 85°C	0.75–0.9 В	Высокая
Current Mirror <sup>23</sup> [4]	2023	49.84%	1.57%	SPICE model TSMC 65 нм КМОП	От -20°C до 120°C	±300 мВ	Высокая
Adiabatic SRAM <sup>24</sup> [7]	2020	47.58%	4.9%	ASIC 180 нм КМОП	От -40°C до 100°C	1.8 В	Средняя
6T Adiabatic <sup>25</sup> [8]	2024	49.75%	1.49%	ASIC 180 нм КМОП	От -40°C до 100°C	0.9–1.8 В	Средняя

<sup>21</sup> Radio frequency identification – радиочастотная идентификация.

<sup>22</sup> Субпороговая ФНФ.

<sup>23</sup> ФНФ, основанные на реализации массива токовых зеркал. [PUF based on the use of an array of current mirrors.]

<sup>24</sup> Тип SRAM, в котором используется технология адиабатического восстановления энергии. [A type of SRAM that employs adiabatic energy recovery methods.]

<sup>25</sup> 6-транзисторная ФНФ, основанная на принципах адиабатической логики. [A six-transistor PUF that operates on adiabatic logic principles.]

Таблица. Продолжение

Тип ФНФ / ссылка	Год публикации	Характеристики ФНФ					Оценочная сложность реализации
		Inter-HD	Intra-HD	Платформа	Чувствительность к внешним условиям		
					Температура	Напряжение	
Adiabatic Logic <sup>26</sup> [9]	2024	50.07%	0.49%	ASIC 180 нм КМОП	От -50°C до 100°C	–	Средняя
Via <sup>27</sup> [11]	2020	49.99%	~0%	ASIC 130 нм КМОП	От -55°C до 125°C	1.65 В	Низкая

В данной таблице чувствительность к внешним условиям показывает, при каких вариациях напряжения/температуры проводились измерения характеристик и насколько они изменяются (в скобках указывается насколько изменяется Intra-distance), если такие данные приводятся. Оценочная сложность реализации (высокая, средняя, низкая) характеризует относительные аппаратные затраты на реализацию того или иного вида ФНФ, а также техническую сложность (необходимость балансировки путей, подбора параметров элементов, изменения техпроцессов и т.д.).

### НАРУШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ФНФ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ML

Стремительное развитие методов ML в корне изменило представление о безопасности ФНФ. Уязвимость ФНФ к атакам на основе ML послужила причиной обширных исследований как методологий атак, так и механизмов защиты [3, 16–19]. Эти атаки представляют собой смену парадигмы в анализе безопасности ФНФ, переход от традиционных криптоаналитических подходов к методам моделирования на основе данных, которые используют закономерности, присущие парам «запрос – ответ» ФНФ.

Исследователи разрабатывают все более сложные стратегии атак с использованием методов ML противника [17, 20], одновременно предлагая новые архитектуры и протоколы ФНФ, предназначенные для противостояния таким атакам [3, 18, 19]. В данном разделе представлен анализ текущего состояния атак и защиты от ML в системах ФНФ на основе последних достижений как в методологии атак, так и в стратегиях противодействия. Рассматриваются теоретические основы безопасности ФНФ, анализируются различные категории атак на основе ML, оцениваются предложенные механизмы защиты и обсуждаются последствия для будущих разработок и стратегий развертывания ФНФ.

### Архитектуры ФНФ и свойства безопасности

ФНФ можно разделить на две категории, основываясь на их поведении в режиме «запрос – ответ»: сильные и слабые [21]. Сильные ФНФ характеризуются способностью генерировать большое количество пар «запрос – ответ», что делает их подходящими для протоколов аутентификации, в которых можно использовать несколько CRP без исчерпания доступного пространства запросов. В качестве примеров можно привести ФНФ типа «арбитр», ФНФ с кольцевым генератором и различные композитные архитектуры [17–19]. Слабые ФНФ, напротив, имеют ограниченное пространство запросов и обычно используются для генерации ключей, где извлекается один или несколько ответов и обрабатывается через механизмы коррекции ошибок [22].

ФНФ типа «арбитр» (Arbiter PUF, A-PUF) представляет собой одну из наиболее изученных архитектур сильных ФНФ, использующих разницу в задержках между двумя номинально идентичными путями передачи сигнала для генерации ответа [16, 18]. Биты запроса управляют переключающими элементами, которые определяют конфигурацию пути, а схема арбитра в конце определяет, какой путь быстрее, создавая двоичный ответ. Несмотря на концептуальную простоту, ФНФ этого типа оказалась уязвимой для различных атак с применением машинного обучения (ML-атак) из-за линейной аддитивной модели задержки [17, 19]. Для повышения безопасности от ML-атак разработаны более сложные архитектуры [18, 19, 22], которые представляют собой попытки фундаментально изменить математические отношения между входами и выходами, чтобы предотвратить эффективное моделирование ML.

Важнейшим аспектом реализации ФНФ является обработка шумов, присущих ответам ФНФ, вызванных колебаниями окружающей среды, старением и погрешностями измерений [16, 22]. Механизмы исправления ошибок, обычно реализуемые с помощью

<sup>26</sup> ФНФ, основанная на принципах адиабатической логики. [PUF based on adiabatic logic.]

<sup>27</sup> ФНФ, основанная на вариациях процесса формирования переходных отверстий. [PUF derived from variations in the formation of vias.]

нечетких экстракторов или алгоритмов вспомогательных данных, необходимы для надежной генерации ключей и аутентификации. Наиболее распространенный подход заключается в хранении вспомогательных данных, которые позволяют корректировать зашумленные ответы ФНФ без раскрытия фактических значений ответов. Однако недавние исследования показали, что вспомогательные данные могут способствовать утечке значительной информации об ответах ФНФ, позволяя осуществлять ML-атаки даже в тех случаях, когда фактические значения ответов недоступны [22]. Это представляет собой фундаментальную уязвимость в системах на основе ФНФ, использующих стандартные подходы к исправлению ошибок, особенно при использовании линейных блочных кодов, таких как коды повторения.

### Применение ML для атак на ФНФ

Уязвимость ФНФ к атакам с применением ML впервые была продемонстрирована на примере классических методов ML, примененных к A-PUF и их разновидностям [3, 17]. Эффективность этих атак обусловлена фундаментальными математическими соотношениями, лежащими в основе конструкций ФНФ. Для A-PUF разница задержек может быть смоделирована как линейная функция битов запросов и параметров задержки, что делает их восприимчивыми к методам линейной классификации [16, 17]. Даже если сложность увеличивается за счет операций XOR или других нелинейных преобразований, базовая структура часто остается изучаемой с помощью соответствующих алгоритмов ML. Классические A-PUF, как правило, можно смоделировать с точностью более 95%, используя менее 10000 пар «запрос – ответ» и стандартные методы логистической регрессии. Линейный характер модели задержки делает эти ФНФ особенно уязвимыми для математического анализа и ML-моделирования.

Модели глубокого обучения могут автоматически обнаруживать релевантные признаки и нелинейные взаимосвязи в данных об ответах на запросы, устраняя необходимость в ручном подборе признаков. Атаки на основе глубокого обучения демонстрируют превосходную производительность на всех протестированных архитектурах по сравнению с классическими подходами ML. Конволюционные нейронные сети (convolutional neural networks, CNN) и многослойные перцептроны (multilayer perceptrons, MLP) также продемонстрировали более высокую производительность по сравнению с классическими подходами ML, особенно против сложных архитектур ФНФ, разработанных для защиты от традиционных атак [3, 17]. Конволюционные нейронные сети достигают точности моделирования выше 90% для

различных типов ФНФ, требуя при этом меньшего количества обучающих образцов, чем традиционные методы. Это говорит о том, что сложность современных алгоритмов ML опережает защитные возможности текущих конструкций ФНФ.

Также были исследованы методы трансферного обучения, когда модели, обученные на одном экземпляре ФНФ или архитектуре, адаптируются для атак на различные ФНФ [21]. Такой подход позволяет сократить объем обучающих данных, необходимых для успешных атак, и продемонстрировать обобщенность моделей ФНФ, обученных на схожих архитектурах.

Эволюционные стратегии, в частности, стратегия эволюции адаптации ковариационной матрицы, доказали свою эффективность ML-атак в борьбе с более сложными конструкциями ФНФ [17, 21]. Эти методы позволяют моделировать поведение ФНФ путем эволюции популяций моделей-кандидатов и отбора тех, которые лучше всего соответствуют наблюдаемым данным о реакции на запрос. Гибкость эволюционных подходов делает их особенно опасными для ФНФ со сложной внутренней структурой.

Один из особенно сложных подходов включает использование сиамских нейронных сетей для моделирования ФНФ путем использования вспомогательных данных [22]. Эта техника использует избыточность, присущую кодам коррекции ошибок, для извлечения обучаемых характеристик и меток без прямого доступа к ответам ФНФ. Применяя отношения XOR в линейных блочных кодах, злоумышленники могут обучать модели для предсказания поведения ФНФ, используя только общедоступные вспомогательные данные и задачи.

Продвинутые стратегии атак вышли за рамки простого моделирования «запрос – ответ» и используют дополнительные источники информации. Атаки на основе надежности используют тот факт, что ответы ФНФ вблизи границ принятия решений более чувствительны к шуму и колебаниям окружающей среды [16, 17]. Анализируя стабильность отклика в ходе многочисленных измерений, злоумышленники могут получить представление о внутренней структуре и параметрах схем ФНФ.

Еще один значительный вектор угроз представляют атаки по побочным каналам, когда физическая информация, такая как энергопотребление, электромагнитные излучения или вариации синхронизации, используется для усиления атак на моделирование ML [21]. Эти атаки могут быть особенно эффективны в сочетании с традиционными подходами ML, обеспечивая дополнительные ограничения и информацию для повышения точности модели.

Объединение нескольких векторов атаки создает особенно мощные угрозы. Например, объединение

информации о частичном ответе с измерениями побочных каналов может значительно сократить количество пар «запрос – ответ», необходимых для успешных ML-атак. Такой мультимодальный подход подчеркивает важность учета всех потенциальных источников утечки информации при анализе безопасности ФНФ.

Потенциальную угрозу будущего, которая может кардинально изменить уровень безопасности ФНФ, представляют собой квантовые вычисления. Хотя текущие квантовые алгоритмы могут не применяться непосредственно к моделированию ФНФ, расширенные вычислительные возможности могут позволить использовать новые стратегии атак или сделать невозможные в настоящее время атаки практическими.

### Способы защиты от ML-атак

Для повышения устойчивости ФНФ к атакам, реализуемым с помощью ML, предложено несколько архитектурных инноваций.

Конструкция Cyclic Redundancy Check PUF (CRC-PUF) представляет собой фундаментальный подход, который нарушает прямое сопоставление между запросами и ответами посредством криптографических преобразований [18]. Применяя операции проверки циклической избыточности со случайно выбранными полиномами, CRC-PUF гарантирует, что вероятность восстановления преобразованного запроса криптографически мала, эффективно предотвращая традиционные атаки ML.

В другой архитектуре ФНФ используется механизм двухэтапной обработки запросов, при котором промежуточные ответы используются для модификации последующих запросов [17]. Такой подход скрывает прямую связь между входными запросами и конечными ответами, что значительно усложняет создание предсказательных моделей алгоритмами ML. Рандомизация, вносимая промежуточными этапами обработки, увеличивает эффективное пространство запросов и уменьшает корреляцию между различными парами «запрос – ответ».

Инновации на аппаратном уровне также показали перспективность в противостоянии ML-атакам. Подпороговый ФНФ с делителем напряжения работает в слабых инверсионных областях, где большие колебания порогового напряжения обеспечивают повышенную случайность [3]. Благодаря каскадному соединению нескольких ступеней и тщательному контролю смещения эта конструкция обладает сильными статистическими свойствами, сохраняя устойчивость к различным алгоритмам ML, включая машины опорных векторов, логистическую регрессию и искусственные нейронные сети.

Защитные средства на уровне протокола направлены на ограничение информации, доступной

потенциальным злоумышленникам, а не на модификацию базовой архитектуры ФНФ. Стратегии ограничения запросов ограничивают количество пар «запрос – ответ», которые можно наблюдать, не позволяя злоумышленникам накапливать достаточное количество обучающих данных для эффективных ML-атак [16, 21]. Однако такой подход по своей сути ограничивает возможности сильных ФНФ и может оказаться нецелесообразным для приложений, требующих многочисленных операций аутентификации. Для минимизации утечки информации на этапах настройки и эксплуатации ФНФ были разработаны усовершенствованные протоколы регистрации [21, 23]. Эти протоколы тщательно управляют распределением пар «запрос – ответ» и реализуют безопасные методы вычислений для предотвращения несанкционированного доступа к обучающим данным. Многосторонние вычисления и гомоморфное шифрование могут быть использованы для обеспечения работы ФНФ без раскрытия конфиденциальной информации потенциальным злоумышленникам.

Продвинутые методы (рис. 7) предлагают новый подход к защите ФНФ за счет намеренного внесения ошибок в процесс «запрос – ответ» [20]. Отравляя обучающие данные, доступные потенциальным злоумышленникам, эти методы могут значительно снизить точность ML-моделей, сохраняя при этом корректную работу для легитимных пользователей, которые понимают стратегию отравления. Подход заключается в периодическом предоставлении неправильных ответов на запросы, создавая набор данных, который не может быть эффективно изучен стандартными алгоритмами ML.

Последствия использования вспомогательных данных в системах ФНФ для безопасности привели к разработке специализированных подходов к исправлению ошибок [16, 22]. Здесь показано, что традиционные схемы конкатенированного кодирования, особенно использующие коды повторения в качестве внутренних кодов, очень уязвимы для ML-атак с помощью анализа вспомогательных данных. Избыточность таких кодов предоставляет злоумышленникам достаточно информации для обучения эффективных моделей без доступа к реальным ответам ФНФ. Коды с более высокими кодовыми частотами и более сложной структурой лучше противостоят атакам на вспомогательные данные, в то время как простых кодов, такие как коды с повторением, следует избегать в критически важных приложениях [22]. Анализ различных семейств кодов показывает, что количество и сложность отношений XOR в структуре кода напрямую влияют на уязвимость к ML-атакам.

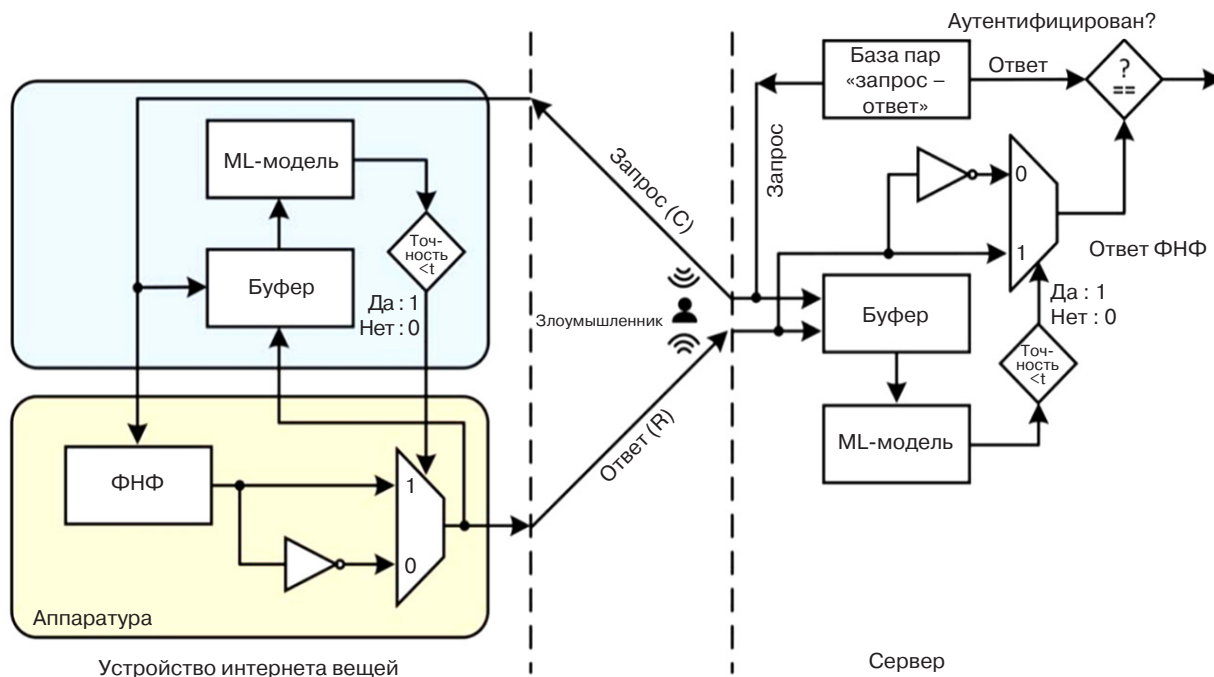


Рис. 7. Блок-схема метода внесения ошибок

Безопасные подходы к исправлению ошибок включают использование методов построения синдромов, систематическое кодирование с низкой утечкой информации и специализированные полярные коды, которые минимизируют утечку информации, сохраняя при этом возможность исправления ошибок [22]. Эти методы направлены на уменьшение корреляции между вспомогательными данными и ответами ФНФ, что затрудняет злоумышленникам извлечение полезной обучающей информации.

Исследования физической реализации позволяют понять практическую эффективность как атак, так и защиты [3, 18, 19]. Так эмпирические исследования различных архитектур ФНФ выявили значительные различия в показателях успешности ML-атак и требуемых объемах обучающих данных. В частности, FPGA<sup>28</sup>-реализация CRC-PUF демонстрирует устойчивость к ML-атакам при сохранении разумных затрат площади и мощности. При разработке были достигнуты нормированные значения inter-HD и intra-HD, равные 0.5065 и 0.0696 соответственно, что свидетельствует о хороших статистических свойствах для приложений безопасности.

Анализ площади и мощности показывает, что ФНФ, устойчивые к ML, могут быть реализованы с разумными затратами по сравнению с классическими архитектурами. Для CRC-PUF требуется 1032 эквивалента вентиля по сравнению с 646 для базового Arbiter PUF, что представляет собой

скромное увеличение при значительном повышении безопасности. Аналогично, архитектура MARPUF<sup>29</sup> достигает устойчивости к ML при площади, значительно превышающей практические пределы для встраиваемых приложений.

Более сложные архитектуры демонстрируют разную степень устойчивости ФНФ. Функции типа «арбитр» с несколькими XOR-каскадами требуют экспоненциально возрастающего числа CRP для успешных атак, но остаются уязвимыми к продвинутым техникам при наличии достаточного количества данных [17, 19, 20]. При этом частота успешных атак падает ниже 60% даже в случае применения наборов обучающих данных значительного размера, что представляет собой значительное улучшение по сравнению с классическими конструкциями.

Реализация ФНФ на основе массива подпороговых делителей напряжения в 65-нм КМОП-технологии показывает многообещающие результаты с энергопотреблением всего 0.43 пДж/бит [3]. При воздействии различных ML-атак, включая логистическую регрессию, искусственные нейронные сети и машины опорных векторов с нелинейными RBF<sup>30</sup>-ядрами, точность предсказания остается на уровне около 60%, демонстрируя практическую устойчивость к ML.

<sup>29</sup> Physical unclonable function with improved machine learning attack resistance – ФНФ, обеспечивающая устойчивость к атакам машинного обучения.

<sup>30</sup> Radial basis function – радиальная базисная функция.

<sup>28</sup> Field-programmable gate array – программируемая пользователем вентильная матрица.

### Направления исследований методов защиты от ML-атак

Разработка ФНФ, устойчивых к ML, связана с компромиссами между безопасностью и практическими соображениями, такими как площадь, мощность, надежность и производительность [3, 18, 19]. Конструкции с высокой степенью защиты часто требуют дополнительной аппаратной сложности, увеличения возможностей коррекции ошибок или снижения производительности, что может быть неприемлемо для приложений, чувствительных к стоимости.

Анализ ML-атак на ФНФ выявляет фундаментальные ограничения в безопасности, обеспечиваемой текущими архитектурами. Многие практические реализации не достигают теоретического максимума энтропии, оставляя место для ML-атак, использующих статистические закономерности [16, 17, 22]. Математические модели, лежащие в основе большинства конструкций ФНФ, по своей сути содержат обучаемые шаблоны, которые могут быть использованы достаточно сложными алгоритмами ML. Это позволяет предположить, что для достижения истинной устойчивости к ML могут потребоваться принципиально иные подходы к проектированию ФНФ, а не постепенные усовершенствования существующих архитектур.

Масштабируемость атак ML представляет собой особую проблему для будущих реализаций ФНФ. По мере того, как алгоритмы ML становятся все более мощными и доступными, барьер для проведения успешных атак продолжает снижаться. Эта тенденция говорит о том, что безопасность ФНФ не может зависеть только от вычислительной сложности моделирования атак, а должна быть направлена на фундаментальные информационно-теоретические принципы безопасности.

Подход с ограничением запроса, хотя и является теоретически обоснованным, сильно ограничивает возможности сильных ФНФ и может оказаться непрактичным для приложений, требующих частой аутентификации или генерации ключей [16, 21]. Это ограничение фактически сводит сильные ФНФ к функциональности слабых ФНФ, устраняя многие из преимуществ, которые изначально мотивировали их разработку.

Требования к исправлению ошибок представляют собой еще одно существенное ограничение. Уязвимость вспомогательных данных, обнаруженная в недавнем исследовании [22], показывает, что даже кажущиеся безопасными подходы к исправлению ошибок могут создавать векторы атак. При выборе подходящих кодов коррекции ошибок теперь необходимо учитывать не только традиционные показатели,

такие как возможности коррекции и сложность реализации, но и безопасность от атак ML с помощью анализа вспомогательных данных.

Анализ протоколов аутентификации и обмена ключами на основе ФНФ также показывает различную степень уязвимости к ML-атакам [21, 23]. Традиционные протоколы, основанные на прямом обмене запросами и ответами, очень уязвимы для атак моделирования, если наблюдается достаточное количество CRP. Безопасность этих протоколов в основном зависит от устойчивости ФНФ к ML-атакам, а не от защиты на уровне протокола.

Последние инновации в области протоколов направлены на минимизацию информации, доступной злоумышленникам, при сохранении функциональных требований [23]. Такие методы, как безопасные многосторонние вычисления, гомоморфное шифрование и доказательства с нулевым знанием, позволяют использовать ФНФ без раскрытия пар «запрос – ответ» потенциальным злоумышленникам. Однако эти подходы часто требуют значительных вычислительных затрат, что может быть нецелесообразно для устройств с ограниченными ресурсами. Более сложные протоколы используют обфускацию запросов, маскировку ответов и механизмы временной безопасности для ограничения возможностей злоумышленников [20, 21]. Однако многие из этих подходов оказались недостаточными для борьбы с решительными противниками, имеющими доступ к современным методам ML. Основная проблема заключается в том, чтобы сбалансировать безопасность с практическими ограничениями, такими как затраты на связь, вычислительные требования и устойчивость к ошибкам.

Интеграция ФНФ в сложные системы создает дополнительные направления для атак через анализ побочных каналов, внедрение неисправностей и уязвимости на уровне системы [21]. По мере того, как ФНФ все шире внедряются в критически важные приложения, растет мотивация для сложных атак, что требует более надежного анализа безопасности и механизмов защиты. Таким образом, быстрое развитие методов ML создает постоянные проблемы для безопасности ФНФ. Появляющиеся подходы, такие как ML противника, трансферное обучение и мета-обучение, могут создавать новые стратегии атак, которые не смогут отразить существующие средства защиты [20, 23].

Разработка стандартизированных методик оценки безопасности ФНФ имеет решающее значение для справедливого сравнения различных конструкций и методов атаки [17, 21]. Будущие исследования ФНФ должны быть направлены на разработку архитектур с доказуемыми свойствами безопасности, а не на эмпирическую устойчивость к существующим методам

атак [16, 18]. В существующих оценках часто используются различные наборы данных, параметры атак и метрики успеха, что затрудняет объективную оценку относительных уровней безопасности. Информационно-теоретические подходы, которые могут гарантировать безопасность даже против вычислительно неограниченных противников, обеспечивают более прочный фундамент для долгосрочной безопасности.

Динамика развития систем доверенного проектирования позволяет предположить, что для достижения долгосрочной безопасности необходимо перейти от постепенных улучшений текущих архитектур к принципиально иным подходам, основанным на информационно-теоретических принципах безопасности [24, 25]. Результаты исследования подчеркивают важность тщательного моделирования угроз, консервативных предположений о безопасности и стратегий глубокой защиты для практиков, внедряющих системы на основе ФНФ [26–29].

### ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФНФ

Модули ФНФ используются в широком спектре применений для защиты устройств в зависимости от класса защиты (слабого или стойкого) чипа, встроенного в устройство. Ответы ФНФ могут быть использованы непосредственно для идентификации аналогично тому, как это делается при биометрической идентификации. Как было показано в первой части цикла статей [1], пороговое значение, используемое для принятия решения о положительной идентификации, зависит от гистограмм *intra*-HD и *inter*-HD. В общем случае перекрытия соответствующих гистограмм задание порогового значения равносильно компромиссу между частотой ложного подтверждения (*false-acceptance rate*, FAR) и частотой ложного отклонения (*false-rejection rate*, FRR), аналогично тому, как это применяется в метрологии. Оптимальный выбор, сводящий к минимуму сумму значений FAR и FRR, достигается путем установки порогового значения на пересечении обеих гистограмм, но для конкретных приложений могут быть желательны и другие компромиссы. Кроме того, очевидно, что уникальная идентификация возможна с высокой вероятностью только в том случае, если ответ содержит достаточную энтропию по отношению к размеру выборки.

ФНФ применяются, в частности, для: 1) взаимной аутентификации устройств интернета вещей [30, 31]; 2) идентификации потока сообщений с запросами аутентификации мобильных беспилотных летательных аппаратов, оснащенных ФНФ и наземными станциями [32, 33]; 3) обеспечения связи между устройствами, датчиками и системой

мониторинга состояния здоровья, в которой сервер также оснащен соответствующим ФНФ и используется защищенная база данных для хранения собранных вариантов пар CRP [34]; 4) оснащения средствами защиты и безопасности транспортных средств [35, 36]; 5) обеспечения безопасности и конфиденциальности при передаче данных в сетях [37–39].

### Идентификация устройств

На этапе регистрации в базе данных сохраняется CRP от каждой ФНФ, а также идентификационные данные физической системы, в которую она встроена. Как было показано в [1], во время идентификации проверяющий сравнивает случайную пару CRP с хранящимися в базе данных ответами ФНФ для представленной системы. Если наблюдаемый отклик достаточно близок к отклику в базе данных, идентификация выполняется успешно, в противном случае происходит сбой. Чтобы предотвратить повторные атаки, каждая пара CRP должна использоваться только один раз для каждого экземпляра ФНФ и должна быть удалена из базы данных после идентификации (рис. 8 и [40]).

### Генерация ключей шифрования

ФНФ генерируется на основе случайности, обусловленной технологическими допусками, и при генерации и хранении секретных ключей на ее основе не требуется ее программирование. Поскольку эта случайность постоянно фиксируется в (суб)микроскопических физических деталях чипа, ключ остается неизменным, может воспроизводиться несколько раз, и не требуется энергонезависимая память ключей, что также обеспечивает дополнительную защиту от атак по сторонним каналам.

Однако ответы ФНФ обычно зашумлены и для извлечения криптографического ключа из ответов требуется промежуточный этап обработки. Эта проблема известна в теории информации как извлечение ключа шифрования из сигнала с шумом и, как правило, решается с помощью двухэтапного алгоритма. На начальном этапе генерации запрашивается ФНФ, и алгоритм создает секретный ключ вместе с некоторой дополнительной информацией, составляющей вспомогательные данные. Ключ и эти данные хранятся в защищенной базе данных независимо от устройства. На этапе воспроизведения эти вспомогательные данные сообщаются алгоритму, который использует их для извлечения из ФНФ того же самого ключа, что был создан на этапе генерации. Эти алгоритмы можно сконструировать таким образом, чтобы ключ был совершенно секретным, даже если вспомогательные данные могут быть открыто переданы. Чтобы обеспечить надежность этого способа генерации ключей, применяются

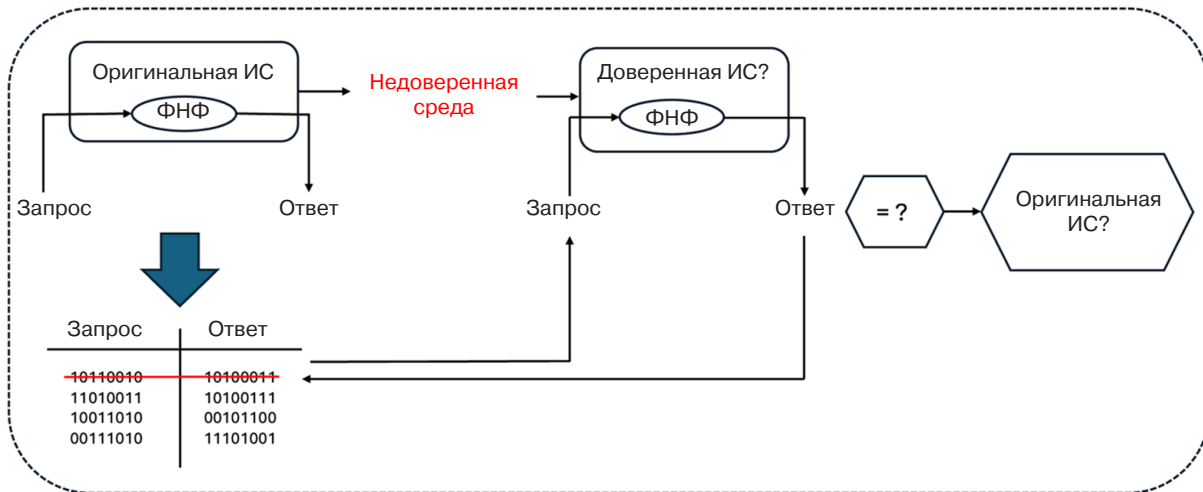


Рис. 8. Применение ФНФ в протоколе аутентификации [40]

специальные способы устранения ошибок [41, 42], в частности, алгоритмы генерации (Gen) и воспроизведения (Rep), обеспечивающие извлечения стабильной воспроизводимой информации из ответов ФНФ, основой которых является сравнение двух сообщений, составленных из зашумленных зашифрованных случайных данных и эталонных, к которым для распознавания присоединены несекретные вспомогательные данные. Практические примеры этих алгоритмов предложены, например, в [43–45].

Таким образом, применение ФНФ позволяет реализовать аппаратно-запутанную криптографию как специальный метод, в котором цифровой ключ шифра не хранится в памяти, а секретным элементом является полное уникальное поведение экземпляра ФНФ во встраиваемом устройстве. Это в значительной степени не позволяет злоумышленникам, использующим энергонезависимую память, получить полезную информацию. Аппаратно-запутанная криптография тесно связана с областью доказуемой физической безопасности, поскольку применение ФНФ может также послужить для доказательства несанкционированного доступа к хранилищу ключей (см, например, [46]).

### Защита от реинжиниринга ИС (intellectual property protection)

Объекты интеллектуальной собственности (intellectual property), входящие в состав микросхем, крайне важно защитить от многочисленных угроз безопасности, наносящих финансовые потери полупроводниковым компаниям. Такими угрозами являются, в частности, подделка, клонирование, обратный инжиниринг и зависимость от некачественных компонентов. Примерами исследований в этой области являются работы, посвященные аппаратной защите блока ФНФ SRAM на программируемой

логической интегральной схеме, и способ предотвращения копирования IP<sup>31</sup>-адреса программного обеспечения для защиты от несанкционированного доступа к встроенному программному обеспечению, основанные на применении ФНФ и моделей нейронных сетей [47–49].

### Генерация случайных чисел

Кремниевые ФНФ используются в качестве источника генерации случайных чисел, формирование которых необходимо для криптографических систем. Характерными примерами исследований в этой области служат работы [50, 51], в которых авторы использовали ответы ФНФ для формирования исходных данных генератора случайных чисел.

### Защита платежных систем (payment)

В работах [52, 53] ответы ФНФ используются в битовых строках аутентификации, ключах шифрования и генерации токенов электронной наличности (PUF-Cash) для разработки архитектуры приложений, которую можно использовать в схемах электронных платежей, гарантируя при этом анонимность идентификационных данных пользователей для других организаций, таких как банки и продавцы. В работе [54] предложено снабжать кредитную/дебетовую карту встроенным чипом с ФНФ, обеспечивающим закрытый ключ, безопасную связь и аутентификацию данных.

### Защита памяти и программ и обеспечение безопасности коммуникаций

В настоящее время ряд компаний и исследовательских центров специализируются в разработке

<sup>31</sup> Internet protocol – уникальный числовой идентификатор устройства в компьютерной сети.

специальных мер по обеспечению повышенной доверенности оборудования и программного обеспечения. В частности, характерным примером служит техническая документация ассоциации [54], созданной для разработки, определения и продвижения открытых, независимых от поставщиков, глобальных отраслевых стандартов, поддерживающих аппаратную основу доверия для взаимозаменяемых доверенных вычислительных платформ, в которой указывается, что масштабные угрозы безопасности, обусловленные геополитическими проблемами и проблемами, связанными с суверенитетом данных, угрожают замедлить внедрение и рост индустрии интернета вещей и стимулируют необходимость создания надежных экосистем цепочки поставок в Азии, Европе и Северной и Южной Америке. Подчеркивается, что ключи, используемые для цифровой подписи и верификации, а также криптографические функции, обеспечивающие безопасный процесс загрузки операционных систем, являются важным средством обеспечения безопасности всей системы в целом. Отмечается, что главным и единственным эффективным средством, обеспечивающим безопасное функционирование, следует признать применение микросхем, снабженных ФНФ, в частности ФНФ нового типа, разработанного компанией eMemory Technology Inc<sup>32</sup>. Технология NeoPUF, разработанная этой компанией, использует различия в туннельном эффекте оксидного слоя для достижения высоких характеристик ФНФ (inter-HD = 50%; intra-HD ~ 0%)<sup>33</sup>.

Пример применения ФНФ для защиты конфиденциальности и целостности инструкций и данных в памяти от физических и программных атак приведен в работах [38, 55].

Лицензирование программного обеспечения необходимо для защиты от несанкционированных модификаций и запуска на несанкционированных платформах. Идея применения ФНФ заключается в том, чтобы на основе сгенерированных ключей для выполнения некоторых критических операций, например, старт или перезапуск системы, программное обеспечение взаимодействовало с ФНФ [56]. Механизм лицензирования программного обеспечения, основанный на ФНФ, предложен в работе [57]. Компьютер пользователя оснащается ФНФ на основе схемы SRAM, что придает ему уникальную идентификацию. Когда пользователю необходимо

приобрести необходимое программное обеспечение, компания устанавливает соединение с персональным компьютером пользователя, чтобы получить выходные данные ФНФ и сделать их доступными в программном обеспечении в виде лицензии. Клиент устанавливает программное обеспечение, и во время установки между программным обеспечением и персональным компьютером происходит механизм аутентификации. При этом встроенная лицензия сравнивается с выходными данными ФНФ, которая обеспечивает выполнение экземпляра программного обеспечения только на конкретном устройстве.

Недавно новый запатентованный подход применения ФНФ, названный Equipotential Timing, предложен компанией Granite Mountain Technologies<sup>34</sup>. Он предполагает использовать гигабайтные ФНФ (Giga-PUF) для проектирования функций, которые физически не могут быть отключены. Подход Equipotential Timing обеспечивает стабильные, синтезируемые реализации ФНФ, которые могут быть реализованы в виде «мягких» IP-блоков и интегрированы в любой дизайн по низкой цене. Эти Giga-PUF можно быстро и легко масштабировать для любых схем, во всех технологических узлах и кремниевых фабриках, предоставляя доступ всем компаниям к защите своих продуктов с помощью экспоненциальных решений ФНФ, которые обеспечивают подлинное доверие к оборудованию.

Еще одно применение модулей ФНФ, включенных в состав ИС – это обеспечение безопасной связи для аутентификации устройств интернета вещей в протоколе обмена ключами [58–60].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналоговые и пассивные ФНФ образуют важный класс аппаратных примитивов безопасности, дополняя решения на основе задержек и памяти. Аналоговые схемы на транзисторных и диодных элементах обеспечивают высокую энтропию и низкую энергоемкость отклика, однако требуют продуманной стабилизации и калибровки для подавления влияния PVT-факторов и старения.

Пассивные подходы – резистивные «отпечатки» силовой сети, Via PUF и Coating PUF – привлекательны минимальными накладными расходами, высокой стабильностью и сложностью подделки.

Для практического применения рекомендуются:

- использование внутренних механизмов компенсации и автообнуления, а также отбраковывание/маскирование нестабильных элементов;

<sup>32</sup> eMemory Technology Inc. <https://www.ememory.com.tw/>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.

<sup>33</sup> PUFsecurity. NeoPUF® – A Reliable and Non-Traceable Quantum Tunneling PUF. <https://www.pufsecurity.com/document/neopuf-a-reliable-and-non-traceable-quantum-tunneling-puf/>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.

<sup>34</sup> Granite Mountain Technologies. Physical Unclonable Functions. <https://gmt-semi.com/solutions/puf/>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.

- единая стандартизованная цепочка оцифровки (датчик – усилитель/компаратор – кодовая обработка);
- интеграция с легкими техниками коррекции ошибок или фазовой фильтрацией там, где это оправдано;
- оценка устойчивости к атакам моделирования и побочным каналам с учетом аналоговой специфики (температура, питание, инъекция шумов).

Развитие ML выявило высокую уязвимость ряда классических ФНФ (особенно с линейными моделями задержек); усложнение конструкции (XOR, каскады) нередко недостаточно, а утечки вспомогательных/побочных данных позволяют проводить атаки без прямого доступа к ответам.

Защитные механизмы демонстрируют различную степень успеха, а такие архитектурные инновации, как CRC-PUF, демонстрируют повышенную устойчивость к ML-атакам. Однако фундаментальная проблема остается в том, что большинство современных конструкций ФНФ основано на математических моделях, которые по своей природе поддаются обучению достаточно сложными алгоритмами.

При выборе подходящих архитектур ФНФ, кодов коррекции ошибок и операционных протоколов необходимо учитывать не только текущие возможности атак, но и потенциальные будущие достижения в области методов ML. По мере развития этой области интеграция исследований в области безопасности ФНФ с более широкими достижениями в области ML, криптографии и аппаратной безопасности будет иметь важное значение для разработки надежных решений. Конечной целью остается разработка действительно неклонированных функций, которые сохраняют свои защитные свойства даже перед лицом произвольно изоцированных вычислительных атак.

ФНФ могут использоваться в качестве важных составляющих блоков в системах аутентификации, особенно в аппаратных токенах с ограниченными ресурсами и систем интернета вещей (см., в частности, услуги компании eMemory Technology Inc).

Будущие направления исследований:

- 1) стандартизация, развитие алгоритмов и инструментов анализа, повышение энергоэффективности;
- 2) повышение безопасности и защищенности от атак средствами анализа побочных каналов, атак на основе ML;
- 3) снижение эффектов влияния окружающей среды;
- 4) применение новых специальных алгоритмов, в частности, управляемых и реконфигурируемых ФНФ;

5) разработка ФНФ на перспективных физических эффектах, в частности квантовые ФНФ на основе ядерных магнитных моментов, резонансных туннельных диодов, плазменной и лантаноидной люминесценции, джозефсоновских переходов, изменения потока электронов в нанокольцах (эффект Ааронова – Бома), квантовой запутанности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов № FSFZ-2026-0003) и с применением оборудования Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА (соглашение от 01.09.2021 № 075-15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010).

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State task for universities No. FSFZ-2026-0003) and using the equipment of the Center for Collective Use of RTU MIREA (agreement dated September 01, 2021, No. 075-15-2021-689, unique identification number 2296.61321X0010).

### Вклад авторов

**Е.Ф. Певцов** – концепция исследования, разработка структуры обзора, написание текста статьи.

**Т.А. Деменкова** – концепция исследования, разработка структуры обзора, обобщение результатов.

**М.И. Малето** – анализ и систематизация литературы, обобщение результатов.

**А.С. Сигов** – научное консультирование, научное редактирование статьи, утверждение финальной версии рукописи.

**Ю.А. Коротаев** – анализ и систематизация литературы, написание текста статьи, обобщение результатов.

**Н.Д. Евгеньев** – анализ и систематизация литературы, написание текста статьи, обобщение результатов.

Все авторы прочитали и одобрили опубликованную версию рукописи.

### Authors' contributions

**E.Ph. Pevtsov** – study conceptualization, review outline and structure, and manuscript writing.

**T.A. Demenkova** – study conceptualization, review outline and structure, and synthesis of the results.

**M.I. Maleto** – literature analysis and systematization, synthesis of the results.

**A.S. Sigov** – scientific consulting, scientific editing, and final approval of the manuscript.

**Yu.A. Korotaev** – literature analysis and systematization, manuscript writing, and synthesis of the results.

**N.D. Evgenyev** – literature analysis and systematization, manuscript writing, and synthesis of the results.

All authors have read and approved the published version of the manuscript.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Певцов Е.Ф., Деменкова Т.А., Коротаев Ю.А., Сигов А.С. Физически неклонлируемые функции в цифровых интегральных схемах. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):80–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-80-102> [Pevtsov E.Ph., Demenkova T.A., Korotaev Yu.A., Sigov A.S. Physically unclonable functions in digital integrated circuits. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):80–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-80-102> ]
2. Lofstrom K., Daasch R., Taylor D. IC identification circuit using device mismatch. In: *Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2000)*. February 7–9, 2000. San Francisco, CA, USA. Piscataway, NJ: IEEE; 2000. P. 372–373. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2000.839821>
3. Venkatesh A., Sanyal A. A machine learning resistant strong PUF using subthreshold voltage divider array in 65nm CMOS. In: *Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2019)*. May 26–29, 2019. Sapporo, Japan. Piscataway, NJ: IEEE; 2019. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702525>
4. Mitchell-Moreno J.H., Espinosa Flores-Verdad G. A low bit instability CMOS PUF based on current mirrors and WTA cells. *J. Electron. Test*. 2023;39:611–620. <https://doi.org/10.1007/s10836-023-06085-4>
5. Jadhav V.D., Kallloor R., Poola L., Prabhakar T.V. Diode-PUF for intelligent electronic devices. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS 2024)*. January 2–6, 2024. Bengaluru, India. Piscataway, NJ: IEEE; 2024. P. 330–332. <https://doi.org/10.1109/COMSNETS59351.2024.10427169>
6. Kim N., Jeon S.-B., Jang B. Hardware-intrinsic physical unclonable functions by harnessing nonlinear conductance variation in oxide semiconductor-based diode. *Nanomaterials (Basel)*. 2023;13(4):675. <https://doi.org/10.3390/nano13040675>
7. Takahashi Y., Koyasu H., Kumar S.D., et al. Quasi-adiabatic SRAM based silicon physical unclonable function. *SN Comput. Sci*. 2020;1:237. <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00253-5>
8. Liu J., Takahashi Y. Design of low-power 6T adiabatic PUF circuit. In: *Proceedings of the 2024 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS 2024)*. October 27–30, 2024. Taipei, Taiwan. Piscataway, NJ: IEEE; 2024. P. 599–603. <https://doi.org/10.1109/APCCAS62602.2024.10808318>
9. Nagata S., Takahashi Y. A design of PUF circuit using adiabatic logic. In: *Proceedings of the 2024 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS 2024)*. October 27–30, 2024. Taipei, Taiwan. Piscataway, NJ: IEEE; 2024. P. 595–598. <https://doi.org/10.1109/APCCAS62602.2024.10808900>
10. Helinski R., Acharyya D., Plusquellic J. A physical unclonable function defined using power distribution system equivalent resistance variations. In: *Proceedings of the 46th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC 2009)*. July 26–31, 2009. San Francisco, CA, USA. New York: ACM; 2009. P. 676–681. <https://doi.org/10.1145/1629911.1630089>
11. Jeon D., Baek J.H., Kim Y.-D., Lee J., Kim D.K., Choi B.-D. A physical unclonable function with bit error rate  $<2.3 \times 10^{-8}$  based on contact formation probability without error correction code. *IEEE J. Solid-State Circuits*. 2020;55(3):805–816. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2019.2951415>
12. Csaba G., Ju X., Chen Q., Porod W., Schmidhuber J., Schlichtmann U., Lugli P., Rührmair U. On-chip electric waves: an analog circuit approach to physical uncloneable functions [preprint]. *IACR Cryptology ePrint Archive*. 2009;2009/246.
13. Tuyls P., Schrijen G.-J., Škorić B., van Geloven J., Verhaegh N., Wolters R. Read-proof hardware from protective coatings. In: Goubin L., Matsui M. (Eds.). *Cryptographic Hardware and Embedded Systems. CHES 2006*, Yokohama, Japan, October 10–13, 2006. Book Series: Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer; 2006. V. 4249. P. 369–383. [https://doi.org/10.1007/11894063\\_29](https://doi.org/10.1007/11894063_29)
14. Skoric B., Maubach S., Kevenaar T., Tuyls P. Information-theoretic analysis of coating PUFs [preprint]. *IACR Cryptology ePrint Archive*. 2006;2006/101.
15. Aysu A., Farhady Ghalaty N., Franklin Z., Yali M., Schaumont P. Digital fingerprints for low-cost platforms using MEMS sensors. In: *Proceedings of the Workshop on Embedded Systems Security (WESS '13)*. September 29, 2013. Montreal, QC, Canada. New York: ACM; 2013. Article 2. P. 1–6. <https://doi.org/10.1145/2527317.2527319>
16. Yu M.D., M'Raihi D., Sowell R., Devadas S. Lightweight and secure PUF key storage using limits of machine learning. In: Preneel B., Takagi T. (Eds.). *Cryptographic Hardware and Embedded Systems. CHES 2011*. Book Series: Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer; 2011. V. 6917. P. 358–373. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23951-9\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23951-9_24)
17. Saadvikaa N., Saketi K.J., Gopishetti A., et al. PUF modeling attacks using deep learning and machine learning algorithms. *Eng. Proceedings*. 2023;56(1):187. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15948>
18. Dubrova E., Näslund O., Degen B., et al. CRC-PUF: A machine learning attack resistant lightweight PUF construction. In: *2019 IEEE European symposium on security and privacy workshops (EuroS&PW)*. IEEE; 2019. P. 264–271. <https://doi.org/10.1109/EuroSPW.2019.00036>
19. Tripathy S., Rai V.K., Mathew J. MARPUF: physical unclonable function with improved machine learning attack resistance. *IET Circuits, Devices & Systems*. 2021;15(5):465–474. <https://doi.org/10.1049/cds2.12042>
20. Ebrahimabadi M., Lalouani W., Younis M., et al. Countering PUF modeling attacks through adversarial machine learning. In: *2021 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)*. IEEE. 2021. P. 356–361. <https://doi.org/10.1109/ISVLSI51109.2021.00071>
21. Khalfoufi S., Leneutre J., Villard A., et al. Security analysis of machine learning-based PUF enrollment protocols: A review. *Sensors*. 2021;21(24):8415. <https://doi.org/10.3390/s21248415>
22. Strieder E., Frisch C., Pehl M. Machine learning of physical unclonable functions using helper data: Revealing a pitfall in the fuzzy commitment scheme. *IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*. 2021;2:1–36. <https://doi.org/10.46586/tches.v2021.i2.1-36>

23. Ali-Pour A., Afghah F., Hely D., et al. Secure PUF-based authentication and key exchange protocol using machine learning. In: *2022 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)*. IEEE. 2022. P. 386–389. <https://doi.org/10.1109/ISVLSI54635.2022.00086>
24. Yadav A., Kumar S., Singh J. A review of physical unclonable functions (PUFs) and its applications in IoT environment. In: Hu Y.C., Tiwari S., Trivedi M.C., Mishra K.K. (Eds.). *Ambient Communications and Computer Systems*. Book Series: Lecture Notes in Networks and Systems. Singapore: Springer; 2022. V. 356. P. 1–3. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7952-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7952-0_1)
25. Gao Y., Al-Sarawi S.F., Abbott D. Physical unclonable functions. *Nat. Electron.* 2020;3(2):81–91. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0372-5>
26. Wisioł N., Mühl C., Pirnay N., et al. Splitting the interpose PUF: A novel modeling attack strategy. *IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*. 2020;3:97–120. <https://doi.org/10.13154/tches.v2020.i3.97-120>
27. Arapinis M., Delavar M., Doosti M., et al. Quantum physical unclonable functions: Possibilities and impossibilities. *Quantum*. 2021;5:475. <https://doi.org/10.22331/q-2021-06-15-475>
28. Kayaci N., Ozdemir R., Kalay M., et al. Organic light-emitting physically unclonable functions. *Adv. Funct. Mater.* 2022;32(14):2108675. <https://doi.org/10.1002/adfm.202108675>
29. Awano H., Iizuka T., Ikeda M. PUFNet: A deep neural network based modeling attack for physically unclonable function. In: *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. IEEE. 2019. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702431>
30. Idriss T.A., Idriss H.A., Bayoumi M.A. A lightweight PUF-based authentication protocol using secret pattern recognition for constrained IoT devices. *IEEE Access*. 2021;9:80546–80558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3084903>
31. Shah A., Pandya H., Soni M., Karimov A., Maaliw R.R., Keshta I. PUF-based lightweight authentication protocol for IoT devices. In: Balas V.E., Semwal V.B., Khandare A. (Eds.). *Intelligent Computing and Networking. IC-ICN 2023*. Book Series: Lecture Notes in Networks and Systems. Singapore: Springer; 2023. V. 699. P. 401–412. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-3177-4\\_29](https://doi.org/10.1007/978-981-99-3177-4_29)
32. Alladi T., Deo M., Chamola V., Sikdar B., Chao H.C. SecAuthUAV: a novel authentication scheme for UAV-ground station and UAV-UAV communication. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020;69(12):15068–15077. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3033060>
33. Bansal G., Sikdar B. S-MAPS: scalable mutual authentication protocol for dynamic UAV swarms. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2021;70(11):12088–12100. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3116163>
34. Yanambaka V.P., Mohanty S.P., Koungianos E., Puthal D. PMsec: physical unclonable function-based robust and lightweight authentication in the Internet of Medical Things. *IEEE Trans. Consum. Electron.* 2019;65(3):388–397. <https://doi.org/10.1109/TCE.2019.2926192>
35. Jiang Q., Zhang X., Zhang N., et al. Three-factor authentication protocol using physical unclonable function for IoV. *Comput. Commun.* 2021;173:45–55. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.03.022>
36. Mershad K., Cheikhrouhou O., Ismail L. Proof of accumulated trust: a new consensus protocol for the security of the IoV. *Veh. Commun.* 2021;32:100392. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100392>
37. Kaveh M., Aghapour S., Martín D., Mosavi M.R. A secure lightweight signcryption scheme for smart grid communications using reliable physically unclonable function. In: *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering & 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. June 9–12, 2020. Madrid, Spain. Piscataway, NJ: IEEE; 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160596>
38. Cao Y.-N., Wang Y., Ding Y., Zheng H., Guan Z., Wang H. A PUF-based lightweight authenticated metering data collection scheme with privacy protection in smart grid. In: *2021 IEEE International Conference on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCLOUD/SocialCom/SustainCom)*. August 30 – September 3, 2021. New York, USA. Piscataway, NJ: IEEE; 2021. P. 876–883. <https://doi.org/10.1109/ISPA-BDCLOUD-SocialCom-SustainCom52081.2021.00124>
39. Maqsooq B., Qadri S., Shamshad S., Ayub M.F., Mahmood K., Kumar N. An identity-based authentication protocol for smart grid environment using physical unclonable function. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2021;12(5):4426–4434. <https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3072244>
40. Zerrouki F., Ouchani S., Bouarfa H. PUF-based mutual authentication and session key establishment protocol for IoT devices. *J. Ambient Intell. Human. Comput.* 2023;14:12575–12593. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-04321-x>
41. Müelich S., Bossert M. *A New Error Correction Scheme for Physical unclonable Functions*. arXiv. arXiv:1611.01960 [cs.CR]. 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.01960>
42. Shamsoshoara A., Korenda A.R., Afghah F., Zeadally S. *A Survey on Hardware-Based Security Mechanisms for Internet of Things*. arXiv. arXiv:1907.12525 [cs.CR]. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.12525>
43. Maes R., Verbauwhede I. Physically Unclonable Functions: A Study on the State of the Art and Future Research Directions. In: Sadeghi A.-R., Naccache D. *Towards Hardware-Intrinsic Security: Foundations and Practice*. Book series: Information Security and Cryptography. Berlin: Springer; 2010. P. 3–37. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14452-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14452-3_1)
44. Dodis Y., Ostrovsky R., Reyzin L., Smith A. Fuzzy extractors: how to generate strong keys from biometrics and other noisy data. *SIAM J. Comput.* 2008;38(1):97–139. <https://doi.org/10.1137/060651380>
45. Muthammal R., Sindhuja N. VLSI architecture of turbo codes for dedicated short-range communication. *Int. J. Eng. Res. Online*. 2015;3(5):412–416. URL: [https://www.researchgate.net/publication/321669464\\_VLSI\\_Architecture\\_of\\_Turbo\\_Codes-IP\\_Secure\\_With\\_PUF\\_for\\_DSRC\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/321669464_VLSI_Architecture_of_Turbo_Codes-IP_Secure_With_PUF_for_DSRC_systems). Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.
46. Wong C.-W., Wu M. Counterfeit detection using paper PUF and mobile cameras. In: *Proceedings of the IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS 2015)*. November 16–19, 2015. Rome, Italy. Piscataway, NJ: IEEE; 2015. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/WIFS.2015.7368579>

47. Zheng J., Potkonjak M. A digital PUF-based IP protection architecture for network embedded systems. In: *Proceedings of the Tenth ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems (ANCS'14)*. 2014. P. 255–256. <https://doi.org/10.1145/2658260.2661776>
48. Zhang J., Lin Y., Lyu Y., Qu G. A PUF-FSM binding scheme for FPGA IP protection and pay-per-device licensing. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.* 2015;10(6):1137–1150. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2015.2400413>
49. Guo Q., Gong Y., Hu Y., Li X.-W. PUF-based pay-per-device scheme for IP protection of CNN model. In: *2018 IEEE Asian Test Symposium (ATS 2018)*. December 10–13, 2018. Hefei, China. Piscataway, NJ: IEEE; 2018. P. 115–120. <https://doi.org/10.1109/ATS.2018.00032>
50. Kalanadhabhatta S., Kumar D., Anumandla K.K., Reddy A., Acharyya A. PUF-based secure chaotic random number generator design methodology. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.* 2020;28(9):1994–2004. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2020.2979269>
51. Kaya T. A true random number generator based on a Chua and RO-PUF: design, implementation and statistical analysis. *Analog Integr. Circ. Sig. Process.* 2020;102:577–588. <https://doi.org/10.1007/s10470-019-01474-2>
52. Calhoun J., Minwalla C., Helmich C., Saqib F., Che W., Plusquellic J. Physical Unclonable Function (PUF)-based e-cash transaction protocol (PUF-Cash). *Cryptography*. 2019;3(3):18. <https://doi.org/10.3390/CRYPTOGRAPHY3030018>
53. Zhang Y., Qin Y., Feng D., Yang B., Wang W. An efficient Trustzone-based in-application isolation schema for mobile authenticators. In: Lin X., Ghorbani A., Ren K., Zhu S., Zhang A. (Eds.). *Security and Privacy in Communication Networks. SecureComm 2017*. Book Series: Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Cham: Springer; 2018. V. 238. P. 585–605. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78813-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78813-5_30)
54. Kish L.B., Entesari K., Granqvist C.G., Kwan C. Unconditionally secure credit/debit card chip scheme and physical unclonable function. *Fluctuation Noise Lett.* 2017;16(1):1750002. <https://doi.org/10.1142/S021947751750002X>
55. Suh G.E., O'Donnell C., Devadas S. Aegis: a single-chip secure processor. *IEEE Des. Test Comput.* 2007;24(6):570–580. <https://doi.org/10.1109/MDT.2007.179>
56. Suresh V., Manimegalai R. SPIC-SRAM PUF integrated chip based software licensing model. In: Thampi S., Madria S., Wang G., Rawat D., Alcaraz Calero J. (Eds.). *Security in Computing and Communications. SSCC 2018. Communications in Computer and Information Science*. Springer; 2018. V. 969. P. 377–388. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-5826-5\\_29](https://doi.org/10.1007/978-981-13-5826-5_29)
57. Kohnhäuser F., Schaller A., Katzenbeisser S. PUF-based software protection for low-end embedded devices. In: Conti M., Schunter M., Askoxylakis I. (Eds.). *Trust and Trustworthy Computing. Trust 2015*. Book Series: Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer; 2015. V. 9229. P. 3–21. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22846-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22846-4_1)
58. Zheng Y., Liu W., Gu C., Chang C-H. *PUF-based Mutual Authentication and Key-Exchange Protocol for Peer-to-Peer IoT Applications* [preprint]. *TechRxiv*; 2021.
59. Mahmood K., Shamshad S., Rana M., et al. PUF-enabled lightweight key-exchange and mutual authentication protocol for multi-server-based D2D communication. *J. Inf. Secur. Appl.* 2021;61:102900. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2021.102900>
60. Bathalapalli V.K.V.V., Mohanty S.P., Pan C., Kougiianos E. QPUF: quantum physical unclonable functions for security-by-design of industrial Internet-of-Things. In: *2023 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES 2023)*. December 18–20, 2023. Hyderabad, India. Piscataway, NJ: IEEE; 2023. P. 296–301. <https://doi.org/10.1109/iSES58672.2023.00067>

#### Об авторах

**Певцов Евгений Филиппович**, к.т.н., директор структурного подразделения «Центр проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pevtsov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602652601, ResearcherID M-2709-2016, SPIN-код РИНЦ 1410-2483, <https://orcid.org/0000-0001-6264-1231>

**Деменкова Татьяна Александровна**, к.т.н., доцент, кафедра вычислительной техники, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: demenkova@mirea.ru. Scopus Author ID 57192958412, ResearcherID AAB-3937-2020, SPIN-код РИНЦ 3424-7489, <https://orcid.org/0000-0003-3519-6683>

**Малето Михаил Иванович**, к.т.н., ведущий инженер структурного подразделения «Центр проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: maletto@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 2958-3989, <http://orcid.org/0009-0006-3603-6322>

**Сигов Александр Сергеевич**, академик Российской академии наук, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, SPIN-код РИНЦ, 2869-5663, [www.researchgate.net/profile/A\\_Sigov](http://www.researchgate.net/profile/A_Sigov)

**Коротаев Юрий Александрович**, аспирант, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: korotaevyua@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 7428-6831, <https://orcid.org/0009-0000-3976-7872>

**Евгеньев Никита Давидович**, студент, кафедра вычислительной техники, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nikita.evgeniev.10@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 1034-0447, <https://orcid.org/0009-0006-9073-8798>

### About the Authors

**Evgenii Ph. Pevtsov**, Cand. Sci. (Eng.), Director of Center for the Design of Integrated Circuits, Nanoelectronics Devices and Microsystems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pevtsov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602652601, ResearcherID M-2709-2016, RSCI SPIN-code 1410-2483, <http://orcid.org/0000-0001-6264-1231>

**Tatyana A. Demenkova**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: demenkova@mirea.ru. Scopus Author ID 57192958412, ResearcherID AAB-3937-2020, RSCI SPIN-code 3424-7489, <http://orcid.org/0000-0003-3519-6683>

**Mikhail I. Maletov**, Cand. Sci. (Eng.), Center for the Design of Integrated Circuits, Nanoelectronics Devices and Microsystems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: maletov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 2958-3989, <http://orcid.org/0009-0006-3603-6322>

**Alexander S. Sigov**, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, RSCI SPIN-code 2869-5663, [https://www.researchgate.net/profile/A\\_Sigov](https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov)

**Yuri A. Korotaev**, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: korotaevyua@yandex.ru. RSCI SPIN-code 7428-6831, <https://orcid.org/0009-0000-3976-7872>

**Nikita D. Evgenev**, Student, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nikita.evgenev.10@gmail.com. RSCI SPIN-code 1034-0447, <https://orcid.org/0009-0006-9073-8798>

УДК 537.553.3; 681.7

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-106-114>

EDN RKATXE



## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

# Оптимальная конструкция электродов для микроминиатюрной электронной оптики

П.С. Кузнецов <sup>1, @</sup>,  
А.О. Синельников <sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», Москва, 129226  
Россия

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, 117198 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ps\_kuznetsov@mail.ru

• Поступила: 12.09.2025 • Доработана: 15.11.2025 • Принята к опубликованию: 27.03.2026

### Резюме

**Цели.** Цель работы – систематический анализ и оптимизация основных конструктивно-технологических характеристик микроминиатюрных электронно-оптических систем для достижения максимальных показателей их работоспособности. В ходе исследования особое внимание уделялось установлению взаимосвязей между геометрическими параметрами системы и ее функциональными характеристиками.

**Методы.** В основе исследования лежит комплексное математическое моделирование динамики электронов в сложной пятиэлектродной схеме, достоверно воспроизводящей реальную конструкцию компактной электронно-лучевой микроколонны. Данный подход позволил установить количественные зависимости критических показателей производительности системы – разрешающей способности и интенсивности электронного пучка – от фундаментальных геометрических параметров: межэлектродных расстояний, конфигурации апертур диафрагм и углового размера выходного отверстия. Основные усилия были сосредоточены на определении оптимальных значений указанных параметров, обеспечивающих минимальный размер фокального пятна при одновременной максимизации энергии пучка.

**Результаты.** Проведенное компьютерное моделирование выявило определяющее влияние каждого компонента пятиэлементной электронно-оптической структуры на формирование качественных характеристик электронного потока. Установлено наличие выраженного минимума диаметра электронного пучка при определенной комбинации геометрических и электрических параметров системы. Обнаруженный оптимум позволил разработать новую методику проектирования и калибровки компактных электронно-лучевых приборов, обеспечивающую достижение максимального разрешения и высокой чувствительности при минимальном энергопотреблении. Детальный анализ продемонстрировал, что оптимальная конфигурация электродов позволяет снизить сферическую абберацию на 25% по сравнению с традиционными решениями.

**Выводы.** Разработанный подход к проектированию электронно-оптических систем микроколонн существенно повышает производительность и расширяет функциональные возможности электронных микроскопов и родственных аналитических приборов. Практическая значимость работы подтверждается возможностью создания устройств с рекордными показателями разрешения при компактных размерах. Важным достижением является установление количественных критериев оптимизации, позволяющих целенаправленно улучшать характеристики электронно-лучевых систем.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая микросистема, электростатическая оптика, микроколонна, микролинза, эмиттер Шоттки, оптимальное проектирование, математическое моделирование, многолучевая литография

**Для цитирования:** Кузнецов П.С., Синельников А.О. Оптимальная конструкция электродов для микроминиатюрной электронной оптики. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):106–114. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-106-114>, <https://www.elibrary.ru/RKATXE>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Optimal electrode design for microminiature electronic optics

Pavel S. Kuznetsov <sup>1, @</sup>,  
Anton O. Sinelnikov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, 129226, Russia

<sup>2</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, 117198 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ps\_kuznetsov@mail.ru

• Submitted: 12.09.2025 • Revised: 15.11.2025 • Accepted: 27.03.2026

### Abstract

**Objectives.** The work set out to systematically analyze and optimize the overall design and technological characteristics of microminiature electron-optical systems for achieving maximum performance indicators. The study paid special attention to establishing relationships between the geometric parameters of the system and its functional characteristics.

**Methods.** The research is based on comprehensive mathematical modeling of electron dynamics in a complex five-electrode scheme that accurately reproduces the actual design of a compact electron-beam microcolumn. This approach was used to establish the quantitative dependencies of resolution and electron beam intensity critical system performance indicators on fundamental geometric parameters: interelectrode distances, diaphragm aperture configurations, and output angular size. The main efforts focused on determining the optimal parameter values while ensuring minimal focal spot size and simultaneously maximizing beam energy.

**Results.** The computer modeling revealed the determining influence of each component of the five-element electron-optical structure on the formation of qualitative electron flow characteristics. A pronounced minimum in electron beam diameter was established at a specific combination of geometric and electrical system parameters. The thus-obtained optimum was used to develop a new methodology for designing and calibrating compact electron-beam devices that ensures maximum resolution and high sensitivity with minimal power consumption. Detailed analysis demonstrated that the optimal electrode configuration reduces spherical aberration by 25% compared to traditional solutions.

**Conclusions.** The developed design approach for microcolumn electron-optical systems significantly enhances performance while expanding the functional capabilities of electron microscopes and related analytical instruments. The practical significance of the work is confirmed by the possibility of creating devices with record resolution indicators in compact sizes. An important achievement is the establishment of quantitative optimization criteria for enabling targeted improvement of electron-beam system characteristics.

**Keywords:** electron-beam microsystem, electrostatic optics, microcolumn, microlens, Schottky emitter, optimal design, mathematical modeling, multi-beam lithography

**For citation:** Kuznetsov P.S., Sinelnikov A.O. Optimal electrode design for microminiature electronic optics. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):106–114. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-106-114>, <https://www.elibrary.ru/RKATXE>

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

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение микротехнологий в электронную оптику привело к качественному скачку в характеристиках и использовании электронно-лучевых приборов и устройств. Создание электронных источников, линз, дефлекторов с размерами, уменьшенными на порядок и более по сравнению с обычными [1–4], стало толчком для разработки микроколонн для миниатюрных электронных микроскопов [5, 6] и многопучковых литографических установок [7–9] с новыми технико-экономическими показателями. Переход к другим масштабам расширил перспективы применения электронно-лучевых систем и в областях, связанных с хранением, обработкой и отображением информации [10–16], где их потеснили полупроводниковые приборы и устройства на жидких кристаллах и других материалах с выраженными сенсорными и электролюминесцентными свойствами.

По конструктивным, технологическим и электронно-оптическим соображениям микроколонны делаются полностью электростатическими. В состав первой такой колонны общей длиной около 3.5 мм вошли термополевой источник электронов с двухэлектродной катодной линзой, апертурная диафрагма, октупольный дефлектор и трехэлектродная фокусирующая линза [17, 18]. Линзы представляли собой стопки кремниевых кристаллов, разделенных изолирующими прокладками из пирексного стекла, с мембранными окнами для электродов. Для формирования отверстий в электродах использовались традиционные технологии микроэлектроники – электронно-лучевая литография и реактивное ионное травление, для соединения кремниевых компонентов – многослойная анодная сварка. Микроколонна [17], показавшая весьма высокие характеристики в низковольтном режиме (разрешение порядка 10 нм при ускоряющем напряжении 1 кВ и токе в пучке ~1 нА), явилась прототипом всех последующих модификаций, используясь как своеобразный эталон сравнения. Продолжающиеся исследования, нацеленные на расширение функциональных возможностей и упрощение изготовления микроколонн, касаются структуры (состава и взаимного расположения) и параметров режима функциональных элементов. Один из заслуживающих внимания экспериментальных вариантов – интегрированная электронно-оптическая система (микролинза)

с габаритными размерами  $1 \times 1 \times 0.05$  см, осуществляющая вытягивание электронов, фокусировку и отклонение пучка [19–21]. Катод удален от микролинзы на 1–2 мм, что снижает требования к точности его установки и дает возможность использовать любой тип источника – холодно-полевой, термоэмиссионный или термополевой (эмиттер Шоттки). Другая перспективная модификация – двухлинзовая микроколонна [22, 23], которая позволяет при сохранении оптимальных апертурных условий в объективной линзе, обеспечивающих минимум аберраций и достаточное для суб-100-нанометровых технологий разрешение (не хуже 20–50 нм на 1 кВ), существенно увеличить телесный угол приема и соответственно ток пучка (до 50 нА при угловой яркости источника 100 мкА/ср), правда, за счет некоторого увеличения размеров системы (~7 мм).

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача оптимального проектирования состоит в определении параметров геометрии и режима микролинзы, обеспечивающих минимальный диаметр зонда (сфокусированного пучка в плоскости объекта) при заданных характеристиках источника, расстоянии фокусировки (рабочем отрезке), ускоряющем напряжении, определяющем конечную энергию электронов, физических и технологических ограничениях. В отличие от [2, 15], оптимизационная задача решалась при меньшем числе варьируемых геометрических параметров (диаметры отверстий и межэлектродные расстояния выбирались одинаковыми), но при большем количестве электродов и, соответственно, варьируемых потенциалов.

Оптимальные параметры, независимо от критерия оптимизации (предельное разрешение, т.е. минимально возможный размер формируемого зонда, минимальный размер зонда при заданном токе или минимум отдельных аберраций), определяются для узкого диапазона энергий электронов, рабочих отрезков, характеристик источника. Для других условий найденные параметры не являются оптимальными. Поэтому линзы, оптимизируемые в большей степени подбором потенциалов, а не геометрией, которую нельзя изменить, представляются более гибкими в плане использования. Этим, а также установкой на упрощение технологии, на которую

возложена и функция юстировки, обусловлена постановка оптимизационной задачи с минимальным числом варьируемых геометрических параметров. Для оценки электронно-оптических преимуществ и выбора предпочтительного варианта предельное расчетное разрешение оптимизированных линз, состоящих из трех, четырех и пяти одинаковых кремниевых мембранных электродов, сравнивалось между собой и с тем, что дает при тех же условиях оптимизированная по всем геометрическим параметрам трехэлектродная линза [2].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛИНЗЫ

В работах [24–32] представлены результаты различных численных экспериментов, направленных на структурно-параметрическую оптимизацию и оценку предельных фокусирующих свойств микроминиатюрных диафрагменных систем в заданной области геометрических параметров. Под оптимизацией в данном случае понимается поиск в условиях последовательного увеличения числа электродов расположения, диаметров отверстий, расстояний между электродами и подаваемых на них потенциалов, обеспечивающих при варьируемых в заданных пределах линейном увеличении, ускоряющем напряжении и рабочем отрезке минимальные коэффициенты осевых aberrаций. В каждом из представленных случаев используется метод прямой оптимизации с оригинальными алгоритмами, позволяющими отслеживать и корректировать осевое распределение потенциала. Электростатическое поле обычно задается аналитически как суперпозиция полей отдельных диафрагм.

Примененные методики практической оптимизации дают исходные данные для проектирования качественной оптики и, таким образом, вполне адекватны поставленной цели. При этом на основе тех же программ можно получить приближенное решение оптимизационной задачи, представленное в виде линейной комбинации достаточно большого числа функций подходящего вида [9]. Это позволяет оценить, насколько близко удастся подойти к предельным значениям коэффициентов aberrаций при данных условиях. Аналогичный подход опробовался в задаче оптимального синтеза магнитных фокусирующих полей при сравнении с решением, полученным методом оптимального управления [10].

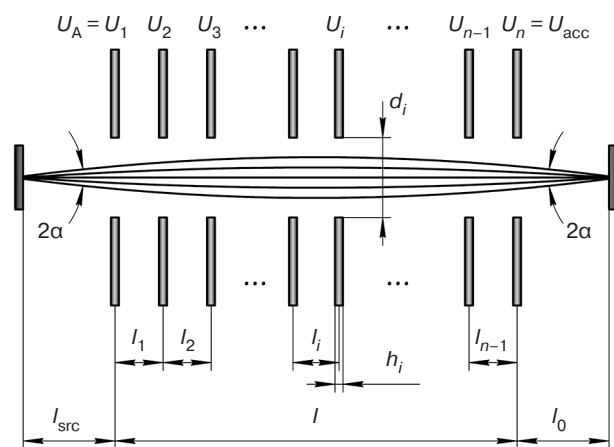
При оптимальном проектировании электростатической микроминиатюрной оптики электронных пучков, показанной на рис. 1, имеем следующие данные для обработки. В качестве варьируемых параметров будут выступать напряжение  $U_i$ , межэлектродные расстояния  $l_i$ , диаметры диафрагм  $d_i$ , угловая апертура  $\alpha_0$ . Исходными данными для оптимизации

являются рабочий отрезок ( $l_0 = 1$  мм) и параметры источника (радиус источника  $r_0 = 2$  нм и угловая яркость  $10$  мкА/ср, диапазон изменения напряжения  $\Delta U_0 = 0.2$  В, расстояние от источника, до первого электрода  $l_{src} = 50$ – $250$  мкм).

Целью оптимизации является минимальный диаметр пучка, равный:

$$d = \sqrt{(Md_0)^2 + d_{chr}^2 + d_{sf}^2 + d_{dif}^2} = \min, \quad (1)$$

где  $M$  – линейное увеличение линзы;  $Md_0$  – диаметр зонда в плоскости сечения;  $d_{chr}$  – диаметр пятна хроматической aberrации;  $d_{sf}$  – диаметр пятна сферической aberrации;  $d_{dif}$  – диаметр сечения электронного пучка, образующийся в результате дифракции.



**Рис. 1.** Исходная модель электронной линзы.  
 $U_A$  – напряжение в начальной точке А линзы,  
 $U_{acc}$  – ускоряющее напряжение

При имеющихся ограничениях напряженности электрического поля ( $E \leq 10^4$  В/мм) и геометрических параметрах ( $l_i = 100$ – $500$  мкм,  $d_i = 20$ – $200$  мкм, диаметр отверстия  $h_i = 1$ – $3$  мкм) ожидаются следующие технические характеристики: ускоряющее напряжение порядка  $1$ – $3$  кВ; ток в пучке более  $1$  нА; диаметр зонда около  $10$  нм; высота колонны около  $5$  мм.

Согласно выбранной математической модели, получаем следующие характеристики:

- минимизируемый радиус пучка:

$$r = \sqrt{r_G^2 + (r_{dif})^2 + (r_{sf})^2 + (r_{chr})^2}, \quad (2)$$

где  $r_G = Mr_0$  – радиус гауссова изображения,

$r_{dif} = \frac{0.75M}{\alpha_0 \sqrt{U_0}}$  – радиус дифракционного размытия,

$r_{sf} = MC_{sf} \alpha_0^3$  – радиус aberrационных дисков сферической aberrации,

$r_{chr} = MC_{chr} \alpha_0 \frac{\Delta U_0}{U_0}$  – радиус aberrационных дисков хроматической aberrации;

- осевое распределение потенциала:

$$E(z) = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \tilde{E}_i \left[ \arctg \left( \frac{2(z-z_i)}{h_i} \right) + \frac{\frac{2(z-z_i)}{h_i}}{1 + \left( \frac{2(z-z_i)}{h_i} \right)^2} \right], \quad (3)$$

где  $\tilde{E}_i = \frac{E_i - E_{i-1}}{2}$ ,  $E_i = \frac{U_i - U_{i+1}}{l_i}$ ,  $i = \overline{1, n-1}$ ,  $E_0 = E_n = 0$ ;

$z$  – осевое положение источника,  $z_i$  – осевая координата  $i$ -го электрода.

- коэффициенты сферической и хроматической aberrаций:

$$C_{sf} = \frac{1}{32} \int_{z_0}^{z_i} \sqrt{\frac{U}{U_0}} r^4 \times \left\{ \left( \frac{U'}{U} \right)^2 \left[ \frac{r'}{r} + \frac{5}{6} \frac{U'}{U} \right]^2 + \frac{3}{2} \left( \frac{U''}{U} + \frac{U'}{U} \cdot \frac{r'}{r} - \left( \frac{U'}{U} \right)^2 \right)^2 + \left( \frac{U'}{U} \right)^2 \left( \frac{r'}{r} + \frac{5}{6} \frac{U'}{U} \right)^2 + \frac{1}{36} \left( \frac{U'}{U} \right)^4 + \left[ \left( \frac{U''}{U} + \frac{U'}{U} \cdot \frac{r'}{r} - \frac{5}{4} \left( \frac{U'}{U} \right)^2 \right)^2 \right] \right\} dz, \quad (4)$$

$$C_{chr} = \frac{3}{8} \int_{z_0}^{z_i} \sqrt{\frac{U_0}{U}} r^2 \left( \frac{U'}{U} \right)^2 dz. \quad (5)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования и оптимизации пятиэлектродной линзы представлены на рис. 2–4. На рис. 2 показана зависимость минимального радиуса электронной линзы от угловой апертуры, имеющая характерный минимум при  $\alpha_0 = 4$  мрад. Видно, что сначала радиус линзы быстро уменьшается с увеличением апертуры, достигая наименьшего значения, после которого начинается его постепенное увеличение при дальнейшем росте угловой апертуры.

Как видно из графиков, представленных на рис. 3, предельные фокусировка и соответствующая апертура пучка уменьшаются почти линейно с увеличением длины рассматриваемой пятиэлектродной линзы.

Зависимости минимального радиуса электронной линзы от диаметра диафрагмы (рис. 4) при значениях  $\alpha_0$ , равных 4 и 6 мрад, носят ярко выраженный нелинейный характер и графически описываются U-образной кривой, имеющей локальный минимум. Это означает, что с увеличением диаметра

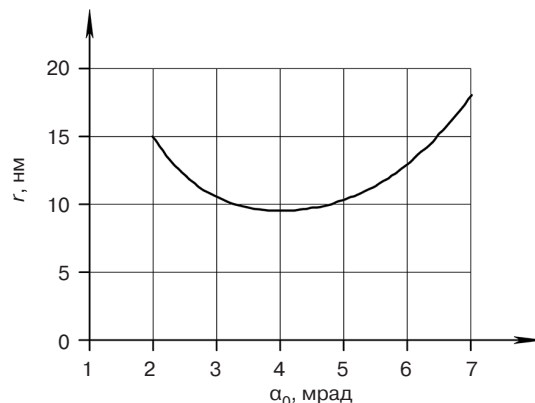


Рис. 2. Зависимость минимального радиуса от угловой апертуры

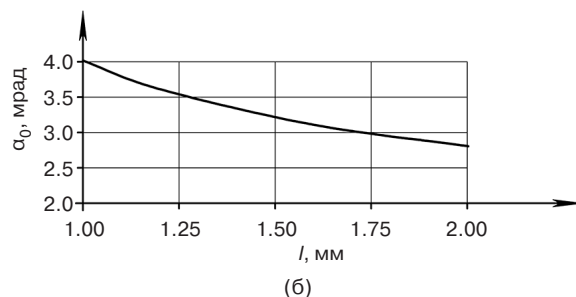
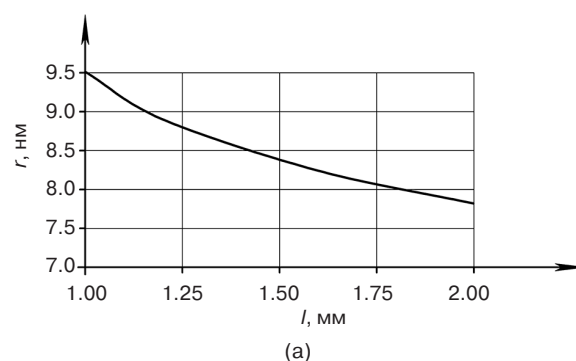


Рис. 3. Предельная фокусировка (а) и соответствующая оптимальная апертура пучка (б) в зависимости от длины пятиэлектродной линзы,  $d_i = 1/4$

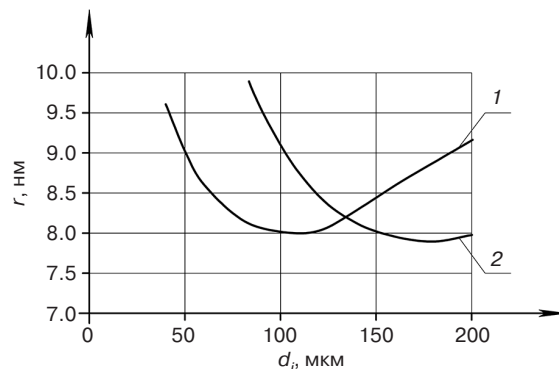


Рис. 4. Зависимость минимального радиуса электронной линзы от диаметра диафрагмы: (1)  $\alpha_0 = 4$  мрад, (2)  $\alpha_0 = 6$  мрад;  $l_0 = 0.25$ ,  $l_{src} = 1$ ,  $U_0 = 1$  кВ

диафрагмы минимальное значение радиуса сначала плавно снижается, проходя точку экстремума (минимальное значение). После прохождения точки минимума дальнейший рост диаметра диафрагмы вызывает постепенное возрастание радиуса.

Таким образом, существует оптимальный диаметр диафрагмы, при котором достигается минимальный радиус фокусировки электронного пучка. В точке минимума электронная линза имеет следующие параметры:

1. Электронно-оптические характеристики:  $C_{chr} = 1.65$  мм,  $C_{sf} = 51.42$  мм,  $M = 1.34$ ,  $r_G = 2.64$  нм,  $r_{chr} = 1.76$  нм,  $r_{sf} = 4.33$  нм,  $r_{dif} = 7.83$  нм.
2. Параметры режима:  $U_1 = 0.62$  кВ,  $U_2 = 1.17$  кВ,  $U_3 = 3.5$  кВ,  $U_A = U_{acc} = 1$  кВ,  $l_{src} = 250$  мкм,  $l_i = 250$  мкм,  $d_i = 50$  мкм,  $l_0 = 1$  мм.

Исходя из значения тока в пучке  $I = 1$  нА и угловой апертуры  $\alpha_0 = 6$  мрад, получаем следующие значения минимального диаметра пучка:  $d_{min} = 26$  нм (при  $\Delta U_0 = 0.2$  В),  $d_{min} = 54$  нм (при  $\Delta U_0 = 2$  В).

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что наиболее целесообразной конфигурацией является пятиэлектродная электронная линза с равномерно размещенными электродами, способствующая снижению aberrаций примерно на 10% за счет увеличения количества электродов и варьирования межэлектродных расстояний при сохраняемой общей длине. Максимальная эффективность зафиксирована при увеличенной длине линзы, что связано с повышением числа потенциальных областей фокусировки и улучшением взаимодействия полей напряжения с электронами. Дополнительно было определено оптимальное соотношение между длиной линзы, диаметром пучка и величиной диаметра диафрагмы, минимизирующее энергопотери и эффекты рассеяния.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования разработаны методы численно-аналитического моделирования и средства программной поддержки оптимизационных вычислительных экспериментов, направленных на поиск оптимальных конфигураций и режимов работы низковольтной электростатической оптики для электронно-лучевых микроколонн в соответствии со сформулированными критериями. Проведено детальное исследование электронно-оптических свойств микроминиатюрных диафрагменных линз, реализуемых на основе микротехнологий.

Полученные оценки минимального размера зонда, формируемого оптимизированной пятиэлектродной линзой при разных параметрах источника и апертурных условиях, показали, что при использовании термоавтоэмиссионных катодов оптимизированные пятиэлектродные линзы длиной 2.5 мм могут формировать зонд диаметром от 4 до 10 нм в зависимости от угловой апертуры (и, соответственно, тока в зонде) на расстояниях  $\sim 1$  мм, достаточных для манипулирования объектом и размещения специальных миниатюризированных детекторов вторичных излучений.

### Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в разработку концепции, методологию, проведение исследования и подготовку текста рукописи. Каждый из авторов ознакомился с финальной версией статьи и одобрил ее публикацию.

### Authors' contribution

Both authors contributed equally to the conceptualization, methodology, investigation, and writing of this work. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao X., Fan B., Ma Z., Zhong S., Chen J., Zhang T., Su H. Optical-digital joint design of multi-order diffractive lenses for lightweight high-resolution computational imaging. *Opt. Lasers Eng.* 2024;180:108308. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108308>
2. Thomson M.G.R., Chang T.H.P. Lens and deflector design for microcolumns. *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1995;13(6):2445–2449. <https://doi.org/10.1116/1.588018>
3. Perng D.C., Crewe D.A., Feinerman A.D. Micromachined thermionic emitters. *J. Micromech. Microeng.* 1992;2(1):25–30. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/2/1/006>
4. Lee J.-W., Park I.-Y., Ogawa T. Design and optimization of a conical electrostatic objective lens of a low-voltage scanning electron microscope for surface imaging and analysis in ultra-high-vacuum environment. *Ultramicroscopy.* 2024;257:113908. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113908>
5. Laszczyk K., Krysztof M. Electron beam source for the miniaturized electron microscope on-chip. *Vacuum.* 2021;189:110236. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110236>
6. Krysztof M., Białas M., Szyszka P., Grzebyk T., Górecka-Drzazga A. Fabrication and characterization of a miniaturized octupole deflection system for the MEMS electron microscope. *Ultramicroscopy.* 2021;225:113288. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2021.113288>
7. Hofmann U., Ünal N., Klikovits J. From ghost to state-of-the-art process corrections – PEC enabled e-beam nanofabrication. *Micro and Nano Engineering (MNE).* 2024;25:100286. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2024.100286>

8. Karkantonis T., Penchev P., Nasrollahi V., Le H., See T.L., Bruneel D., Ramos-de-Campos J.A., Dimov S. Laser micro-machining of freeform surfaces: Accuracy, repeatability and reproducibility achievable with multi-axis processing strategies. *Precis. Eng.* 2022;78:233–247. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.08.009>
9. Parker N.W., Brodie A.D., McCoy J.H. A high throughput NGL electron-beam direct-write lithography system. In: *Proceeding SPIE Emerging Lithographic Technologies*. V. 3997. 2000. <https://doi.org/10.1117/12.390042>
10. Itoh S., Tanaka M., Tonegawa T. Development of field emission displays. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2004;22(3):1362–1366. <https://doi.org/10.1116/1.1691409>
11. Villarroya M., Barniol N., Martin C., Pérez-Murano F., Esteve J., Bruchhaus L., Jede R., Bourhis E., Gierak J. Fabrication of nanogaps for MEMS prototyping using focused ion beam as a lithographic tool and reactive ion etching pattern transfer. *Microelectron. Eng.* 2007;84(5-8):1215–1218. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.074>
12. Appleton B.R., Tongay S., Lemaitre M., Gila B., Fridmann J., Mazarov P., Sanabia J.E., Bauerdick S., Bruchhaus L., Mimura R., Jede R. Materials modifications using a multi-ion beam processing and lithography system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2012;272:153–157. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.01.054>
13. Pease R.F., Ioakeimidi K., Aldana R., et al. Photoelectronic analog-to-digital conversion using miniature electron optics: Basic design considerations. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2003;21(6):2826–2829. <https://doi.org/10.1116/1.1621664>
14. Srivastava K., Le-The H., Lozeman J.J.A., van den Berg A., van der Stam W., Odijk M. Prospects of nano-lithographic tools for the fabrication of surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) substrates. *Micro and Nano Engineering (MNE)*. 2024;23:100267. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2024.100267>
15. Кузнецов П.С. Вопросы и перспективы развития мехатроники и микросистемной техники. *Нано- и микросистемная техника*. 2024;25(4):159–169. <https://doi.org/10.17587/nmst.25.159-169>
16. Кузнецов П.С. Микроэлектромеханические системы: путь к совершенствованию гироскопов. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):103–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-103-121>
17. Chang T.H.P., Thomson M.G.R., Yu M.L., et al. Electron beam technology – SEM to microcolumn. *Microelectron. Eng.* 1996;32(1-4):113–130. [https://doi.org/10.1016/0167-9317\(95\)00366-5](https://doi.org/10.1016/0167-9317(95)00366-5)
18. Kim H.S., Ahn S., Kim D.W., Oh T.-S., Ahn S.J. Efficient electron beam condensing for low-energy microcolumn lithography. *Microelectronics J*. 2008;39(1):94–98. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.09.030>
19. Hu J., Yue L., Ma Y., Liu F., Kang Y. Aberration calculation of microlens array using differential algebraic method. *Ultramicroscopy*. 2025;269:114085. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2024.114085>
20. Zlatkin A., Garcia N. Low-energy (300eV) versatile scanning electron microscope with 30 nm resolution. *Microelectron. Eng.* 1999;45(1):39–46. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(98\)00260-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(98)00260-3)
21. Ximen J. Chapter One – The electron optical imaging system and its aberrations. In: Hawkes P.W., Hÿtch M. (Eds.). *Advances in Imaging and Electron Physics*. Elsevier; 2023. V. 226. P. 1–88. <https://doi.org/10.1016/bs.aiep.2023.03.003>
22. Weigand H., Gautsch S., Strohmaier W., Blideran M., Stauffer U., de Rooij N.F., Kern D.P. Microcolumn with variable axis lens for large scan fields and pixel numbers. *Microelectron. Eng.* 2011;88(8):2431–2434. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.12.120>
23. Mankos M., Lee K.Y., Muray L., et al. Optimization of microcolumn electron optics for high current application. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2000;18(6):3057–3060. <https://doi.org/10.1116/1.1321756>
24. Feng Y., Li W., Chen Y., Kang X., Li J., Tang K., Zhao Z., Liu X., Zhou K., You Y., Li M., Li P., Xu Z., Zhao T., Mao R. Design and performance of a low-emittance electron gun for electron beam probe. *Nuclear Inst. Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2024;1066:169604. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169604>
25. Fox J., Lee H.K., Alajo A.B., Avachat A. Simulation study of electron beam optics for a distributed X-ray source toward stationary CT architecture. *Nuclear Inst. Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2024;1062:169149. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169149>
26. Sinelnikov A.O., Smetanin I.A., Basov B.A., Smetanin E.A., Bykanova U.F. Effect of Ignition Voltage Amplitude on Breakdown Delay Time of Ring Laser Discharge Gap. In: *2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2025. <https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10971095>
27. Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Подкопаев А.А., Савицкая Т.Н. Оптимизация электронно-оптической системы растрового электронного микроскопа для измерения размеров микро- и нанообъектов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2019;7:36–41. <https://doi.org/10.1134/S0207352819070072>
28. Бакулин Е.М., Курушин Г.В., Строганов К.А. Результаты моделирования конструкции микроакселерометра на основе интегрированной технологии микромеханики и акустоэлектроники. *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2018;2(170):43–49. <https://elibrary.ru/xtxzvz>
29. Трапашко Г.А. Синтез оптоэлектронной системы установки контроля микроэлектронных структур. *Наука и техника*. 2014;1:38–43. <https://elibrary.ru/rylmup>
30. Бельский М.Д., Суворинов А.В., Филиппук Т.С., Шахбазов С.Ю. Расчет технологических допусков в электростатических линзах для электронно-лучевых микроколонн. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2006;1:76–83. <https://elibrary.ru/hsywrp>
31. Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Савицкая Т.Н. Расчет миниатюрной формирующей линзы высоковольтного электронного литографа. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2020;12:89–94. <https://doi.org/10.31857/S1028096020120158>

32. Бельский М.Д., Львов Б.Г., Рыбалко В.В. Моделирование фокусирующей микролинзы для оже-анализатора с ЦЗА. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2013;77(8):1059–1062. <https://doi.org/10.7868/S0367676513080061>

## REFERENCES

- Zhao X., Fan B., Ma Z., Zhong S., Chen J., Zhang T., Su H. Optical-digital joint design of multi-order diffractive lenses for lightweight high-resolution computational imaging. *Opt. Lasers Eng.* 2024;180:108308. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108308>
- Thomson M.G.R., Chang T.H.P. Lens and deflector design for microcolumns. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1995;13(6):2445–2449. <https://doi.org/10.1116/1.588018>
- Perng D.C., Crewe D.A., Feinerman A.D. Micromachined thermionic emitters. *J. Micromech. Microeng.* 1992;2(1):25–30. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/2/1/006>
- Lee J.-W., Park I.-Y., Ogawa T. Design and optimization of a conical electrostatic objective lens of a low-voltage scanning electron microscope for surface imaging and analysis in ultra-high-vacuum environment. *Ultramicroscopy*. 2024;257:113908. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113908>
- Laszczyk K., Krysztof M. Electron beam source for the miniaturized electron microscope on-chip. *Vacuum*. 2021;189:110236. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110236>
- Krysztof M., Białas M., Szyszka P., Grzebyk T., Górecka-Drzazga A. Fabrication and characterization of a miniaturized octupole deflection system for the MEMS electron microscope. *Ultramicroscopy*. 2021;225:113288. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2021.113288>
- Hofmann U., Ünal N., Klikovits J. From ghost to state-of-the-art process corrections – PEC enabled e-beam nanofabrication. *Micro and Nano Engineering (MNE)*. 2024;25:100286. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2024.100286>
- Karkantonis T., Penchev P., Nasrollahi V., Le H., See T.L., Bruneel D., Ramos-de-Campos J.A., Dimov S. Laser micro-machining of freeform surfaces: Accuracy, repeatability and reproducibility achievable with multi-axis processing strategies. *Precis. Eng.* 2022;78:233–247. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.08.009>
- Parker N.W., Brodie A.D., McCoy J.H. A high throughput NGL electron-beam direct-write lithography system. In: *Proceeding SPIE Emerging Lithographic Technologies*. V. 3997. 2000. <https://doi.org/10.1117/12.390042>
- Itoh S., Tanaka M., Tonegawa T. Development of field emission displays. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2004;22(3):1362–1366. <https://doi.org/10.1116/1.1691409>
- Villarroya M., Barniol N., Martin C., Pérez-Murano F., Esteve J., Bruchhaus L., Jede R., Bourhis E., Gierak J. Fabrication of nanogaps for MEMS prototyping using focused ion beam as a lithographic tool and reactive ion etching pattern transfer. *Microelectron. Eng.* 2007;84(5-8):1215–1218. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.074>
- Appleton B.R., Tongay S., Lemaitre M., Gila B., Fridmann J., Mazarov P., Sanabia J.E., Bauerdick S., Bruchhaus L., Mimura R., Jede R. Materials modifications using a multi-ion beam processing and lithography system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2012;272:153–157. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.01.054>
- Pease R.F., Ioakeimidi K., Aldana R., et al. Photoelectronic analog-to-digital conversion using miniature electron optics: Basic design considerations. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2003;21(6):2826–2829. <https://doi.org/10.1116/1.1621664>
- Srivastava K., Le-The H., Lozeman J.J.A., van den Berg A., van der Stam W., Odijk M. Prospects of nano-lithographic tools for the fabrication of surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) substrates. *Micro and Nano Engineering (MNE)*. 2024;23:100267. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2024.100267>
- Kuznetsov P.S. Issues and prospects for the development of mechatronics and microsystem technology. *Nano-i mikrosistemnaja tehnika = Nano- and Microsystem Technique*. 2024;26(4):159–169 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/nmst.25.159-169>
- Kuznetsov P.S. Microelectromechanical systems for improved gyroscope design. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):103–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-103-121>
- Chang T.H.P., Thomson M.G.R., Yu M.L., et al. Electron beam technology – SEM to microcolumn. *Microelectron. Eng.* 1996;32(1-4):113–130. [https://doi.org/10.1016/0167-9317\(95\)00366-5](https://doi.org/10.1016/0167-9317(95)00366-5)
- Kim H.S., Ahn S., Kim D.W., Oh T.-S., Ahn S.J. Efficient electron beam condensing for low-energy microcolumn lithography. *Microelectronics J*. 2008;39(1):94–98. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.09.030>
- Hu J., Yue L., Ma Y., Liu F., Kang Y. Aberration calculation of microlens array using differential algebraic method. *Ultramicroscopy*. 2025;269:114085. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2024.114085>
- Zlatkin A., Garcia N. Low-energy (300eV) versatile scanning electron microscope with 30 nm resolution. *Microelectron. Eng.* 1999;45(1):39–46. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(98\)00260-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(98)00260-3)
- Ximen J. Chapter One – The electron optical imaging system and its aberrations. In: Hawkes P.W., Hÿtch M. (Eds.). *Advances in Imaging and Electron Physics*. Elsevier; 2023. V. 226. P. 1–88. <https://doi.org/10.1016/bs.aiep.2023.03.003>
- Weigand H., Gautsch S., Strohmaier W., Blideran M., Staufer U., de Rooij N.F., Kern D.P. Microcolumn with variable axis lens for large scan fields and pixel numbers. *Microelectron. Eng.* 2011;88(8):2431–2434. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.12.120>
- Mankos M., Lee K.Y., Muray L., et al. Optimization of microcolumn electron optics for high current application. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2000;18(6):3057–3060. <https://doi.org/10.1116/1.1321756>
- Feng Y., Li W., Chen Y., Kang X., Li J., Tang K., Zhao Z., Liu X., Zhou K., You Y., Li M., Li P., Xu Z., Zhao T., Mao R. Design and performance of a low-emittance electron gun for electron beam probe. *Nuclear Inst. Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2024;1066:169604. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169604>

25. Fox J., Lee H.K., Alajo A.B., Avachat A. Simulation study of electron beam optics for a distributed X-ray source toward stationary CT architecture. *Nuclear Inst. Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2024;1062:169149. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169149>
26. Sinelnikov A.O., Smetanin I.A., Basov B.A., Smetanin E.A., Bykanova U.F. Effect of Ignition Voltage Amplitude on Breakdown Delay Time of Ring Laser Discharge Gap. In: *2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2025. <https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10971095>
27. Kazmiruk V.V., Kurganov I.G., Podkopaev A.A., et al. Optimization of the Electron Optical System of a Scanning Electron Microscope for Measuring the Size of Micro- and Nanoobjects. *J. Surf. Investig.* 2019;13(4):594–599. <https://doi.org/10.1134/S1027451019040074>  
[Original Russian Text: Kazmiruk V.V., Kurganov I.G., Podkopaev A.A., Savitskaya T.N. Optimization of the Electron Optical System of a Scanning Electron Microscope for Measuring the Size of Micro- and Nanoobjects. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2019;7:36–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0207352819070072> ]
28. Bakulin E.M., Kurushin G.V., Stroganov K.A. Results of simulation of the microaccelerometer design based on integrated technology of micromechanics and acoustoelectronics. *Ehlektronnaya tekhnika. Seriya 3: Mikroehlektronika = J. Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics*. 2018;2(170):43–49 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xtxzvz>
29. Trapashko G.A. Synthesis of optoelectronic system for control of microelectronic structures. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*. 2014;1:38–43 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rylmup>
30. Belsky M.D., Suvorinov A.V., Filipchuk T.S., Shakhbazov S.Yu. Calculation of technological tolerances in electrostatic lenses for electron beam micro columns. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ehlektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2006;1:76–83 (in Russ.). <https://elibrary.ru/hsywrp>
31. Kazmiruk V.V., Kurganov I.G., Savitskaya T.N. Miniature forming lens for high-voltage electron-beam lithography system. *J. Surf. Investig.* 2020;14:1366–1370. <https://doi.org/10.1134/S1027451020060336>  
[Original Russian Text: Kazmiruk V.V., Kurganov I.G., Savitskaya T.N. Miniature forming lens for high-voltage electron-beam lithography system. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya* 2020;12:89–94 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1028096020120158> ]
32. Belsky M.D., Lvov B.G., Rybalko V.V. Modeling the focusing microlenses of an auger analyzer equipped with a CMA. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2013;77(8):959–962. <https://doi.org/10.3103/S1062873813080066>  
[Original Russian Text: Belsky M.D., Lvov B.G., Rybalko V.V. Modeling the focusing microlenses of an auger analyzer equipped with a CMA. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2013;77(10):1059–1062 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0367676513080061> ]

## Об авторах

**Кузнецов Павел Сергеевич**, к.т.н., заместитель начальника экспериментального комплекса микроэлектроники и микромеханических систем, Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «ГосНИИП») (129226, Россия, Москва, пр-т Мира, д. 125). E-mail: ps\_kuznetsov@mail.ru. Scopus Author ID 58513707600, SPIN-код РИНЦ 6564-9540, <https://orcid.org/0000-0001-5459-7883>

**Синельников Антон Олегович**, к.т.н., доцент, кафедра «Нанотехнологии и микросистемная техника», ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) (117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6). E-mail: mr.sinelnikov.a@mail.ru. Scopus Author ID 55382453500, ResearcherID AAC-2606-2022, SPIN-код РИНЦ 2442-7507, <https://orcid.org/0000-0002-5579-3509>

## About the Authors

**Pavel S. Kuznetsov**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Experimental Complex of Microelectronics and Micromechanical Systems, State Scientific Research Institute of Instrument Engineering (GosNIIP) (125, Mira pr., Moscow, 129226 Russia). E-mail: ps\_kuznetsov@mail.ru. Scopus Author ID 58513707600, RSCI SPIN-code 6564-9540, <https://orcid.org/0000-0001-5459-7883>

**Anton O. Sinelnikov**, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Basic Department “Nanotechnology and Microsystem Technology,” RUDN University (6, Miklukho-Maklaya ul., Moscow, 117198 Russia). E-mail: mr.sinelnikov.a@mail.ru. Scopus Author ID 55382453500, ResearcherID AAC-2606-2022, RSCI SPIN-code 2442-7507, <https://orcid.org/0000-0002-5579-3509>

Математическое моделирование  
Mathematical modeling

УДК 001.57; 004.942

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-115-130>

EDN MYWEJW



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Особенности аналитического моделирования нелинейных поверхностных волн в градиентных средах

С.Е. Савотченко <sup>1, @</sup>,  
Н.О. Афанасьева <sup>2</sup>

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>2</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,  
Москва, 117997 Россия

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

• Поступила: 13.10.2025 • Доработана: 10.11.2025 • Принята к опубликованию: 20.03.2026

### Резюме

**Цели.** Важную роль в современной физике и волноводной оптике играют и исследования, связанные с нахождением точных решений используемых при моделировании уравнений, позволяющие выявить классы точно решаемых моделей. Цель работы – изучение свойств поверхностных поперечных волн, распространяющихся вдоль границы раздела нелинейной и градиентной немагнитных сред без потерь.

**Методы.** В работе использованы методы математического моделирования, методы анализа и математической физики, дифференциальных уравнений и теории специальных функций. Использовались базовые принципы, методы и физические модели нелинейной и волноводной оптики.

**Результаты.** Проведено моделирование свойств поверхностных поперечных волн, распространяющихся вдоль границы раздела нелинейной и градиентной сред. В качестве модели нелинейности среды, описывающей нелинейно-оптический отклик среды на возмущения электрического поля, выбрана линейная форма зависимости диэлектрической проницаемости от интенсивности света. В качестве модели градиентной среды выбрана форма пространственного профиля диэлектрической проницаемости, описывающая ее изменение в зависимости от расстояния до границы раздела, для которой можно найти точное аналитическое решение стационарного волнового уравнения. Приведена математическая формулировка модели, которая представляет собой краевую задачу сопряжения для нелинейного уравнения с переменными коэффициентами. Найдены точные аналитические решения данной краевой задачи для случаев фокусирующей и дефокусирующей нелинейностей, которые описывают пространственные распределения напряженности электрического поля в поперечном направлении на границе раздела сред. Анализ модели позволил выявить существенные различия пространственного распределения интенсивности поля в поверхностных волнах, распространяющихся в фокусирующих и дефокусирующих средах. Проведен детальный анализ влияния значений параметров модели, характеризующих оптические свойства контактирующих сред, на пространственное распределение интенсивности света в поверхностных волнах.

**Выводы.** Полученные результаты дополняют существующую теорию нелинейной и волноводной оптики и могут найти применение при проектировании новых волноводных структур с определяемыми пользователями свойствами. Полученные новые решения расширяют класс точно решаемых моделей планарных волноводных структур с распределенными неоднородными и нелинейными свойствами.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, математическая модель, краевая задача, точное решение, поверхностная волна, волноводная оптика, нелинейная оптика

**Для цитирования:** Савотченко С.Е., Афанасьева Н.О. Особенности аналитического моделирования нелинейных поверхностных волн в градиентных средах. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):115–130. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-115-130>, <https://www.elibrary.ru/MYWEJW>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Features of analytical modeling of nonlinear surface waves in gradient media

Sergey E. Savotchenko <sup>1, @</sup>,  
Nadezhda O. Afanasyeva <sup>2</sup>

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>2</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, 117997 Russia

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

• Submitted: 13.10.2025 • Revised: 10.11.2025 • Accepted: 20.03.2026

### Abstract

**Objectives.** An important role in modern physics, particularly in waveguide optics, is played by studies that involve the search for exact solutions to equations used in modeling to identify classes of exactly solvable models. This work set out to use analytical modeling methods to explore the properties of surface shear waves propagating without loss along the interface between a nonlinear and a graded-index nonmagnetic medium.

**Methods.** Methods of mathematical modeling, calculus, mathematical physics, differential equations, and the theory of special functions were used. Fundamental principles, methods, and physical models of nonlinear and waveguide optics were also applied.

**Results.** The properties of surface transverse waves propagating along the interface between a nonlinear and a graded-index medium are modeled. In order to model the nonlinearity of the medium to describe the nonlinear optical response of the medium to electric field perturbations, the linear dependence of permittivity on light intensity is chosen as a parameter. The graded-index medium is modeled using a spatial profile of permittivity as a function of distance from the interface for which an exact analytical solution to the stationary wave equation can be found. A mathematical formulation of the model is presented, consisting of a conjugation boundary value problem for a nonlinear equation with variable coefficients. Exact analytical solutions to this boundary value problem are found for the cases of focusing and defocusing nonlinearities to describe the spatial distributions of the electric field strength in the direction transverse to the interface. Analysis of the model revealed significant differences in the spatial distribution of the field intensity in surface waves propagating in the focusing and defocusing media. The effect of the values of model parameters used to characterize the optical properties of the contacting media on the spatial distribution of light intensity in surface waves was also studied in detail.

**Conclusions.** The obtained, which results supplement the existing theory of nonlinear and waveguide optics, can be applied in the design of new waveguide structures with user-defined properties. The obtained new solutions expand the class of exactly solvable models of planar waveguide structures with distributed inhomogeneous and nonlinear properties.

**Keywords:** mathematical modeling, mathematical model, boundary value problem, exact solution, surface wave, waveguide optics, nonlinear optics

**For citation:** Savotchenko S.E., Afanasyeva N.O. Features of analytical modeling of nonlinear surface waves in gradient media. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):115–130. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-115-130>, <https://www.elibrary.ru/MWWEJW>

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

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование занимает центральное место в современной физике и волноводной оптике, в частности [1], т.к. позволяет выявить, описать и предсказать поведение физической системы, происходящее под влиянием различных параметров. В основе большинства математических моделей физических процессов лежат краевые задачи для дифференциальных уравнений в частных производных, которые при определенных условиях могут переходить в обыкновенные. Современные вычислительные системы позволяют не только находить численными методами решения таких задач, но визуализировать их. Однако в прикладных математических исследованиях важную роль играют и проблемы нахождения точных решений сформулированных уравнений, позволяющие выявить классы точно решаемых моделей. Существование точного решения, в отличие от численного, дает возможность не только быстро и наглядно анализировать влияние параметров модели на изучаемый процесс, но и получать асимптотические выражения и другие оценки в явной аналитической форме [2].

Данная работа посвящена нахождению точных решений краевых задач, возникающих при моделировании распространения поверхностных волн в планарных волноводных структурах [3]. Хотя направлению исследований волноводных свойств границ раздела сред с различными оптическими свойствами посвящено большое количество литературы [4–6], остается много неизученных проблем, связанных с аналитическим описанием свойств поверхностных волн в рамках моделей волноводов, допускающих нахождения точных решений. Такие модели часто называют точно решаемыми [7].

В нелинейной и волноводной оптике основным модельным уравнением является волновое, которое получается из уравнений Максвелла. При изучении установившихся во времени волновых процессов волновое уравнение переходит

в уравнение Гельмгольца [8]. Оптические свойства среды, в которой изучается волновой процесс, определяются показателем преломления или диэлектрической проницаемостью (для немагнитных сред). Поэтому выбор формы зависимости этих характеристик от функции процесса (например, интенсивности света) или пространственных переменных определяет возможность существования точного решения уравнения модели. Такие зависимости сами являются модельными и отражают оптический отклик среды на различные возмущения.

При описании нелинейного отклика среды используются модели, в которых диэлектрическая проницаемость зависит от интенсивности света, т.е. от квадрата амплитуды напряженности электрического (или магнитного) поля [9]. Многие из таких моделей допускают нахождение точных аналитических решений. К наиболее распространенным из них относится керровская нелинейность, в которой диэлектрическая проницаемость линейно зависит от интенсивности света. В такой модели нелинейности в зависимости от геометрии системы существуют различные классы точных решений нелинейных уравнений, известные как солитоны [10–12], кинки, кноидальные волны [13]. В частности, в [12] рассматривались не оптические солитоны, а другой физической природы, что подчеркивает широту применения однопольных математических моделей для широкого класса различных по физической природе явлений.

При описании пространственной неоднородности оптических свойств среды используются модели, в которых диэлектрическая проницаемость зависит от пространственных координат. В волноводной оптике среды, где показатель преломления плавно зависит от пространственной координаты, называют градиентными [14]. В этом случае уравнение содержит переменные (распределенные) коэффициенты, определяемые выбранной моделью неоднородности. Известны точные аналитические решения

для широкого класса моделей, выражаемые через различные специальные функции [15].

С физической точки зрения важным является изучение особенностей распространения волн вдоль границ разделов сред с различными оптическими свойствами. При моделировании таких процессов формулируются краевые задачи с условиями сопряжения на границе раздела сред. В ряде работ изучались различные поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границ раздела нелинейных и неоднородных сред [16]. Были получены точные решения модельных краевых задач сопряжения, описывающие различные типы поверхностных волн [17, 18].

В недавней работе [19] изучались поверхностные волны вдоль поверхности оптически неоднородного кристалла с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , моделируемой специального вида профилем, который представляет собой обобщение гиперболического ( $\varepsilon \sim 1/x$ ) [20] и обратного квадратического профилей ( $\varepsilon \sim 1/x^2$ ) [21]. Рассматривался контакт неоднородной среды с таким профилем с однородной линейной средой, в которой интенсивность поля экспоненциально убывает при удалении от границы раздела сред. Было найдено точное аналитическое решение поставленной краевой задачи сопряжения и показано, что его можно выразить через функцию Уиттекера.

В данной работе рассматривается контакт неоднородной среды с таким же пространственным профилем, но с оптической нелинейной средой. В качестве модели нелинейного отклика выбирается керровская нелинейность. Показано, что при таком выборе моделей неоднородности и нелинейности поставленная краевая задача имеет точное решение. Полученное решение применено для выявления особенностей формирования пространственного профиля электрического поля в поперечном направлении в зависимости от варьирования оптических параметров модели.

Основным результатом работы является получение точного решения для данной конфигурации сред. Данное решение описывает новый тип волны, при этом под новизной типа волны здесь понимается форма ее профиля в поперечном направлении раздела сред. Кроме того, выявлена чувствительность свойств такой волны к изменениям оптических параметров сред.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА МОДЕЛИ

Рассмотрим плоскую границу двух немагнитных сред без диэлектрических потерь с различными оптическими свойствами. Пусть плоскость границы

раздела сред расположена в координатной плоскости  $x = 0$  (плоскость  $yOz$  в пространстве), а ось  $Ox$  расположена перпендикулярно границе раздела, и ее направление совпадает с направлением распространения поверхностной волны. Если считать, что среды однородны вдоль границы их раздела, то распределение электрического поля в поперечной волне будет тоже однородным вдоль нее и характеризоваться пространственным различием только в поперечном направлении. При моделировании поверхностных волн в таких системах задача сводится к одномерной в направлении, перпендикулярном границе раздела сред, и ее решение описывает пространственное распределение  $y$ -вой компоненты вектора напряженности электрического поля в данном направлении.

Как известно [8], основное уравнение теории волноводной оптики, описывающее поперечное распределение  $u(x)$  электрического поля в поверхностной волне, может быть записано в виде:

$$u''(x) + \{k_0^2 \varepsilon(x, I) - \beta^2\} u(x) = 0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon(x, I)$  – диэлектрическая проницаемость,  $I = u^2$  – интенсивность электрического поля (света),  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  – продольное волновое число,  $\lambda_0$  – длина волны подающегося излучения,  $\beta$  – константа распространения, которая связана с эффективным показателем преломления  $n$  выражением  $\beta = nk_0$ .

Уравнение (1) представляет собой в общем случае нелинейное уравнение с переменными коэффициентами.

Оптические свойства сред и их пространственное распределение полностью описывается диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon(x, I)$ . Поэтому различия в моделях сред описываются этой функцией. В случае плоской границы раздела сред такую функцию представляют в ступенчатом виде:

$$\varepsilon(x, I) = \begin{cases} \varepsilon_G(x), & x > 0, \\ \varepsilon_N(I), & x < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где учтено, что моделируется контакт нелинейной среды с градиентной; при этом предполагается, что нелинейная среда занимает полупространство  $x < 0$ , а градиентная – полупространство  $x > 0$ .

В (2) функция  $\varepsilon_N(I)$  описывает зависимость диэлектрической проницаемости от интенсивности света в нелинейной среде. Ее конкретный вид определяется моделью нелинейности среды, обусловленной нелинейно-оптическим откликом среды на возмущения электрического поля, возникающим вследствие перераспределения внутренних зарядов при изменении интенсивности возбуждающего поверхностную волну лазерного излучения. Отметим, что существует большое разнообразие реальных материалов с керровской нелинейностью. К примеру,

это кристаллы, подобные  $\text{AgGaSe}_x\text{S}_{2(1+x)}$ , обладающие высокой нелинейностью, включая керровскую, в которых показатель преломления изменяется пропорционально квадрату напряженности светового поля, а также полупроводники GaP, InAs, InP и InSb.

Функция  $\varepsilon_G(I)$  фактически характеризует пространственную неоднородность профиля показателя преломления в градиентной среде. Ее конкретный вид определяется моделью градиентной среды, в которой изменение показателя преломления с расстоянием от поверхности обусловлено пространственным распределением зарядов, индуцированных, например, имплантированными ионами. При этом профиль показателя преломления может соответствовать пространственному распределению концентрации имплантированных ионов. Это означает, что если технологически возможно создать определенный концентрационный профиль ионов при имплантации, то получится соответствующий профиль показателя преломления, определяющий функцию  $\varepsilon_G(I)$ .

В данной работе будем рассматривать наиболее распространенную модель нелинейности в виде линейной зависимости диэлектрической проницаемости от интенсивности света (т.е. квадратичной относительно электрического поля). Такая модель описывает нелинейные среды, обладающие эффектом Керра, и называемые керровскими. Для случая керровской нелинейности функцию  $\varepsilon_N(I)$  можно записать в виде:

$$\varepsilon_N(I) = \varepsilon_{0N}(I) + \alpha I, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент керровской нелинейности,  $\varepsilon_{0N} = \varepsilon_N(I = 0)$  – невозмущенное значение диэлектрической проницаемости нелинейной среды. В нелинейной оптике положительное значение коэффициента керровской нелинейности моделирует среду с самофокусирующим эффектом распространения пучка света (фокусирующие среды), а отрицательное – с дефокусирующим (дефокусирующие среды) [9]. Выбор модели нелинейности в виде (3) в первую очередь связан с тем, что уравнение (1) с коэффициентом (3) имеет точные аналитические решения, конкретный вид которых определяется знаком коэффициента керровской нелинейности и дополнительными условиями (ограниченность, периодичность и др.).

Для моделирования пространственной неоднородности показателя преломления в градиентной среде в данной работе будем использовать функцию в виде:

$$\varepsilon_G(x) = e_0 + \frac{e_1}{x+h} + \frac{e_2}{(x+h)^2}, \quad (4)$$

где  $e_0, e_1, e_2, h$  – параметры пространственного профиля диэлектрической проницаемости. Выбор

модели градиентной среды в виде (4) в первую очередь связан с тем, что уравнение (1) с коэффициентом (4) имеет точные аналитические решения [19], конкретный вид которых определяется параметрами профиля и выражается через специальные функции математической физики. К тому же, форма профиля диэлектрической проницаемости в виде (4) представляет собой обобщение монотонной убывающих профилей показателя преломления, использованных ранее при моделировании поверхностных волн, распространяющихся вдоль контакта градиентных с керровской нелинейной средой. В частности, при  $e_0 = e_2 = 0$  (4) переходит в профиль  $\varepsilon_G(x) = e_1/(x+h)$ , использованный в [20], а при  $e_0 = e_1 = 0$  (4) переходит в профиль  $\varepsilon_G(x) = e_2/(x+h)^2$ , использованный в [21].

Резко спадающий монотонным (но не экспоненциальным) образом на узком участке профиль показателя преломления упоминался при разработке особых фотоннокристаллических гетероструктур в работах [22, 23]. Профиль в форме (4) представляет собой более общий вариант упомянутого в них гиперболического профиля. Подбор параметров профиля (4) позволяет более качественно аппроксимировать экспериментально получаемые профили подобного класса. В связи с этим возникает интерес теоретического изучения возможности построения кристаллической системы, как композиции из указанных типов оптических материалов, на основе которого могут быть выявлены новые свойства.

Поскольку коэффициент  $\varepsilon$  в уравнении (1) является в общем случае разрывным (со скачком), то его решение можно представить в виде:

$$u(x) = \begin{cases} u_G(x), & x > 0 \\ u_N(I), & x < 0, \end{cases} \quad (5)$$

где искомые функции  $u_G(x)$  и  $u_N(x)$  описывают пространственные поперечные распределения напряженности электрического поля в градиентной и нелинейной средах, соответственно, и определены на соответствующих полуосях. В результате вместо уравнения (1) с учетом (2)–(5) можно записать два уравнения на полуосях:

$$u_G''(x) + \left( e_0 + \frac{e_1}{x+h} + \frac{e_2}{(x+h)^2} - n^2 \right) \times \\ \times k_0^2 u_G(x) = 0, \quad x > 0, \quad (6)$$

$$u_N''(x) + \{ \varepsilon_{0N} + \alpha |u_N|^2 - n^2 \} k_0^2 u_N(x) = 0, \quad x < 0. \quad (7)$$

Требования непрерывности компонент электромагнитного поля при переходе из одной среды в другую приводит к необходимости использования граничных условий сопряжения на границе раздела сред при  $x = 0$ :

$$u_G(+0) = u_G(-0), \quad (8)$$

$$u'_G(+0) = u'_G(-0). \quad (9)$$

Здесь и далее понимаются односторонние пределы  $\lim_{x \rightarrow \pm 0} f(x) = f(\pm 0)$ .

Поскольку поле должно стремиться к нулю на бесконечности, то естественным образом возникают условия на бесконечности:

$$\lim_{x \rightarrow \pm \infty} u_{G,N}(x) = 0. \quad (10)$$

Таким образом, математическая формулировка модели представляет собой краевую задачу нахождения непрерывных и ограниченных решений уравнений (6) и (7) на соответствующих полуосях, связанных условиями сопряжения (8) и (9) и удовлетворяющих условиям на бесконечности (10).

## 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Уравнение (6) представляет собой уравнение с переменными коэффициентами, и его ограниченное на положительной полуоси решение может быть записано различными способами: через гипергеометрическую функцию, конфлюэнтную функцию Хойна, а также функцию Уиттекера. На наш взгляд предпочтительнее является форма представления решения посредством функции Уиттекера.

Ограниченным на положительной полуоси решением уравнения дифференциального уравнения Уиттекера [24]

$$y'' + \left( \frac{\mu}{z} - \frac{1}{4} + \frac{1/4 - \nu^2}{z^2} \right) y = 0$$

является функция Уиттекера  $W_{\mu,\nu}(z)$ . С помощью замены переменных уравнение (6) приводится к уравнению Уиттекера, и тогда его ограниченное на положительной полуоси решение можно записать в виде:

$$u_G(x) = u_0 \frac{W_{\mu,\nu}(p(x+h))}{W_{\mu,\nu}(ph)}, \quad (11)$$

где  $u_0$  – амплитуда напряженности электрического поля на границе раздела сред, и индексы и параметры функции Уиттекера определяются коэффициентами уравнения (6) как:

$$\mu = \frac{e_1 k_0}{2\sqrt{n^2 - e_0}}, \quad (12)$$

$$\nu = \sqrt{1 - 4k_0^2 e_2} / 2, \quad (13)$$

$$p = 2k_0 \sqrt{n^2 - e_0}. \quad (14)$$

Для существования такого решения должны выполняться условия:  $n^2 > e_0$  и  $k_0^2 > 1/4e_2$ . В силу выбора функции Уиттекера, решение (11) удовлетворяет условию на бесконечности (10), которое для него имеет вид  $u_G(x) \rightarrow 0, x \rightarrow +\infty$ .

Выражение (7) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение. Оно имеет несколько типов решений, зависящих от знака коэффициента нелинейности  $\alpha$ . Поэтому дальнейший анализ модели проводится отдельно для случаев  $\alpha > 0$  и  $\alpha < 0$ .

1) Случай фокусирующей нелинейности ( $\alpha > 0$ ).

При  $\alpha > 0$  ограниченное на отрицательной полуоси решение уравнение (7), удовлетворяющее условию на бесконечности (10), которое для него имеет вид  $u_N(x) \rightarrow 0, x \rightarrow -\infty$ , выражается через гиперболический косинус:

$$u_N(x) = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \cdot \frac{q}{k_0 \operatorname{ch}(q(x - x_N))}, \quad (15)$$

где

$$q^2 = k^2(n^2 - \epsilon_{0N}), \quad (16)$$

а величина  $x_N$  характеризует положение максимума (при его наличии) интенсивности поверхностной волны в нелинейной среде, которое определяется из граничных условий.

Для определения амплитуды поля на границе раздела и  $x_N$  следует подставить решения (11) и (15) в граничные условия (8) и (9). В результате таких преобразований можно получить:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \cdot \frac{q}{k_0 \operatorname{ch}(qx_N)}, \quad (17)$$

$$x_N = \frac{1}{q} \operatorname{arcth} \left( \frac{q_G}{q} \right), \quad (18)$$

где обозначено:

$$q_G = p \frac{W'_{\mu,\nu}(ph)}{W_{\mu,\nu}(ph)}. \quad (19)$$

С учетом (18) из (17) можно получить интенсивность поля на границе раздела сред в виде:

$$I_0 = |u_0|^2 = \frac{2}{\alpha} (n^2 - \epsilon_{0N} - q_G^2 / k_0^2). \quad (20)$$

Таким образом, всюду непрерывное, гладкое, ограниченное, исчезающее на бесконечности решение поставленной краевой задачи положительной нелинейности можно записать в виде:

$$u(x) = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \cdot \begin{cases} \frac{W_{\mu,\nu}(p(x+h))}{W_{\mu,\nu}(ph)}, & x > 0, \\ \frac{q}{k_0 \operatorname{ch}(q(x - x_N))}, & x < 0. \end{cases} \quad (21)$$

Выражение (21) описывает нелинейную поверхностную волну, распространяющуюся вдоль границы раздела нелинейной фокусирующей и градиентной сред с выбранными моделями нелинейности и пространственного распределения показателя преломления.

2) Случай дефокусирующей нелинейности ( $\alpha < 0$ ).

При  $\alpha < 0$  ограниченное на отрицательной полуоси решение уравнение (7), удовлетворяющее условию на бесконечности (10), которое для него имеет вид  $u_N(x) \rightarrow 0, x \rightarrow -\infty$ , выражается через гиперболический синус:

$$u_N(x) = -\sqrt{\frac{2}{|\alpha|}} \cdot \frac{q}{k_0 \operatorname{sh}(q(x-x_N))}. \quad (22)$$

Для определения амплитуды поля на границе раздела и  $x_N$  следует подставить решения (11) и (22) в граничные условия (8) и (9). В результате таких преобразований можно получить:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \cdot \frac{q}{k_0 \operatorname{sh}(qx_N)}, \quad (23)$$

$$x_N = \frac{1}{q} \operatorname{arcctth}\left(\frac{q_G}{q}\right). \quad (24)$$

С учетом (24) из (23) можно получить интенсивность поля на границе раздела сред в виде:

$$I_0 = \frac{2}{|\alpha|} (q_G^2 / k_0^2 + \varepsilon_{0N} - n^2). \quad (25)$$

Таким образом, всюду непрерывное, гладкое, ограниченное, исчезающее на бесконечности решение поставленной краевой задачи в случае отрицательной нелинейности можно записать в виде:

$$u(x) = \sqrt{\frac{2}{|\alpha|}} \cdot \begin{cases} \frac{W_{\mu,v}(p(x+h))}{W_{\mu,v}(ph)}, & x > 0, \\ \frac{q}{k_0 \operatorname{sh}(q(x-x_N))}, & x < 0. \end{cases} \quad (26)$$

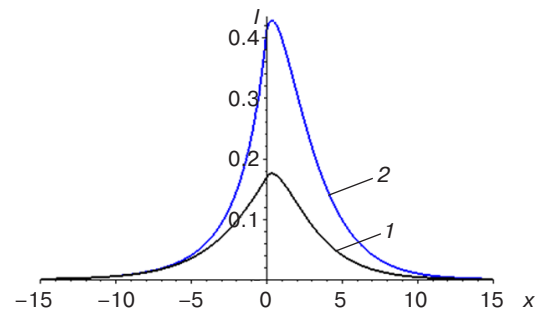
Выражение (26) описывает нелинейную поверхностную волну, распространяющуюся вдоль границы раздела нелинейной дефокусирующей и градиентной сред с выбранными моделями нелинейности и пространственного распределения показателя преломления.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

В первую очередь отметим различия в пространственном распределении интенсивности поля  $I$  в поверхностных волнах, распространяющихся в фокусирующих и дефокусирующих средах,

контактирующих с градиентной средой в рассматриваемой модели неоднородности.

На рис. 1 приведены характерные поперечные профили интенсивности, построенные при использовании решений (21) и (26) для одних и тех же значений оптических параметров. Отметим, что выбрано  $|\alpha| = 1$ , т.е.  $\alpha = 1$  для случая фокусирующей среды при построении линии 1 и  $\alpha = -1$  для случая дефокусирующей среды при построении линии 2. Все остальные значения параметров совпадают, причем они выбраны так, чтобы их значения попадали в диапазоны существования обеих поверхностных волн.



**Рис. 1.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах, определяемых выражениями (21) – линия 1, и (26) – линия 2, при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $k_0 = 0.5, h = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 0.8, e_2 = 0.2, \varepsilon_{0N} = 0.05, n = 0.44, a = 1$  (линия 1),  $\alpha = -1$  (линия 2)

Поверхностные волны характеризуются одним ярко выраженным максимумом пространственного распределения интенсивности поля, которое монотонно убывает при удалении от положения максимума в обе стороны от границы раздела сред. В выбранном диапазоне значений параметров максимум интенсивности поверхностных волн обоих типов располагается в градиентной среде. Как будет показано далее, в случае дефокусирующей нелинейности максимум интенсивности всегда располагается в градиентной среде, а в случае фокусирующей нелинейности он может располагаться и в нелинейной среде (не только в градиентной), но при других значениях параметров. Другими словами, в дефокусирующей нелинейной среде поле всегда затухает строго монотонно при любых значениях параметров. В фокусирующей среде затухание может быть немонотонным, с всплеском интенсивности вблизи границы раздела сред, причем в этом случае в градиентной среде затухание становится монотонным.

Высота интенсивности максимума в поверхностной волне в дефокусирующей среде (линия 2 на рис. 1) существенно превышает высоту интенсивности максимума в поверхностной волне в фокусирующей среде (линия 1 на рис. 1). К примеру, для выбранных на рис. 1 значений параметров это превышение более

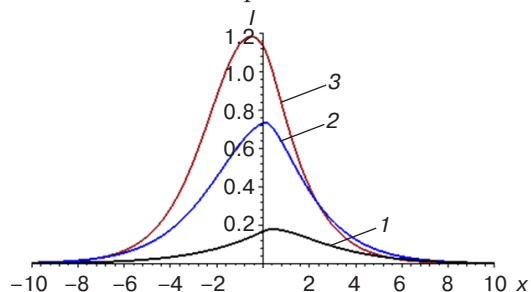
чем в два раза. Это обуславливает более высокую интенсивность света в поверхностной волне в дефокусирующей среде по сравнению с интенсивностью в поверхностной волне в фокусирующей среде на одном и том же расстоянии от границы раздела сред.

Далее приведем результаты моделирования свойств поверхностных волн, обусловленные изменениями оптических характеристик сред. Для случаев фокусирующей и дефокусирующей сред такой анализ проводится отдельно.

Отметим, что варьирование параметров моделей нелинейности (3) и градиентной сред (4) означает, что разным их значениям соответствуют различные среды. Варьирование эффективного показателя преломления  $n$  (что равносильно варьированию константы распространения  $\beta$ ) означает изменение угла падения луча, возбуждающего поверхностную волну в данной среде. Варьирование продольного волнового числа  $k_0$  означает изменение длины волны возбуждающего поверхностную волну излучения (к примеру, длины волны лазера).

1) Случай фокусирующей нелинейности ( $\alpha > 0$ ).

В результате моделирования с использованием аналитического решения (21) установлено, что поверхностная волна, распространяющаяся вдоль границы с фокусирующей нелинейной средой, в зависимости от значения эффективного показателя преломления может характеризоваться максимумом интенсивности, располагающимся как в нелинейной, так и в градиентной средах. В частности, при относительно небольших значениях эффективного показателя преломления положение максимума интенсивности находится в градиентной среде, и при его увеличении оно смещается ближе к границе раздела сред, а затем переходит в нелинейную среду (рис. 2). При этом его высота также возрастает. Глубина проникновения поля в нелинейную среду растет, а в градиентной среде она сначала возрастает, а затем начинает уменьшаться при увеличении эффективного показателя преломления.



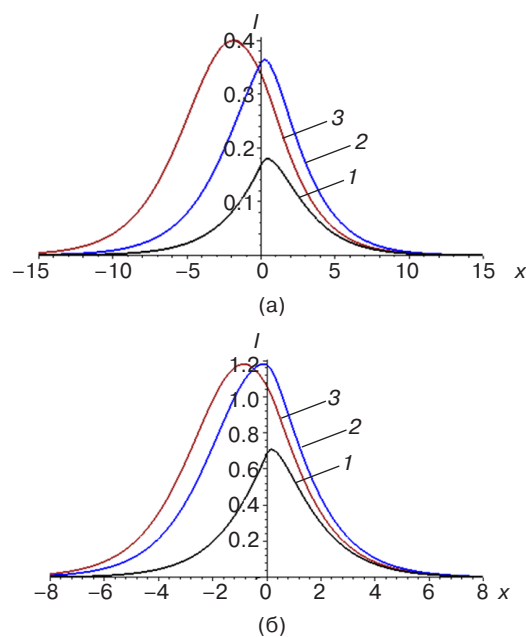
**Рис. 2.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в фокусирующей среде, определяемых (21), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):

$\alpha = 1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.1, \epsilon_{ON} = 0.05, n = 0.5$  (линия 1),  $n = 0.65$  (линия 2),  $n = 0.8$  (линия 3)

Видно, что существуют два различных характерных вида распределения интенсивности поля в поверхностной волне, распространяющейся вдоль границы с фокусирующей нелинейной средой, при двух различных значениях эффективного показателя преломления. Одному виду соответствует максимум интенсивности в градиентной среде (линия 1 на рис. 2), а другому – максимум интенсивности в нелинейной среде (линия 3 на рис. 2).

Далее будем анализировать изменение пространственного распределения интенсивности поверхностной волны при данных двух характерных значениях эффективного показателя преломления при варьировании параметров моделей сред.

Влияние изменения значения параметра  $h$  градиентного профиля (4) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны показано на рис. 3. При увеличении значения  $h$  положение максимума интенсивности смещается из градиентной среды в нелинейную. Однако форма профилей поля зависит от эффективного показателя преломления. В частности, при малых значениях  $n$  (рис. 3а) интенсивность поля ниже, чем при больших (рис. 3б).



**Рис. 3.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в фокусирующей среде, определяемых (21), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  
 $\alpha = 1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, \epsilon_{ON} = 0.05,$   
(а)  $n = 0.5, h = 0.5$  (линия 1),  $h = 0.7$  (линия 2),  
 $h = 1.5$  (линия 3);  
(б)  $n = 0.8, h = 0.2$  (линия 1),  $h = 0.4$  (линия 2),  
 $h = 0.6$  (линия 3)

Влияние изменения значения параметра  $e_2$  градиентного профиля (4) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны

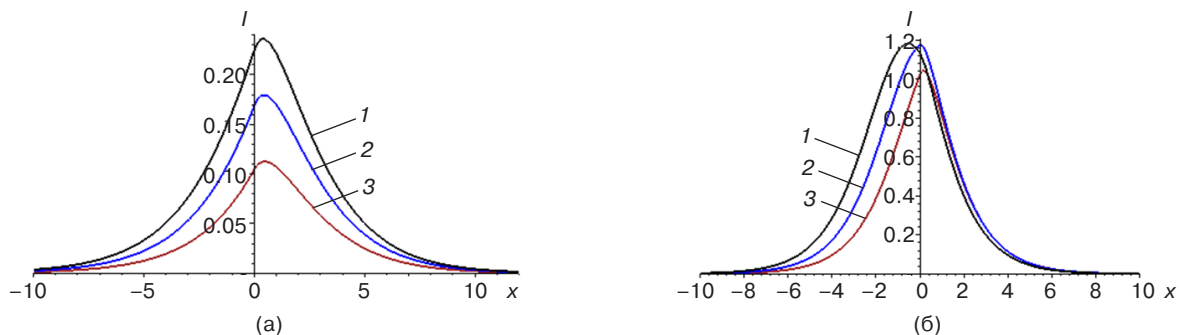
показано на рис. 4. Для малых значений эффективного показателя преломления (рис. 4а) при увеличении значения  $e_2$  положение максимума интенсивности, находящееся в градиентной среде, остается неизменным, а его высота снижается. Для больших значений эффективного показателя преломления (рис. 4б) при увеличении значения  $e_2$  положение максимума интенсивности, находящееся в нелинейной среде, смещается в градиентную среду, а его высота также снижается.

Влияние изменения значения параметра  $e_1$  градиентного профиля (4) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны показано на рис. 5. Для малых значений эффективного показателя преломления (рис. 5а) при увеличении значения  $e_1$  положение максимума интенсивности, находящееся в градиентной среде, перемещается в глубину градиентной среды, а его высота снижается. Для больших значений эффективного показателя преломления (рис. 5б) при увеличении значения  $e_1$  положение максимума интенсивности, находящееся в нелинейной среде, смещается в градиентную среду, а его высота также снижается.

Влияние изменения значения параметра  $e_0$  градиентного профиля (4) на пространственное

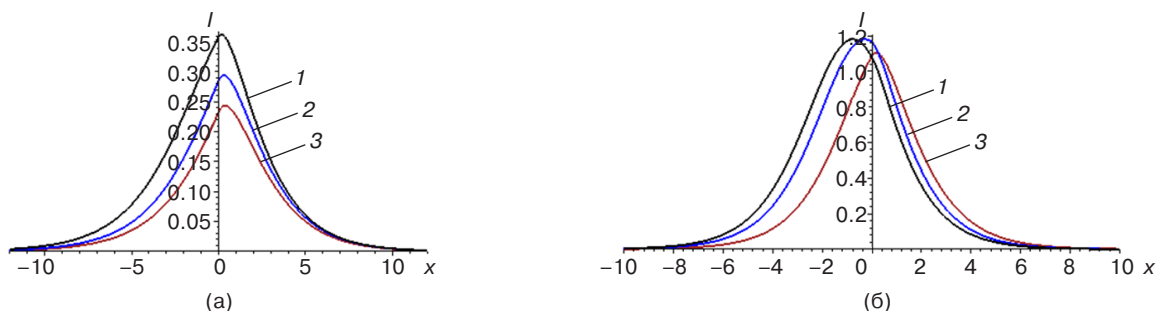
распределение интенсивности поверхностной волны показано на рис. 6. Для малых значений эффективного показателя преломления (рис. 6а) при уменьшении значения  $e_0$  положение максимума интенсивности, находящееся в градиентной среде, перемещается в глубину градиентной среды, а его высота увеличивается. Для больших значений эффективного показателя преломления (рис. 6б) при уменьшении значения  $e_0$  положение максимума интенсивности, находящееся в нелинейной среде, смещается в ее глубину, удаляясь от границы раздела сред, а его высота не меняется.

Влияние изменения значения параметра  $\varepsilon_{0N}$  модели нелинейности (3) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны показано на рис. 7. Для малых значений эффективного показателя преломления (рис. 7а) при увеличении значения  $\varepsilon_{0N}$  положение максимума интенсивности, находящееся в градиентной среде, не меняется, а его высота уменьшается. При больших значениях эффективного показателя преломления (рис. 7б) наблюдается аналогичный эффект, когда положение максимума интенсивности находится в нелинейной среде, однако снижение высоты максимума менее значительно, чем в случае малых  $n$  при одинаковом интервале вариации  $\varepsilon_{0N}$ .

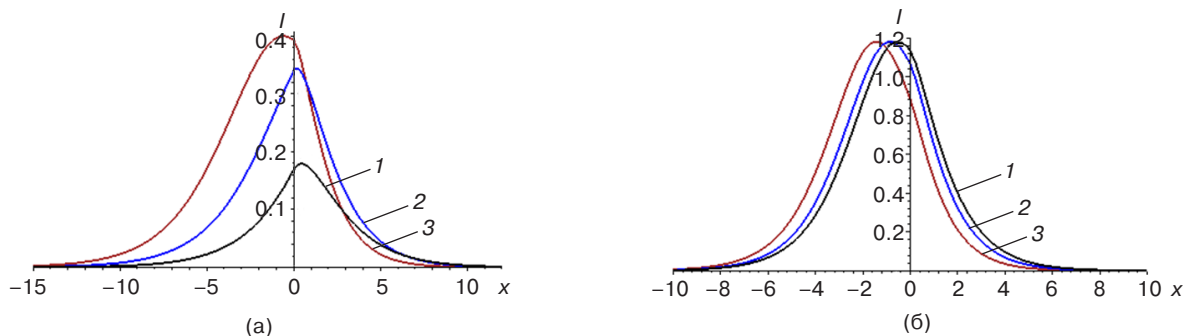


**Рис. 4.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в фокусирующей среде, определяемых (21), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):

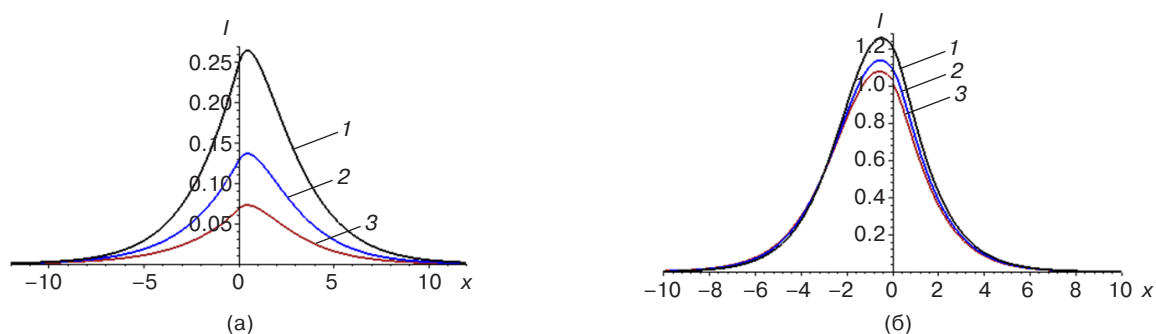
- $\alpha = 1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, h = 0.5, \varepsilon_{0N} = 0.05,$   
 (а)  $n = 0.5, e_2 = 0.15$  (линия 1),  $e_2 = 0.2$  (линия 2),  $e_2 = 0.25$  (линия 3);  
 (б)  $n = 0.8, e_2 = 0.2$  (линия 1),  $e_2 = 0.5$  (линия 2),  $e_2 = 0.8$  (линия 3)



**Рис. 5.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в фокусирующей среде, определяемых (21), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $\alpha = 1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \varepsilon_{0N} = 0.05,$   
 (а)  $n = 0.5, e_1 = 0.8$  (линия 1),  $e_1 = 0.9$  (линия 2),  $e_1 = 0.95$  (линия 3);  
 (б)  $n = 0.8, e_1 = 0.9$  (линия 1),  $e_1 = 1.1$  (линия 2),  $e_1 = 1.5$  (линия 3)



**Рис. 6.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в фокусирующей среде, определяемых (21), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $\alpha = 1, k_0 = 0.5, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \epsilon_{0N} = 0.05,$   
 $e_0 = -0.1$  (линия 1),  $e_0 = -0.2$  (линия 2),  $e_0 = -0.4$  (линия 3);  
(а)  $n = 0.5$ , (б)  $n = 0.8$

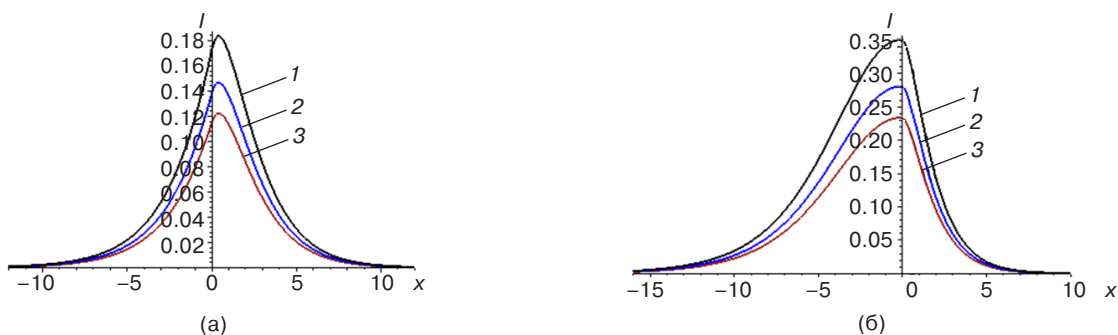


**Рис. 7.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в фокусирующей среде, определяемых (21), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $\alpha = 1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5,$   
 $\epsilon_{0N} = 0.01$  (линия 1),  $\epsilon_{0N} = 0.07$  (линия 2),  $\epsilon_{0N} = 0.1$  (линия 3);  
(а)  $n = 0.5$ , (б)  $n = 0.8$

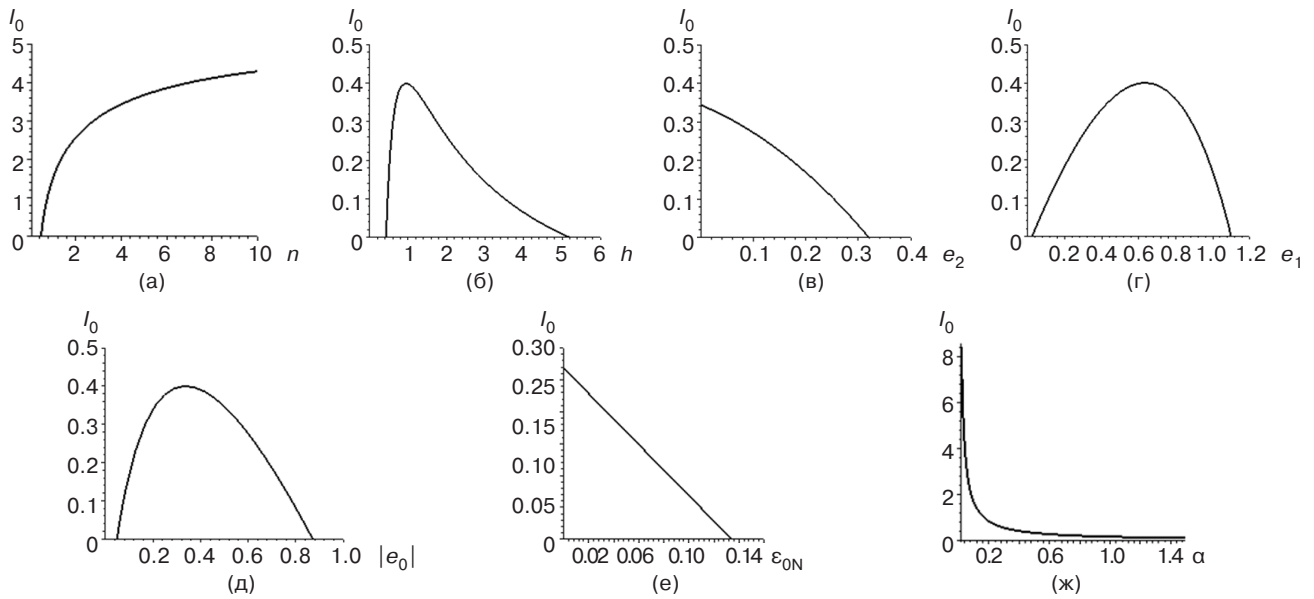
Влияние изменения значения коэффициента  $\alpha$  модели нелинейности (3) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны показано на рис. 8. Для малых (рис. 8а) и больших (рис. 8б) значений эффективного показателя преломления при увеличении значения  $\alpha$  положение максимума интенсивности не меняется, а его высота уменьшается. Однако при больших значениях  $n$

глубина проникновения поля в нелинейную среду снижается существеннее, чем при малых  $n$ .

Влияние изменения значения оптических параметров модели на интенсивность поверхностной волны на границе раздела сред  $I_0$ , определяемого (20), показано на рис. 9. Следует отметить, что зависимости интенсивность поверхностной волны на границе раздела от оптических параметров модели не все



**Рис. 8.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в фокусирующей среде, определяемых (21), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \epsilon_{0N} = 0.05,$   
 $\alpha = 0.8$  (линия 1),  $\alpha = 1$  (линия 2),  $\alpha = 1.2$  (линия 3);  
(а)  $n = 0.5$ , (б)  $n = 0.8$



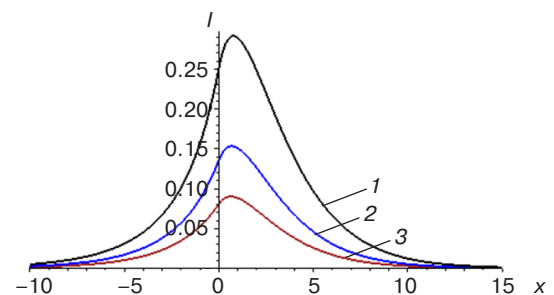
**Рис. 9.** Интенсивность поля на границе раздела сред, определяемая (20), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $k_0 = 0.5$ ,  
(а) зависимость от  $n$  при  $h = 0.5$ ,  $e_0 = -0.1$ ,  $e_1 = 1$ ,  $e_2 = 0.2$ ,  $\epsilon_{0N} = 0.05$ ,  $\alpha = 1$ ;  
(б) зависимость от  $h$  при  $n = 0.5$ ,  $e_0 = -0.1$ ,  $e_1 = 1$ ,  $e_2 = 0.2$ ,  $\epsilon_{0N} = 0.05$ ,  $\alpha = 1$ ;  
(в) зависимость от  $e_2$  при  $n = 0.5$ ,  $e_0 = -0.1$ ,  $e_1 = 1$ ,  $h = 0.5$ ,  $\epsilon_{0N} = 0.05$ ,  $\alpha = 1$ ;  
(г) зависимость от  $e_1$  при  $n = 0.5$ ,  $e_0 = -0.1$ ,  $e_2 = 0.2$ ,  $h = 0.5$ ,  $\epsilon_{0N} = 0.05$ ,  $\alpha = 1$ ;  
(д) зависимость от  $|e_0|$  при  $n = 0.5$ ,  $e_1 = 1$ ,  $e_2 = 0.2$ ,  $h = 0.5$ ,  $\epsilon_{0N} = 0.05$ ,  $\alpha = 1$ ;  
(е) зависимость от  $\epsilon_{0N}$  при  $n = 0.5$ ,  $e_0 = -0.1$ ,  $e_1 = 1$ ,  $e_2 = 0.2$ ,  $h = 0.5$ ,  $\alpha = 1$ ;  
(ж) зависимость от  $\alpha$  при  $n = 0.5$ ,  $e_0 = -0.1$ ,  $e_1 = 1$ ,  $e_2 = 0.2$ ,  $h = 0.5$ ,  $\epsilon_{0N} = 0.05$

являются монотонными, т.е. при определенных значениях ряда оптических параметров наблюдается максимум величины  $I_0$ . Анализ результатов моделирования показал, что при увеличении эффективного показателя преломления интенсивность поверхностной волны на границе раздела сред монотонно возрастает (рис. 9а). Интенсивность  $I_0$  монотонно убывает при увеличении таких оптических параметров как  $e_2$  (рис. 9в),  $\epsilon_{0N}$  (рис. 9е),  $\alpha$  (рис. 9ж). Максимумы интенсивности были обнаружены на зависимостях от таких оптических параметров как  $h$  (рис. 9б),  $e_1$  (рис. 9г),  $e_0$  (рис. 9д).

2) Случай дефокусирующей нелинейности ( $\alpha < 0$ ).

В результате моделирования с использованием аналитического решения (26) установлено, что поверхностная волна, распространяющаяся вдоль границы с дефокусирующей нелинейной средой, характеризуется всегда одним максимумом интенсивности, расположенным в градиентной среде. При увеличении значения эффективного показателя преломления его высота уменьшается (рис. 10). Ширина локализации поля уменьшается при этом, а положение максимума незначительно смещается к границе раздела сред. Этот эффект влияния эффективного показателя преломления в случае границы с дефокусирующей средой противоположен эффекту,

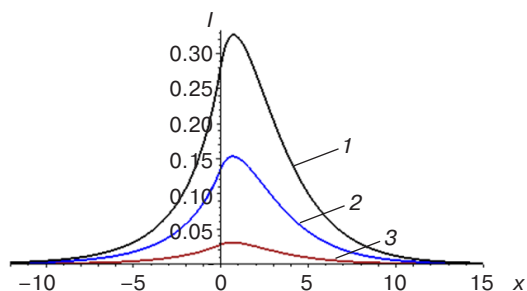
наблюдаемому в случае границы с фокусирующей средой (можно сравнить рис. 3 и 10). Следовательно, изменение угла падения луча, возбуждающего поверхностную волну, оказывает различное (а точнее – противоположное) влияние на распределение поля в поверхностных волнах в фокусирующей и дефокусирующей средах.



**Рис. 10.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в дефокусирующей среде, определяемых (26), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $\alpha = -1$ ,  $k_0 = 0.5$ ,  $h = 0.5$ ,  $e_0 = -0.1$ ,  $e_1 = 1$ ,  $e_2 = 0.2$ ,  $\epsilon_{0N} = 0.05$ ,  $n = 0.42$  (линия 1),  $n = 0.44$  (линия 2),  $n = 0.45$  (линия 3)

Влияние изменения значения параметра  $h$  градиентного профиля (4) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны,

определяемой решением (26), показано на рис. 11. При увеличении значения  $h$  наблюдается эффект, аналогичный увеличению эффективного показателя преломления.

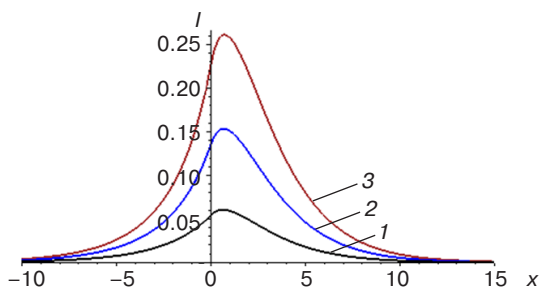


**Рис. 11.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в дефокусирующей среде, определяемых (26), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):

$$\alpha = -1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, \\ e_2 = 0.2, \varepsilon_{0N} = 0.05, n = 0.44,$$

$h = 0.45$  (линия 1),  $h = 0.50$  (линия 2),  $h = 0.55$  (линия 3)

Влияние изменения значения параметра  $e_2$  градиентного профиля (4) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны, определяемой решением (26), показано на рис. 12. При увеличении значения  $e_2$  положение максимума интенсивности, находящееся в градиентной среде, остается неизменным, его высота увеличивается, а также растет ширина локализации поля.



**Рис. 12.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в дефокусирующей среде, определяемых (26), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):

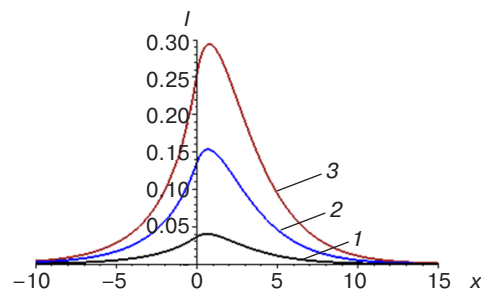
$$\alpha = -1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, h = 0.5, \\ \varepsilon_{0N} = 0.05, n = 0.44,$$

$e_2 = 0.15$  (линия 1),  $e_2 = 0.2$  (линия 2),  $e_2 = 0.25$  (линия 3)

Влияние изменения значения параметра  $e_1$  градиентного профиля (4) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны, определяемой решением (26), показано на рис. 13. При увеличении значения  $e_1$  наблюдается эффект, аналогичный увеличению параметра  $e_2$  градиентного профиля (4).

Влияние изменения значения параметра  $e_0$  градиентного профиля (4) на пространственное

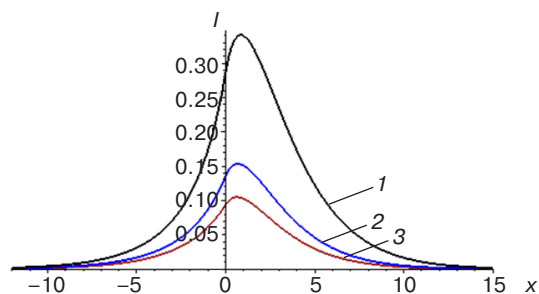
распределение интенсивности поверхностной волны, определяемой решением (26), показано на рис. 14. При уменьшении значения  $e_0$  наблюдается эффект, аналогичный увеличению эффективного показателя преломления и параметра  $h$ .



**Рис. 13.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в дефокусирующей среде, определяемых (26), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):

$$\alpha = -1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_2 = 0.2, \\ h = 0.5, \varepsilon_{0N} = 0.05, n = 0.5,$$

$e_1 = 0.95$  (линия 1),  $e_1 = 1.0$  (линия 2),  $e_1 = 1.05$  (линия 3)



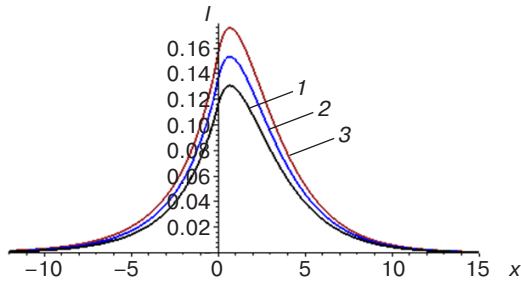
**Рис. 14.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в дефокусирующей среде, определяемых (26), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):

$$\alpha = -1, k_0 = 0.5, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \\ \varepsilon_{0N} = 0.05, n = 0.44,$$

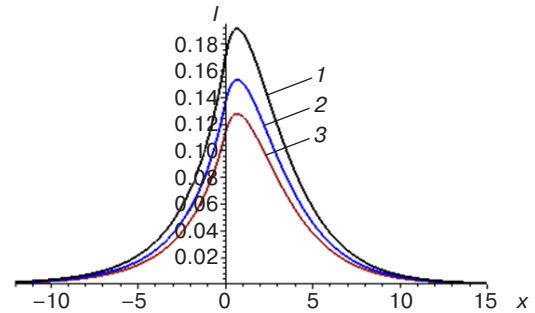
$e_0 = -0.07$  (линия 1),  $e_0 = -0.10$  (линия 2),  $e_0 = -0.11$  (линия 3)

Влияние изменения значения параметра  $\varepsilon_{0N}$  модели нелинейности (3) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны, определяемой решением (26), показано на рис. 15. При увеличении значения  $\varepsilon_{0N}$  наблюдается эффект, аналогичный увеличению параметров  $e_1$  и  $e_2$  градиентного профиля (4).

Влияние изменения значения коэффициента  $\alpha$  модели нелинейности (3) на пространственное распределение интенсивности поверхностной волны, определяемой решением (26), показано на рис. 16. При уменьшении коэффициента керровской нелинейности (т.е. при увеличении абсолютного значения  $\alpha$ ) наблюдается эффект, аналогичный увеличению эффективного показателя преломления и параметра  $h$ .



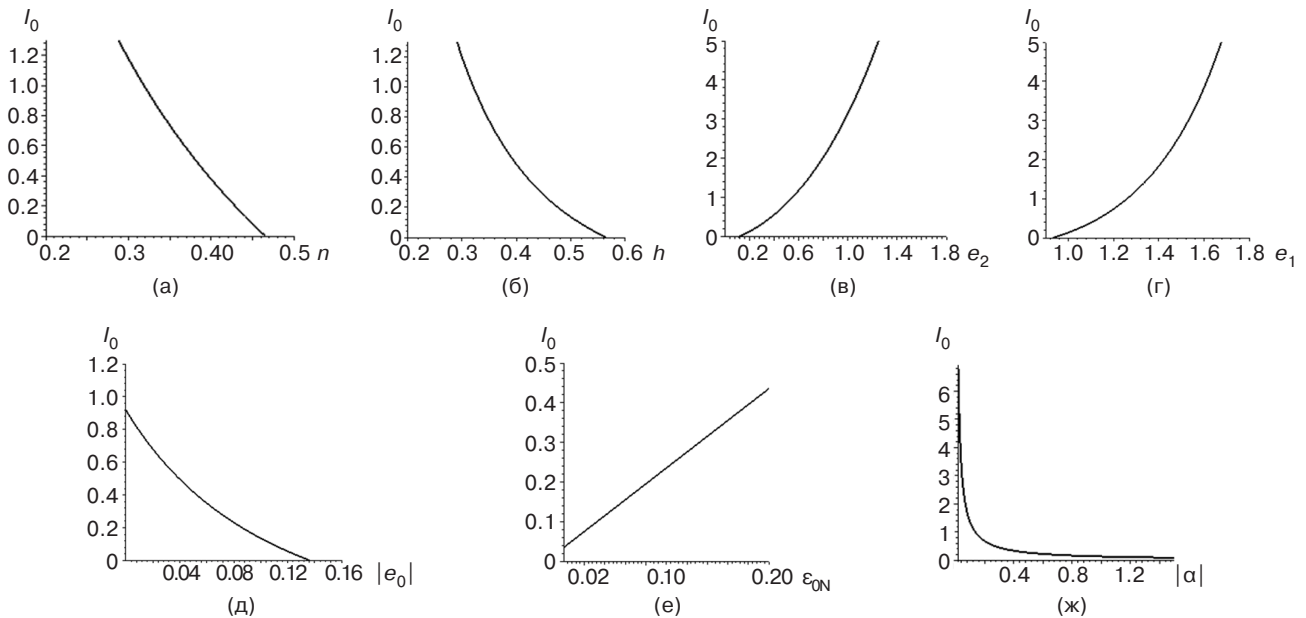
**Рис. 15.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в дефокусирующей среде, определяемых (26), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $\alpha = -1, k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5, n = 0.44,$   
 $\epsilon_{0N} = 0.04$  (линия 1),  $\epsilon_{0N} = 0.05$  (линия 2),  
 $\epsilon_{0N} = 0.06$  (линия 3)



**Рис. 16.** Пространственные распределения интенсивности поля в поверхностных волнах в дефокусирующей среде, определяемых (26), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $k_0 = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \epsilon_{0N} = 0.05, n = 0.44,$   
 $\alpha = -0.8$  (линия 1),  $\alpha = -1.0$  (линия 2),  $\alpha = -1.2$  (линия 3)

Таким образом, видно, что влияние значений оптических параметров модели на профили пространственного распределения интенсивности в поверхностных волнах, распространяющихся вдоль границ раздела, существенно зависит от знака коэффициента нелинейности, а наблюдаемые эффекты зачастую противоположны в фокусирующих и дефокусирующих средах.

Влияние изменения значения оптических параметров модели на интенсивность поверхностной волны на границе раздела сред  $I_0$ , определяемого (25), показано на рис. 17. Следует отметить, что зависимости интенсивности поверхностной волны на границе раздела с дефокусирующей средой от оптических параметров модели все являются монотонными в отличие от случая контакта с фокусирующей



**Рис. 17.** Интенсивность поля на границе раздела сред, определяемая (25), при значениях параметров системы (в условных безразмерных единицах):  $k_0 = 0.5,$   
(а) зависимость от  $n$  при  $h = 0.5, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, \epsilon_{0N} = 0.05, \alpha = -1;$   
(б) зависимость от  $h$  при  $n = 0.44, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, \epsilon_{0N} = 0.05, \alpha = -1;$   
(в) зависимость от  $e_2$  при  $n = 0.44, e_0 = -0.1, e_1 = 1, h = 0.5, \epsilon_{0N} = 0.05, \alpha = -1;$   
(г) зависимость от  $e_1$  при  $n = 0.44, e_0 = -0.1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \epsilon_{0N} = 0.05, \alpha = -1;$   
(д) зависимость от  $|e_0|$  при  $n = 0.44, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \epsilon_{0N} = 0.05, \alpha = -1;$   
(е) зависимость от  $\epsilon_{0N}$  при  $n = 0.44, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \alpha = -1;$   
(ж) зависимость от  $|\alpha|$  при  $n = 0.44, e_0 = -0.1, e_1 = 1, e_2 = 0.2, h = 0.5, \epsilon_{0N} = 0.05$

средой. Анализ результатов моделирования показал, что интенсивность поверхностной волны на границе раздела сред монотонно уменьшается при увеличении эффективного показателя преломления (рис. 17а), параметра  $h$  (рис. 17б) и абсолютного значения  $e_0$  (рис. 17д). Интенсивность  $I_0$  монотонно возрастает при увеличении таких оптических параметров как  $e_2$  (рис. 17в),  $e_1$  (рис. 17г) и  $\epsilon_{0N}$  (рис. 17е). В этих случаях наблюдаемые в дефокусирующей среде эффекты противоположны наблюдаемым в фокусирующей среде. Увеличение абсолютного значения коэффициента керровской нелинейности (рис. 17ж) полностью аналогично увеличению  $\alpha$  в фокусирующей среде (рис. 9ж).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты аналитического моделирования поверхностных поперечных волн, распространяющихся вдоль границы раздела нелинейной и градиентной немагнитных сред без потерь. В качестве модели нелинейности среды, описывающей нелинейно-оптический отклик среды на возмущения электрического поля, выбрана линейная форма зависимости диэлектрической проницаемости от интенсивности света. В качестве модели градиентной среды выбрана специальная форма пространственного профиля диэлектрической проницаемости, описывающая ее изменение в зависимости от расстояния до границы раздела, для которой можно найти точное аналитическое решение стационарного волнового уравнения.

Приведена математическая формулировка модели, которая представляет собой краевую задачу сопряжения для нелинейного уравнения с переменными коэффициентами. Найдены точные аналитические решения данной краевой задачи для случаев фокусирующей и дефокусирующей нелинейностей. Данные решения описывают пространственные распределения напряженности электрического поля в поперечном направлении на границе раздела сред на направлении в поверхностных волнах.

В результате анализа модели выявлены различия пространственного распределения интенсивности поля в поверхностных волнах, распространяющихся в фокусирующих и дефокусирующих средах. В случае дефокусирующей нелинейности максимум интенсивности всегда располагается в градиентной среде, а в случае фокусирующей нелинейности он может располагаться как градиентной, так

и в нелинейной среде, но при других значениях параметров. Кроме того, в поверхностной волне в дефокусирующей среде интенсивность света выше по сравнению с интенсивностью в поверхностной волне в фокусирующей среде на одном и том же расстоянии от границы раздела сред при одинаковых значениях параметров модели.

Проведен подробный анализ влияния значений параметров модели, характеризующих оптические свойства контактирующих сред, на пространственное распределение интенсивности света в поверхностных волнах. Результаты моделирования показали, что изменение одних и тех же параметров оказывает различное (а точнее – противоположное) влияние на распределение поля в поверхностных волнах в фокусирующей и дефокусирующей средах. В частности, при увеличении значения эффективного показателя преломления высота максимума распределения интенсивности в фокусирующей среде увеличивается, а в дефокусирующей уменьшается.

В данной работе модель контактирующих оптических сред выбрана иная, чем та, что рассматривалась в наших предыдущих работах. Полученные новые аналитические решения отличаются от полученных ранее, поэтому возникают различия в свойствах описываемых ими поверхностных волн, в частности, касаясь чувствительности формы их профилей к изменениям оптических параметров сред.

Полученные результаты дополняют существующую теорию нелинейной и волноводной оптики. Они могут найти применение при проектировании новых волноводных структур с требуемыми дисперсионными свойствами, определяемыми интенсивностью поверхностных волн и оптическими характеристиками нелинейных и градиентных сред. Полученные новые решения расширяют класс точно решаемых моделей планарных волноводных структур с распределенными неоднородными и нелинейными свойствами.

#### Вклад авторов

**С.Е. Савотченко** – концептуализация, методология, аналитические вычисления, визуализация, написание текста статьи.

**Н.О. Афанасьева** – численные вычисления, исследования, визуализация, написание текста статьи.

#### Authors' contributions

**S.E. Savotchenko** – conceptualization, methodology, analytical calculations, visualization, writing the manuscript.

**N.O. Afanasyeva** – numerical calculations, investigations, visualization, and writing the manuscript.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголюбов А.Н., Мосунова Н.А., Петров Д.А. Математические модели киральных волноводов. *Матем. моделирование*. 2007;19(5):3–24. <https://www.elibrary.ru/hzwrxp>
2. Svendsen B.B., Söderström M., Carlens H., Dalarsson M. Analytical and Numerical Models for TE-Wave Absorption in a Graded-Index GNP-Treated Cell Substrate Inserted in a Waveguide. *Appl. Sci.* 2022;12(14):7097. <https://doi.org/10.3390/app12147097>
3. Adams M.J. *An Introduction to Optical Waveguides*. Chichester: Wiley; 1981, 401 p.
4. Mihalache D. Localized structures in optical media and Bose-Einstein condensates: An overview of recent theoretical and experimental results. *Rom. Rep. Phys.* 2024;76(2):402. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.402>
5. Goyal A.K., Husain M., Massoud Y.Y. Analysis of interface mode localization in disordered photonic crystal structure. *J. Nanophoton.* 2022;16(4):046007. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.16.046007>
6. Kubica J.M. Analysis of planar waveguides with a thin overlayer and nonlinear cladding. *Opt. Quant. Electron.* 2023;55(12):137. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04390-4>
7. Шварцбург А.Б. Дисперсия электромагнитных волн в слоистых и нестационарных средах (точно решаемые модели). *Успехи физических наук (УФН)*. 2000;170(12):1297–1324. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200012b.1297>
8. Chen C-L. *Foundations for Guided-Wave Optics*. New York: John Wiley & Sons Inc.; 2005, 462 p. <https://doi.org/10.1002/0470042222>
9. Kivshar Yu.S., Agrawal G.P. *Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals*. San Diego: Academic Press; 2003, 540 p.
10. Kudryashov N.A. Stationary solitons of the model with nonlinear chromatic dispersion and arbitrary refractive index. *Optik.* 2022;259(7):168888. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168888>
11. Liang N., Mihalache D., Ma M., Rao J., Liu Y. The multiple bright soliton pairs of the fully PT-symmetric nonlocal Davey-Stewartson I equation. *Rom. Rep. Phys.* 2024;76(2):106. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.106>
12. Каданцев В.Н., Гольцов А.Н. Латеральный протонный транспорт, индуцированный распространением акустических солитонов в липидных мембранах. *Russian Technological Journal.* 2025;13(2):111–120. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-111-120>
13. Черняев А.П., Черняева С.А. Вырождение кноидальных волн в неограниченные решения для уравнения Кортевега – Де Фриза. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;6:8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.6.5>
14. Agrawal G.P. *Physics and Engineering of Graded-Index Media*. New York: Cambridge University Press; 2023, 348 p. <https://doi.org/10.1017/9781009282086>
15. Touam T., Yergeau F. Analytical solution for a linearly graded-index-profile planar waveguide. *Appl. Opt.* 1993;32(3):309–312. <https://doi.org/10.1364/AO.32.000309>
16. Almawgani A.H.M., Taya S.A., Hussein A.J., Colak I. Dispersion properties of a slab waveguide with a graded-index core layer and a nonlinear cladding using the WKB approximation method. *J. Opt. Soc. Am. B.* 2022;39(6):1606–1613. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.458569>
17. Савотченко С.Е. Модели волноводов, сочетающих градиентные и нелинейно-оптические слои. *Russian Technological Journal.* 2023;11(4):84–93. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-84-93>
18. Савотченко С.Е. Модели симметричных трехслойных волноводных структур с градиентной сердцевиной и нелинейно-оптическими обкладками. *Russian Technological Journal.* 2024;12(5):77–89. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-77-89>
19. Савотченко С.Е. Моделирование поверхностных волн в фотонных кристаллических структурах с профилем показателя преломления, убывающим с расстоянием от поверхности. *Russian Technological Journal.* 2026;14(1):91–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-91-102>
20. Savotchenko S.E. New surface waves in a hyperbolic graded-index crystal. *Rom. Rep. Phys.* 2024;76(4):406. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.406>
21. Savotchenko S.E. Surface waves in a medium with spatial monotonic attenuation of the refractive index. *Rom. Rep. Phys.* 2025;77(1):402. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2025.77.402>
22. Singh B.K., Bijalwan A., Pandey P.C., Rastogi V. Photonic bandgaps engineering in double graded hyperbolic, exponential and linear index materials embedded one-dimensional photonic crystals. *Eng. Res. Express.* 2019;1(2):025004. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ab48a0>
23. Singh B.K., Bambole V., Rastogi V., Pandey P.C. Multi-channel photonic bandgap engineering in hyperbolic graded index materials embedded one-dimensional photonic crystals. *Opt. Laser Technol.* 2020;129(17):106293. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106293>
24. Andrews G.E., Askey R., Roy R. *Special Functions*. UK: Cambridge University Press; 1999, 664 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107325937>

## REFERENCES

1. Bogolyubov A.N., Mosunova N.A., Petrov D.A. Mathematical models of chirowaveguides. *Matematicheskoe modelirovanie = Mat. Model.* 2007;19(5):3–24 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/hzwrxp>
2. Svendsen B.B., Söderström M., Carlens H., Dalarsson M. Analytical and Numerical Models for TE-Wave Absorption in a Graded-Index GNP-Treated Cell Substrate Inserted in a Waveguide. *Appl. Sci.* 2022;12(14):7097. <https://doi.org/10.3390/app12147097>
3. Adams M.J. *An Introduction to Optical Waveguides*. Chichester: Wiley; 1981, 401 p.
4. Mihalache D. Localized structures in optical media and Bose-Einstein condensates: An overview of recent theoretical and experimental results. *Rom. Rep. Phys.* 2024;76(2):402. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.402>

5. Goyal A.K., Husain M., Massoud Y.Y. Analysis of interface mode localization in disordered photonic crystal structure. *J. Nanophoton.* 2022;16(4):046007. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.16.046007>
6. Kubica J.M. Analysis of planar waveguides with a thin overlayer and nonlinear cladding. *Opt. Quant. Electron.* 2023;55(12):137. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04390-4>
7. Shvartsburg A.B. Dispersion of electromagnetic waves in stratified and nonstationary media (exactly solvable models). *Phys. Usp.* 2000;43(12):1201–1228. <https://doi.org/10.1070/PU2000v043n12ABEH000827>  
[Original Russian Text: Shvartsburg A.B. Dispersion of electromagnetic waves in stratified and nonstationary media (exactly solvable models). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* 2000;170(12):1297–1324 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200012b.1297> ]
8. Chen C.-L. *Foundations for Guided-Wave Optics*. New York: John Wiley & Sons Inc.; 2005, 462 p. <https://doi.org/10.1002/0470042222>
9. Kivshar Yu.S., Agrawal G.P. *Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals*. San Diego: Academic Press; 2003, 540 p.
10. Kudryashov N.A. Stationary solitons of the model with nonlinear chromatic dispersion and arbitrary refractive index. *Optik.* 2022;259(7):168888. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168888>
11. Liang N., Mihalache D., Ma M., Rao J., Liu Y. The multiple bright soliton pairs of the fully PT-symmetric nonlocal Davey-Stewartson I equation. *Rom. Rep. Phys.* 2024;76(2):106. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.106>
12. Kadantsev V.N., Goltsov A.N. Lateral proton transport induced by acoustic solitons propagating in lipid membranes. *Russian Technological Journal.* 2025;13(2):111–120. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-111-120>
13. Chernyaev A. P., Chernyaeva S. A. Degeneration of cnoidal waves into unbounded solutions for the Korteweg-De Vries equation. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics.* 2018;6:8 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.6.5>
14. Agrawal G.P. *Physics and Engineering of Graded-Index Media*. New York: Cambridge University Press; 2023, 348 p. <https://doi.org/10.1017/9781009282086>
15. Touam T., Yergeau F. Analytical solution for a linearly graded-index-profile planar waveguide. *Appl. Opt.* 1993;32(3):309–312. <https://doi.org/10.1364/AO.32.000309>
16. Almawgani A.H.M., Taya S.A., Hussein A.J., Colak I. Dispersion properties of a slab waveguide with a graded-index core layer and a nonlinear cladding using the WKB approximation method. *J. Opt. Soc. Am. B.* 2022;39(6):1606–1613. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.458569>
17. Savotchenko S.E. Models of waveguides combining gradient and nonlinear optical layers. *Russian Technological Journal.* 2023;11(4):84–93. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-84-93>
18. Savotchenko S.E. Models of symmetric three-layer waveguide structures with graded-index core and nonlinear optical liners. *Russian Technological Journal.* 2024;12(5):77–89. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-77-89>
19. Savotchenko S.E. Modeling of surface waves in photonic crystal structures with a refractive index profile decreasing with distance from the surface. *Russian Technological Journal.* 2026;14(1):91–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-91-102>
20. Savotchenko S.E. New surface waves in a hyperbolic graded-index crystal. *Rom. Rep. Phys.* 2024;76(4):406. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.406>
21. Savotchenko S.E. Surface waves in a medium with spatial monotonic attenuation of the refractive index. *Rom. Rep. Phys.* 2025;77(1):402. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2025.77.402>
22. Singh B.K., Bijalwan A., Pandey P.C., Rastogi V. Photonic bandgaps engineering in double graded hyperbolic, exponential and linear index materials embedded one-dimensional photonic crystals. *Eng. Res. Express.* 2019;1(2):025004. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ab48a0>
23. Singh B.K., Bambole V., Rastogi V., Pandey P.C. Multi-channel photonic bandgap engineering in hyperbolic graded index materials embedded one-dimensional photonic crystals. *Opt. Laser Technol.* 2020;129(17):106293. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106293>
24. Andrews G.E., Askey R., Roy R. *Special Functions*. UK: Cambridge University Press; 1999, 664 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107325937>

### Об авторах

**Савотченко Сергей Евгеньевич**, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: savotchenkose@mail.ru. Scopus Author ID 6603577988, SPIN-код РИНЦ 2552-4344, <https://orcid.org/0000-0002-7158-9145>

**Афанасьева Надежда Олеговна**, аспирант, кафедра высшей математики и физики, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) (117997, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23). E-mail: noafanasieva@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0009-0044-7930>

### About the Authors

**Sergey E. Savotchenko**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor, High Mathematics Department – 3, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: savotchenkose@mail.ru. Scopus Author ID 6603577988, RSCI SPIN-code 2552-4344, <https://orcid.org/0000-0002-7158-9145>

**Nadezhda O. Afanasyeva**, Postgraduate Student, High Mathematics and Physics Department, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI) (23, Miklukho-Maklaya ul., Moscow, 117997 Russia). E-mail: noafanasieva@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0009-0044-7930>

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 338.2

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-131-144>

EDN TTSRRP



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Планирование воспроизводственных процессов в электронике на стратегическую перспективу

В.В. Шпак<sup>@</sup>

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>@</sup> Автор для переписки, e-mail: [morser@yandex.ru](mailto:morser@yandex.ru)

• Поступила: 07.04.2026 • Доработана: 19.04.2026 • Принята к опубликованию: 27.04.2026

### Резюме

**Цели.** Цель работы – разработка новых подходов к методологии стратегического планирования в электронной промышленности с учетом глобальной многовекторной трансформации экономики и ускорения технологических изменений. Настоящее исследование показывает наиболее общие рамки дальнейшего развития электронной промышленности и рост ее влияния на социально-экономическое устройство будущего общества.

**Методы.** Наряду с классическими методами исследования социально-экономических отношений сложной системы, которой является электронная промышленность, применялись системный анализ, форсайт-технологии, моделирование производственных процессов и методы стратегического планирования. Особое внимание уделялось методу множественного сравнения для оценки объяснительной способности различных моделей развития.

**Результаты.** Проведенное исследование объективно подводит к необходимости новой реструктуризации отраслей экономики и промышленности с особым статусом для электронной промышленности, т.к. ее развитие выходит за рамки экономической рациональности и приобретает цивилизационный характер. Постановка электронной промышленности в качестве локомотива всей экономики наряду с реструктуризацией подготовки кадров – это залог стратегического успеха развития нашей страны.

**Выводы.** Создание и непрерывное развитие системы стратегического планирования и управления электронной промышленностью – единственная возможность «срезать углы» в развернувшейся гонке за технологическим, а значит экономическим, военным и политическим суверенитетом. Особое стратегическое значение приобретает необходимость построения собственного макрорегиона, самодостаточного как с точки зрения производства, так и потребления электронной продукции.

**Ключевые слова:** электронная промышленность, стратегическое планирование, цифровизация, искусственный интеллект, технологическая сингулярность, производственные процессы, цифровая трансформация

**Для цитирования:** Шпак В.В. Планирование воспроизводственных процессов в электронике на стратегическую перспективу. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):131–144. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-131-144>, <https://www.elibrary.ru/TTSRRP>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

# Planning of reproduction processes in electronics for a strategic perspective

Vasily V. Shpak<sup>®</sup>

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>®</sup> Corresponding author, e-mail: morser@yandex.ru

• Submitted: 07.04.2026 • Revised: 19.04.2026 • Accepted: 27.04.2026

## Abstract

**Objectives.** The work sets out to develop new approaches to strategic planning methodology in the electronics industry that take into account the current global multi-vector economic transformation and corresponding acceleration of technological changes. The most general framework for the further development of the electronics industry is outlined along with a discussion of its likely impact on the socioeconomic structure of future society.

**Methods.** Along with classical methods for studying socioeconomic relationships pertaining to complex systems such as the electronics industry, systems analysis, foresight technologies, production process modeling, and strategic planning methods are applied. In order to evaluate the explanatory power of different development models, particular attention is given to the multiple comparison method.

**Results.** The study identifies a need for a radical restructuring of economic and industrial sectors in which the electronics industry is accorded a leading role as a result of its development transcending traditional economic rationalizations to acquire a civilizational character. The establishment of the electronics industry as the main driving force for the entire economy, along with a corresponding restructuring of personnel training, thus represents a key strategic element in Russia's continuing development.

**Conclusions.** In the ongoing race for technological (and therefore economic, military, and political) sovereignty, the creation and continuous development of a strategic planning and management system for the electronics industry acquires a strategic character. The establishment of a genuinely independent national macroeconomic region can be achieved by ensuring self-sufficiency in both the production and consumption of electronic products.

**Keywords:** electronics industry, strategic planning, digitalization, artificial intelligence (AI), technological singularity, production processes, digital transformation

**For citation:** Shpak V.V. Planning of reproduction processes in electronics for a strategic perspective. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):131–144. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-131-144>, <https://www.elibrary.ru/TTSRRP>

**Financial disclosure:** The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная рыночная экономика переживает фундаментальную трансформацию, связанную в т.ч. с изменением модели потребления и кризисом существующей финансовой системы. Эти процессы создают для развития электронной промышленности России как вызовы, так и новые возможности. Президент России Владимир Путин 22 января 2026 г. провел совещание, посвященное развитию российской электронной промышленности, в т.ч. вопросам разработки и производства электронной компонентной

базы (ЭКБ) и интегральных схем<sup>1</sup>. Президент России поручил создать межведомственную комиссию для повышения эффективности управления развитием российской электроники. Ее возглавили первый

<sup>1</sup> Совещание по развитию микроэлектроники. Владимир Путин провел совещание по развитию отечественной интегральной электроники. <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/79027>. Дата обращения 01.04.2026. [Meeting on the development of microelectronics. Vladimir Putin chaired a meeting on the development of Russian integrated electronics. <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/79027>. (In Russ.). Accessed April 01, 2026.]

вице-премьер Д. Мантуров и помощник президента А. Фурсенко. Стратегическая направленность принятых решений требует от исполнительных органов российской экономики создания эшелонированной системы планирования и эффективной системы своевременной корректировки стратегических планов в свете научно-технологических достижений, которые на практике проявляются быстрее стратегических прогнозов и форсайт-исследований.

Ключевые показатели, характеризующие текущее состояние и тенденции развития отрасли, можно свести к нескольким параметрам. Валовой объем производства продукции радиоэлектронной промышленности (РЭП) в 2025 г. достиг 3.5 трлн руб. При росте производства на 34% российская электроника отстала от конкурентов по основным технологическим характеристикам на 25–35 лет. Наиболее сдерживающим фактором развития отрасли является значительный дефицит квалифицированных кадров.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

### **Методологическая база исследования**

Современная экономика является многопараметрическим феноменом, который отличается высокой связностью структур и компонентов, включая и ее надсистему – совокупность природных факторов и цивилизационных социально-экономических отношений в широком их понимании. Экономика является надсистемой по отношению к отрасли – электронной промышленности, которая, в свою очередь, формируется из различных подсистем и подотраслей. Поэтому системный подход к стратегическому планированию и управлению воспроизводственных процессов в электронной отрасли предусматривает согласованный анализ следующих факторов: кризиса существующей финансовой системы, регионализации экономики, формирования новых экономических блоков, изменения торговых маршрутов, падения платежеспособного спроса населения, массовой миграции, борьбы за ресурсы и т.д. Необходимость и пути адаптации производства к этим объективным процессам будут проанализированы ниже.

Системный подход к исследованию сложных систем раскрывает всю совокупность ее параметров, включая взаимодействия по линии «надсистема – система – подсистемы». Основополагающей задачей стратегического планирования и управления является отслеживание состояния сложной системы в динамике и ее упреждающее реагирование на вызовы и изменения. Для этого применяется метод множественного сравнения как по целому набору характеризующих

систему параметров, так и в динамике. Его суть состоит в том, что избранные параметры управляемой системы, которые не всегда имеют строгий метрический вид, в формате вектора сопоставляются через установленные промежутки времени, например месяц, квартал или год. При таком подходе виден не только результирующий показатель, например изменение валовой выручки отрасли или динамика топологической составляющей проектируемой электроники, но и факторы, которые определили интегральное изменение. Это может быть изменение количества предприятий отрасли, структуры и физических объемов выпускаемой продукции, изменение цен и т.д. Системный анализ и метод множественного сравнения максимально эффективны при использовании технологий искусственного интеллекта и больших данных.

Стремительность изменений как материальной базы электроники, так и постоянно совершенствующихся алгоритмов ее управления обуславливает важное значение стратегического предвидения форсайт-исследований, в т.ч. освоенных и качественно новых технологических трендов.

В наиболее обобщенном виде актуальные изменения методологии стратегического планирования и управления в дополнение к отработанным методам состоят в нескольких аспектах. Цифровизация процессов управления в самом ближайшем будущем станет тотальной, что повысит точность прогнозов и расчета рисков. Специалистам-управленцам будет необходимо сконцентрироваться на решении новых эвристических задач, которые возникают в ходе совершенствования отраслевого воспроизводства. Повсеместное внедрение систем искусственного интеллекта позволит освободить управленческий персонал от выполнения рутинных операций и существенно снизить риски ошибок. Использование технологий больших данных позволит при принятии решений оперировать не выборочными интегральными показателями, а учитывать все доступные для сенсорики и киберфизических систем первичные параметры производства в реальном масштабе времени.

### **Тенденции и факторы развития электронной промышленности**

Глобальная трансформация, происходящая на наших глазах, повышает роль геостратегических факторов и затрагивает все стороны существования цивилизации. Среди наиболее значимых следует особо выделить глобальную трансформацию разделения труда, компетенций и формирование кооперации в масштабе крупных региональных технологических зон. На это все накладывается стремительное развитие цифровых технологий и их проникновение во все без исключения социально-экономические отношения.

Большинство экспертов сходятся в том, что изменения уже стартовали [1]. Современный экономический кризис носит объективный и безвозвратный характер, т.к. рыночная модель самовозрастания капитала и агрессивный финансизм достигли пределов роста в масштабах всей планеты. Это проявляется в демонтаже мировой фиатной долларовой системы. На сегодняшний день уже не существует денег с их классическими пятью функциями. Санкции лишили Россию возможности пользоваться так называемыми резервными валютами и показали другим странам их фиатный характер. Россия из-за санкций не может расплачиваться своими суверенными финансами, которые она размещала у контрагентов, диверсифицируя риски, а дружественные страны наглядно убедились в нежизнеспособности мировой финансовой системы, управляемой из одной страны. В результате активно развиваются региональные платежные системы.

Это, в свою очередь, создает объективные условия для регионализации реальной экономики. Глобальное разделение труда, которое сложилось в мировой электронике, было экономически эффективным. Однако эта система оказалась слишком хрупкой и сейчас разрушается. В мировом хозяйстве уже явно вырисовываются самодостаточные валютно-технологические зоны, т.е. мировая экономика начинает кластеризоваться на отдельные макрорегионы. В рамках каждого такого региона (или зоны) начинают концентрироваться собственные ресурсы, рынки, производства и технологии. Этот процесс сопровождается практикой жестких мораториев на экспорт высокотехнологичных решений за пределы своих зон. Уже сейчас можно констатировать, что глобальное международное сотрудничество в сфере высоких технологий, в т.ч. в сфере электроники, фактически невозможно. Единственный выход – рассчитывать на собственную силу и кооперацию в рамках своей страны и надежных региональных партнеров.

Стратегической целью России и ее партнеров является создание макрорегиона на основе имеющихся природных ресурсов, научной школы, творческого и промышленного потенциала – макрорегиона, максимально обеспеченного воспроизводственными ресурсами и имеющего население, способное производить и потреблять свою продукцию. Западный подход к региональной трансформации в настоящее время осуществляется в агрессивной, силовой манере. Здесь и претензии на ресурсы и рынки Латинской Америки, Мексики, Канады, Гренландии, Ближнего Востока, и попытки установления абсолютной военно-монополистической диктатуры в мире.

Воспроизводственный контур нашей зоны формируется на принципиально иной основе. Это признание объективной взаимозависимости экономик

различных стран и поиск путей интеграции на принципах взаимной выгоды, включая стратегическую предсказуемость и безопасность. Шанхайская организация сотрудничества, БРИКС<sup>2</sup> демонстрируют гармонию отношений стран – членов этих международных объединений, формируют новый ландшафт отношений, создавая предпосылки возникновения собственных макрорегионов (валютно-технологических зон) ведущими странами (Россия, Индия и Китай).

Форматы взаимовыгодного сотрудничества нацелены на сглаживание негативных социально-экономических изменений, таких как глобальное падение спроса, объективное сворачивание модели массового производства, нарастающий дефицит всех видов ресурсов, включая даже питьевую воду, а также тотальное загрязнение окружающей среды. Рыночная система воспроизводства, ориентированная на массовое потребление, короткий жизненный цикл потребительских товаров и гонку за демонстративными фетишами, находится в завершающей стадии своего существования. На будущих обломках ее гигантской глобалистской модели рождаются новый мир и новая экономика.

С учетом этих и других макроэкономических и геостратегических факторов, включая миграционные процессы, происходит переоценка направлений и глубины технологических трендов. Информационно-коммуникационные технологии в целом и микроэлектроника в частности уже превратились в необходимое условие для создания суверенной собственной макроэкономической зоны. Однако негативное воздействие искусственных геостратегических факторов на рынки новых научно-технологических направлений, таких как нейросети, новые технологии связи, беспилотные транспортные системы, также сдерживает их развитие по сравнению с темпами, которые прогнозировали эксперты [2, 3].

В первую очередь это связано с тем, что новые подходы к моделированию воспроизводственных процессов пока не раскрылись в полную силу. После столетий конкуренции производителям трудно перестроиться на кооперацию как экономически, так и психологически. Конкуренция всегда вела к значительному перерасходу ресурсов и означала, что победитель забирает все. Кооперация в совокупности с планированием и координацией, построенная на природоподобном свойстве интеграции различных акторов для получения синергетического результата, обеспечивает надежную и эффективную

<sup>2</sup> BRICS – сокращение от Brazil, Russia, India, China, South Africa – неформальное объединение стран с динамично развивающейся экономикой. [BRICS – an acronym for Brazil, Russia, India, China, and South Africa – is an informal group of countries with rapidly growing economies.]

отраслевую связность. Аналогично частная автономность производителей все более уступает место прозрачности и прослеживаемости жизненного цикла электронных устройств от проектирования и производства до их реализации, утилизации и последующей переработки. Этому будет способствовать принятое в России решение об обязательной маркировке всей российской электронной продукции, что позволит увидеть все в режиме реального времени<sup>3</sup>.

Экстенсивный этап развития рыночной экономики столкнулся с пределами, о которых еще в прошлом веке предупреждали эксперты Римского клуба<sup>4</sup> [4]. Переход к новой интенсивной экономической модели экономики страны является первостепенным приоритетом при формулировании стратегических целей электронной промышленности и экономики в целом. Объективные процессы интенсификации производства в новых реалиях включают по крайней мере несколько факторов.

Происходит неотвратимое изменение производственных парадигм. Уже появились первые признаки перехода от крупносерийного поточного производства ЭКБ и электроники, ориентированных на массового потребителя и быстрое обновление у потребителей электронных устройств, к гибким, имеющим потенциал перенастройки автоматизированным комплексам и долговечным приборам, построенным на принципах платформенно-модульной архитектуры.

Мировая экономика находится в начале очередного глобального цикла зарождения и развития качественно новой модели общества и экономики. Смена технологических укладов была подробно описана советским ученым Н.Д. Кондратьевым в его трудах [5]. Новый посткапиталистический уклад должен внести в воспроизводственный процесс ряд фундаментальных изменений. Для начала индустриальные технологии массового производства будут вытесняться природоподобными технологиями, улучшая качество жизни людей, включая производство качественной продукции, долго сохраняющей свои потребительские свойства, обеспечивая тем самым рациональное и эффективное использование ресурсов, заботу о природе [6].

<sup>3</sup> О подтверждении производства российской промышленной продукции. Постановление Правительства Российской Федерации от 17 июля 2015 г. № 719. <http://government.ru/docs/all/102816/>. Дата обращения 01.04.2026. [On Confirmation of Production of Russian Industrial Products. Resolution of the Government of the Russian Federation of July 17, 2015, No. 719. <http://government.ru/docs/all/102816/>. (In Russ.). Accessed April 01, 2026.]

<sup>4</sup> Римский клуб – международная общественная организация, объединяющая представителей мировой политической, финансовой, культурной и научной элиты. [The Club of Rome is an international public organization uniting representatives of the world's political, financial, cultural, and scientific elite.]

Стратегический тренд на стандартизацию продукции и технологий на принципах открытых архитектур должен превратиться в обязанность органов управления. Это позволит повысить суверенитет нашего будущего макрорегиона, укрепит кооперационные связи, существенно снизит издержки всего жизненного цикла создаваемой продукции.

Уже сейчас ясно, что революция ожидается и в совершенствовании технологических процессов. Если сейчас от выращивания кристалла до готового изделия электроники необходимо осуществить сотни операций, то переход к выращиванию в рамках различных аддитивных процессов готовых электронных модулей, 3D-печать блоков и узлов уже отрабатываются в ходе научно-исследовательских работ компаниями-лидерами и ведущими мировыми научными центрами.

Электроника является основой цифровых технологий, которые, в свою очередь, влияют на все воспроизводственные этапы отрасли – от стратегического планирования до проектирования конкретных изделий. Развитие цифровых технологий можно рассматривать в качестве внутреннего имманентного акселератора совершенствования электронной промышленности и электронной продукции.

Интегральным параметром перечисленных и других объективных социально-экономических процессов является трансформация потребительского поведения. Экономический кризис усиливается негативными социальными сдвигами, включая иммиграцию, которые во многих странах стали уже неуправляемыми и в перспективе фатальными. Это и массовое падение благосостояния так называемого среднего класса и человеческой популяции в целом. Падает платежеспособность – производители должны переходить к более мобильным технологиям, способным уменьшать масштаб производства в соответствии с реальным платежеспособным спросом. Массовая иммиграция, яростная борьба за ресурсы создают условия социальной угнетенности и апатии, что бумерангом бьет по экономике.

Ускоренно нарастает значение репутационных активов производителей электроники. С учетом глобальности мировой торговли рациональный выбор потребителя по критерию «цена – качество» дополняется не менее важным критерием доверия к качеству, долговечности и эффективности конкурирующих брендов или даже шире – технологических платформ. От выбора человека, его доверия в конечном счете будет зависеть успех производителей в стратегической перспективе. Сейчас активно развивается конкуренция нескольких международных технологических платформ, за которыми стоят государства, формирующие суверенные технологические зоны. Все они должны будут стать самодостаточными по всему циклу, от производства материалов, химии и средств

проектирования и производства до цифровых интеллектуальных технологий сбора, обработки, передачи, хранения и аналитической обработки информации. Это те задачи, которые решаются исключительно с помощью продукции электронной промышленности.

Санкции, локальные военные конфликты и искусственно созданные напряженности в различных регионах мира обрушили логистические цепочки, что приводит в ступор как производство, так и потребление. Это большая самостоятельная тема, которая требует отдельного рассмотрения. Здесь она лишь обозначена для системного понимания современных мировых тенденций.

Заявление Президента России Владимира Путина журналистам газеты Financial Times в 2019 г.<sup>5</sup> о том, что либеральная идея пережила свою цель и исчерпала себя, оказалось пророческим, и мировой политический кризис дополнил экономический и социальный кризисы. Теперь уже ясно, что экономический, социальный и политический мир уже никогда не будет прежним. Это важнейший стратегический фактор для планирования в нашей стране.

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Представленный анализ обуславливает новые подходы к технологическим аспектам производства. В первую очередь это проявляется следующим образом. Несмотря на стремительные темпы технологического развития, структура мирового потребления микросхем в натуральном выражении за последние 5 лет практически не изменилась. Доля традиционных решений на уровне 350 нм и более до сих пор составляет порядка 50%. Передовой уровень (ниже 28 нм) сейчас занимает порядка 16% рынка, и эта доля не меняется с 2019 г. К 2030 г. прогнозируется ее увеличение только до 17%. На текущий момент и в ближайшие годы большинство практических задач как решались, так и будут удовлетворяться на топологических нормах 350 нм и более. А это, в свою очередь, повлияет на структуру и качество производительных сил отрасли.

Показательным является увеличение средней длительности цикла производства микросхемы. До 2020 г. средний цикл составлял порядка 30 дней. Но как только человечество решило шагнуть за топологии ниже 7 нм, цикл начал растягиваться и в 2025 г. достиг 69 дней. Это говорит не только о сложности передовых технологий, но и, прежде всего, об их нестабильности.

<sup>5</sup> <http://www.kremlin.ru/events/president/news/60836>. Дата обращения 01.04.2026. / Accessed April 01, 2026.

Есть мнение некоторых экспертов, что минималистические фабрики (minimal fab), концепцию которых разработал Широ Хара [7], позволяют конкурировать с гигантами электроники в т.ч. благодаря уменьшению размера пластин – основы ЭКБ. Ожидается, что они будут набирать вес и конкурентоспособность. Это обусловлено тем, что стоимость современных кремниевых фабрик-гигантов, которые ориентируются на увеличение диаметра пластин и снижение проектных топологических норм, достигает десятков млрд долл. и продолжает расти. По мере миниатюризации продукции растет также стоимость фотошаблонов и оборудования для литографической обработки пластин. Стоимость разработки техпроцессов для новых субмикронных технологий также растет ускоренными темпами. Новому суперзаводу необходимо еженедельно продавать пластины почти на 20 млн долл. в течение 10 лет, чтобы обеспечить окупаемость инвестиций. А по оценкам аналитиков PricewaterhouseCoopers<sup>6</sup> средняя стоимость чипа, созданного на технологиях 3 нм, в 8 раз больше 45-нм чипа.

Российский рынок изделий электронной техники, особенно в условиях санкций, пока не позволяет рассчитывать на мировой рынок сбыта. Для российской РЭП перспективным решением может стать создание недорогих и маневренных производственных линий обработки пластин диаметрами 100, 150 и 200 мм. Снижение диаметра пластин приведет к снижению производительности фабрик и повышению стоимости обработки единицы площади пластины. Однако такие решения становятся весьма конкурентоспособными для средне- и мелкосерийного производства, которое сейчас не вписывается в концепцию суперфабрик, т.к. стоимость самой линии значительно уменьшается.

Для такого производства требуется оборудование, которое формируется по модульному принципу, может работать в одну или две смены, а не непрерывно, что обеспечивает серьезную инвестиционную и операционную экономию. Сейчас получается, что время полезной работы передовых литографических систем голландской компании ASML<sup>7</sup> составляет порядка 50–60%, остальное время – это сервисные и восстановительные работы – фактически простой. Стоимость таких машин составляет

<sup>6</sup> Международная сеть аудиторских и консалтинговых фирм. <https://www.pwc.com/gx/en.html>. Дата обращения 01.04.2026. [International network of audit and consulting firms. <https://www.pwc.com/gx/en.html>. Accessed April 01, 2026.]

<sup>7</sup> Производитель литографического оборудования для микроэлектронной промышленности. <https://www.asml.com/en>. Дата обращения 01.04.2026. [Manufacturer of lithographic equipment for the microelectronics industry. <https://www.asml.com/en>. Accessed April 01, 2026.]

около 300–400 млн долл., что существенно влияет на себестоимость продукции.

Концепция минифабрик существенно снижает порог входа в индустрию всем желающим, что дает возможность рассматривать такое решение как потенциально экспортно востребованное. В технологический цикл производства пластин достаточно просто интегрируется оборудование для сборки интегральных микросхем и полупроводниковых приборов в различные типы корпусов. В результате формируются высокоэффективные и переналаживаемые гибкие производственные комплексы, включающие трек для нанесения и проявления фоторезистов, соответствующую контрольно-измерительную аппаратуру, а также линейку фоторезистов, проявителей, антиотражающих покрытий. Таким образом, реализуется завершённый цикл – от пластины до корпусированного прибора. Соответственно, материалы и химия, а также средства проектирования и иное необходимое промышленное программное обеспечение должны идти в комплекте, формируя пакетное предложение по созданию такого производства вместе с типовыми проектными и инженерными решениями.

Параллельно с этим сами электронные устройства приобретают платформенно-модульную архитектуру, что усиливает конкурентоспособность таких фабрик. В рамках эволюции таких аппаратурных решений их загрузка становится постоянно прогнозируемой.

Начиная с 2021 г. в число приоритетов вошли вопросы электронного машиностроения. Это основа производительных сил электронной промышленности России. В 2024 г. успешно завершились испытания первой установки проекционной литографии на 350 нм, которая была создана в партнерстве с белорусским «Планаром»<sup>8</sup>. Уже заключены 2 контракта на серийные поставки этих машин. До конца нынешнего года должно быть готово следующее поколение литографов на топологии 130 нм, причем в устройстве будет использован российский эксимерный лазер. В этом году планируется разработка литографа на 90 нм. В 2025 г. были завершены разработки кластерных машин плазмохимического травления и осаждения, которые могут работать с пластинами диаметром 300 мм. Стратегия в отрасли может быть кратко сформулирована в виде формулы «технология – оборудование – химия – материал». Это основа суверенитета РЭП.

<sup>8</sup> Разработчик специализированного технологического оборудования для реализации технологий в микроэлектронике. <https://planar.by/>. Дата обращения 01.04.2026. [A developer of specialized technological equipment for the implementation of technologies in microelectronics. <https://planar.by/>. (In Russ.). Accessed April 01, 2026.]

Отдельное внимание уделяется переработке отслужившей свой срок продукции. Развитие технологий возобновления, вторичного использования ресурсов обладает существенной перспективой. Например, стоимость извлекаемых из электронного лома ценных материалов может составлять до 350 млрд руб. в год. Преимущество у такой формы организации электронного производства существенно больше, и необходимо все их рассматривать с точки зрения стратегического планирования. Разворачивающаяся поэтапно цифровизация всех воспроизводственных и управленческих процессов вступила в фазу промышленной эксплуатации искусственного интеллекта и создания умных переналаживаемых производственных систем.

Перечисленные и другие технологические проорывы дополняются весьма значимыми организационными феноменами.

Искусственный интеллект [8] пока является лишь новой, более совершенной формой алгоритмической обработки накопленных человечеством знаний. Но перспективы его применения в производственных процессах трудно представить в полном объеме. Он может стать всеобъемлющим навигатором, освобождающим специалистов от переработки уже известных фактов и решений и раскрывающим простор для креативной творческой деятельности людей. Яркий аналог из истории – это луддитское движение против применения машин. В результате не машины «подмяли» рабочих, а рабочие стали использовать машины для целей роста своего благосостояния. Сейчас складывается аналогичная ситуация с роботизацией. Введение в классическую структуру «машины», против которой были луддиты, состоящую из «двигателя», «передаточного устройства» и «рабочего органа», четвертого элемента – «управляющего устройства» – также многих пугает сокращением рабочих мест. Однако уже сейчас ясно, что роботизация воспроизводственных процессов в реальном секторе производства позволит высвободить «человеческий капитал» для решения творческих, креативных задач развития человечества в шестом технологическом укладе [9] или в Индустрии 4.0 [10].

Сейчас уже сложилось четкое понимание различия искусственного и естественного, человеческого интеллекта. Искусственный интеллект получил прилагательное «искусственный», т.к. он сейчас и, по всей вероятности, в будущем будет с высоким качеством обрабатывать массивы накопленной человечеством информации. Естественный интеллект человека также до сих пор вынужден был заниматься этой рутинной работой и стремился получать синергетический результат из имеющихся знаний. Однако в сфере индукции естественные человеческие способности уже бесконечно проигрывают компьютерным

алгоритмам. Наряду с индукцией существующих знаний отдельные ученые время от времени проникали в сферы принципиально новых и неизведанных ранее знаний, дедуктивно осозная предмет исследования в целостности и многообразии. Они их формулировали на привычном языке формул и трехмерных моделей и становились в ряд гениев. Началось все с основателя науки Г. Тризмегиста [11], к которому присоединились Аристотель, Платон, Кеплер, Эйнштейн, Менделеев и многие другие. На этом примере четко видно разделение функций между искусственным и естественным интеллектом.

Таким образом, можно сформулировать *стратегическую цель развития электроники – всемерное развитие вычислительных и аналитических компьютерных программ искусственного интеллекта для расширения простора творческой деятельности людей при сохранении абсолютного контроля над создаваемыми алгоритмами* [12]. Данный технологический тренд приведет к качественно новому уровню автоматизации полного цикла воспроизводственных процессов, оптимизации кооперационных связей внутри отрасли и между смежными отраслями. Общая эффективность производства будет возрастать благодаря многопараметрическому прогнозированию как технологического развития, так и рынка конечной продукции РЭП. Современные цифровые технологии и практика маркировки продукции приведут к скачку качества электронной продукции. Будущие «интеллектуальные» самовоспроизводящиеся системы приведут к трансформации не только производственных, но и всей совокупности социально-экономических отношений.

### **СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ОТРАСЛЮ СЕГОДНЯШНЕГО ДНЯ**

Методологические проблемы решения стратегических задач технологического развития РЭП подробно изложены в специальной монографии [12]. На практике же предстоит гигантская работа, целью которой является преобразование системы отраслевого управления в систему, которую обобщенно можно назвать «Цифровые двойники предприятий и организаций электронной и радиоэлектронной промышленности на платформе цифрового двойника РЭП».

Современные цифровые информационные и аналитические системы работают как сетевые с распределенным протоколом хранения информации. Такая структура информационного обмена доказала свою современность и эффективность. Конечной целью развития системы сбора, хранения и обработки информации для нужд органов государственного управления должно стать поэтапное создание цифровых двойников предприятий

и организаций реального сектора экономики и цифровых двойников сложной продукции на платформе цифрового двойника отрасли. В такой системе все повторяющиеся информационные процессы будут автоматизированы в рамках протокола M2M (machine-to-machine), т.е. межмашинного общения.

Сразу следует оговориться, что перевод управления на технологии цифровых двойников несколько не умаляет значения высококвалифицированных управленцев. Аппаратно-программный комплекс «Цифровые двойники», безусловно, высвободит значительный объем времени, которое сейчас приходится управленцам тратить на выполнение рутинных операций от сбора первичной информации до ее верификации и структуризации с целью выработки управленческих решений. Этого времени современным управленцам катастрофически не хватает для осуществления комплексной всеобъемлющей оптимизации отраслевого воспроизводства и формирования динамических планов решения стратегических задач отрасли, таких как ликвидация технологического отставания российского производства, эффективное импортозамещение, своевременное внедрение результатов прикладных исследований и разработок и т.д. В этом направлении работы не просматривается ни доминирования искусственного интеллекта, ни опасности технологической сингулярности. Без участия высококвалифицированных управленцев система управления на мезоуровне [13] будет нежизнеспособной.

В основе управленческой пирамиды будут располагаться цифровые двойники предприятий и организаций отрасли. Как люди-управленцы, так и цифровые двойники будут оперировать массивами производственно-хозяйственной и финансово-экономической информации о воспроизводстве в электронной отрасли. Причем, если сравнивать массивы информации, доступные для обработки даже самыми квалифицированными управленцами, с массивами информации, которыми может оперировать цифровой двойник, то метрически это бесконечная несопоставимость. И разрыв будет лавинообразно нарастать, но это не страшно, а весьма полезно для лиц, принимающих управленческие решения, т.к. они все больше будут освобождаться от рутинных.

Раньше объектом стратегического планирования было народное хозяйство страны. Воспроизводственный цикл рассчитывался в двух основных укрупненных форматах: отраслевом и территориальном. Это позволяло без вычислительных мощностей получать два плановых вектора показателей экономики, сравнение которых обеспечивало верификацию или уточнение использованных методов. Проводились неоднократные итерационные пересчеты, которые в конце концов давали приемлемый и правдоподобный вариант

стратегической цели в конкретных показателях. Это была вынужденная методология, связанная с отсутствием современных цифровых инструментов. В настоящее время объектом стратегического планирования можно избрать значительно больший круг воспроизводственных отношений. В самом общем виде такой объект можно назвать «Экосистема электронной и радиоэлектронной промышленности».

Экосистему РЭП можно представить как сложную сеть программно-взаимосвязанных и оцифрованных участников (акторов), процессов, технологий и инфраструктуры, которые взаимодействуют для создания, производства и распространения электронной продукции, включая ЭКБ и РЭП. Экосистема включает в себя компании, научные организации, государственные институты, поставщиков, потребителей и другие заинтересованные стороны.

Цифровой двойник отрасли промышленности, в данном случае РЭП, – это компьютерная модель, которая позволяет планировать, моделировать и оптимизировать работу предприятий отрасли и их взаимодействие, включая технологическую конкуренцию и производственно-хозяйственную кооперацию, а также обеспечивает динамическое формирование новых цепочек поставок для исполнения сложных заказов [14, 15]. В компьютерном плане – это платформа, которая формируется на мощном аппаратно-программном комплексе, на который «навешиваются» цифровые двойники объектов управления.

Цифровой двойник объекта управления – это киберфизическая система, которая расширена компьютерной моделью управляемого объекта, отражающая его состояние в любой выбранный момент времени и синхронизированная с фактическим состоянием физического объекта. Цифровой двойник объекта управления может быть использован для опережающего планирования и прогнозирования поведения объекта в будущем, а также моделирования поведения объекта при любых событиях. Типы цифровых двойников объектов управления быстро проходят эволюцию от «цифровых теней» реального объекта статистического наблюдения до формирования «когнитивных цифровых двойников» предприятий и организаций РЭП, построенных на основе технологий больших данных, искусственного интеллекта.

Цифровой двойник предприятия – это онтологический двойник реального предприятия или организации, основанный на онтологической базе знаний.

Реальные предприятия электроники и их цифровые двойники связаны в технологические воспроизводственные цепочки, в начале которых стоят исходные материалы, а в конце – конечная продукция. В цифровом варианте такие цепочки должны быть представлены в виде «продуктовых графов». Это кибернетический объект, который в цифровом виде отображает отношения между

компонентами продукции, расположенными в вершинах графа (объектов), через ребра (производственно-хозяйственные связи). Введение тотальной маркировки электронной продукции<sup>9</sup> в совокупности с построением продуктовых графов позволит не только контролировать качество конечной продукции, но и моментально фиксировать виновников брака. Такой подход позволит в оперативном режиме встраивать внутри продуктовых графов частичные результаты законченных научно-исследовательских и опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКТР), что многократно ускорит технологическое развитие отрасли и гарантирует качество продукции РЭП.

Таким образом, цифровая система подготовки принятия отраслевых управленческих решений может быть обобщенно названа цифровой моделью РЭП, которая включает три взаимосвязанных модуля: информационно-справочную систему, блок аналитического имитационного моделирования и цифровой «интеллектуальный» голосовой интерфейс. По мере развития такой системы осуществляются интенсивный и экстенсивный процессы ее совершенствования.

Сейчас такая модель обобщенно называется киберфизической системой. Это компьютерная система, в которой интегрируются средства для получения первичных данных из баз данных, с датчиков и сенсоров; вычислительные средства для выполнения компьютерных расчетов, передачи и обработки данных и управления физическими процессами с помощью исполнительных механизмов; средства коммуникации с пользователями и лицами, принимающими решения.

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Стратегическое планирование такой специфической отрасли, как РЭП, имеет еще один важный аспект. Российская промышленность является предельно сложной системой воспроизводства, а традиционные ручные методы управления ею не дают синергетического роста эффективности и снижения сложности кругооборота управленческой

<sup>9</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 28 ноября 2025 г. № 1954 «Об утверждении Правил маркировки отдельных видов радиоэлектронной продукции средствами идентификации и особенностях внедрения государственной информационной системы мониторинга за оборотом товаров, подлежащих обязательной маркировке средствами идентификации, в отношении отдельных видов радиоэлектронной продукции». <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202511290036>. Дата обращения 01.04.2026. [Resolution of the Government of the Russian Federation of November 28, 2025 No. 1954 “On approval of the Rules for marking certain types of radio-electronic products with identification means and the specifics of the implementation of the state information system for monitoring the circulation of goods subject to mandatory marking with identification means, in relation to certain types of radio-electronic products.” <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202511290036>. (In Russ.). Accessed April 01, 2026.]

информации. Поэтому объективно накопились количественные изменения, которые необходимо трансформировать в качественный скачок в системе мезо- и макроэкономического управления [16].

В сложной системе российской экономики выделены отдельные отрасли, имеющие сквозной функциональный характер для всей экономики (транспорт, связь, финансы...). Радиоэлектронная промышленность имеет аналогичный функционал, но она встроена в конгломерат, именуемый «промышленность и торговля».

Макроэкономическая роль электроники по сравнению с 1990-ми гг., когда она была объединена в самостоятельное министерство, неизмеримо возросла. В стратегической перспективе электроника станет доминирующим фактором во всех сферах государства. Эти тенденции говорят о необходимости выделения РЭП в самостоятельную отрасль, как это было сделано в 1960-е гг. в экономике Советского Союза. Тогда данная организационная мера в совокупности с разработкой и утверждением Генеральной схемы развития и размещения производительных сил на стратегическую перспективу позволила экономике страны достичь в электронике паритета с мировыми лидерами [17]. Данный опыт не следует сбрасывать со счетов.

Отраслевое самоопределение электронной промышленности позволит в рамках технологии больших данных сформировать динамически обновляемые классификаторы, начиная от закрытого перечня предприятий и организаций РЭП, а также классификаторы оборудования, кадрового обеспечения, продукции как в подотраслевом разрезе, так и с пониманием локализации ее производства благодаря разворачиваемой сейчас системе маркировки продукции.

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОВ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

### **Система сбора и обработки данных**

Внедрению столь масштабной системы управления должна предшествовать полномасштабная инвентаризация предприятий и организаций отрасли [18]. По мере создания в отрасли достоверной базы данных и базы знаний должен быть создан и «допущен» к обучению цифровой двойник РЭП. В ходе освоения руководителями предприятий РЭП цифровых технологий в управлении к этой платформе будут подключаться предприятия и организации РЭП всех форм собственности и организационно-правовых форм. Синергетический эффект от таких организационных преобразований будет получен уже на этапе создания системы, включающей 50–100 крупнейших предприятий отрасли,

и продолжит нарастать по мере управленческо-информационной интеграции предприятий РЭП.

В существующих нормативных документах, определяющих фундамент управления экономикой, понятие «информация», которая является отправной точкой любого управленческого решения, используется слишком общо, без строгой топологии (формата каждого показателя) и метрики (атрибутов, отражающих объем или динамику процессов, характеризующих конкретным показателем). Поэтому необходимо уточнить, что информация для целей моделирования процессов принятия решений в отрасли должна быть *достоверной, сравнимой и сопоставимой*, а методология получения сведений от первичного источника должна быть единой для всех агрегируемых показателей [19]. Без выполнения этих базовых обязательных условий агрегирование показателей предприятий и организаций в обобщающие отраслевые показатели с научной точки зрения является неадекватным и содержит системные ошибки, мультипликация которых делает информацию, агрегированную из нескольких несравнимых и несопоставимых показателей, недостоверной.

Не вдаваясь в тонкости науки статистики, выделим лишь самые общие, но абсолютно неустраняемые требования к собираемой производственно-хозяйственной и финансово информации. Первичной является информация, полученная непосредственно от объекта статистического наблюдения. Раньше ее собирали соответствующие службы предприятий и первичные статистические управления по всей стране. Теперь возможна автоматизация сбора любой производственно-хозяйственной и финансово-экономической первичной информации с помощью так называемых киберфизических агентов.

*Достоверной* может быть такая и только такая агрегированная информация, истинность которой можно проверить на основе развертывания первичных данных, полученных непосредственно от объекта статистического наблюдения. Для нужд отраслевого управления первичная информация агрегируется в форматы обобщающих показателей, но «родовой след» каждого из обобщаемых показателей всегда можно проследить до уровня предприятия или организации. Агрегированный отраслевой показатель до последней запятой должен быть равен сумме аналогичных показателей предприятий и организаций отрасли. Если возникло отклонение, то требуется специальное рассмотрение причин несоответствия. Такое возможно. Поэтому показатель именуется агрегированным, а не суммарным. Однако факт отклонения и его причины должны получить строгую статистическую оценку и при необходимости корректироваться.

*Сравнимой* может считаться такая агрегированная информация, которая была получена на основе единой методологии сбора и обработки первичных

данных. Категорически нельзя агрегировать, например, показатели, полученные непосредственно прямым статистическим наблюдением, и показатели, полученные тем или иным аналитическим способом или методом случайного опроса. Это порождает систематические ошибки в статистике, недопустимые при выработке управленческих решений в целом и стратегических решений в особенности.

*Сравнимость* информации характеризует имманентные свойства – «качество» самой информации, тогда как сопоставимость агрегированной информации показывает допустимость и корректность сопоставления аналогичных по названию показателей в динамическом ряду. Это необходимо для распознавания экстенсивных и интенсивных факторов, влияющих на агрегируемые показатели. Например, из года в год меняется число предприятий электроники, и изменяется результативность работы каждого из них. Поэтому необходимо выделять части изменения показателя (роста или уменьшения), связанные с изменением числа объектов статистического наблюдения и с фактором улучшения или ухудшения работы предприятий. Кроме того, все агрегируемые показатели должны фиксироваться на одну и ту же дату получения первичной информации и учитываться за сопоставимый период учета. Это только самые общие неустраняемые требования к управленческой информации. Более тонкие статистические настройки требуют более тщательного анализа первичных показателей.

Статистическое наблюдение имеет и много других важных ограничителей и критериев, которые оставим для специалистов. Здесь лишь обозначим проблему, что для планирования, особенно на стратегическую глубину, показатели, да и в целом вся информация, используемая в имитационной модели, должна быть максимально адекватной фактическому состоянию каждого предприятия и отрасли в целом, как в метрическом, так и в динамическом аспектах.

### **База знаний и онтологии**

Способность современных алгоритмов (так называемые большие языковые модели) распознавать и обрабатывать не только цифры, но и тексты, опирается на научный метод информационной онтологии. Это методология онтологического описания качественных параметров явлений, процессов или структур, например оборудования, предприятий и организаций РЭП, с акцентом на основные свойства в формате «акторов», «коллекций», «структуры» и «атрибутов», которые используются в дальнейшем моделировании [20].

### **Агенты мультиагентной модели**

Цифровые технологии позволяют учитывать постоянно возрастающее число факторов, параметров, внешних возмущающих воздействий и т.д., интегрируя

их в модель стратегического планирования путем подключения все большего числа модулей (агентов). Агент (модуль) – это автономное программное обеспечение, способное в рамках закрепленных за ним функций анализировать собираемую информацию, оптимизировать решения, взаимодействовать и вести переговоры с другими агентами (М2М), информировать лиц, принимающих решения, о результатах своих действий, выдавать рекомендации и учитывать обратную связь со всеми живыми и автоматизированными контрагентами. Агент способен не только выполнять однажды запрограммированные задания, но и постоянно обучаться. Цифровые технологии позволяют автоматизировать полный цикл рутинных и повторяющихся факторов и в порядке комбинаторики рассчитать множество возможных итоговых значений.

### **Инструменты визуализации**

Обладая практически всей метрической и онтологической информацией о воспроизводственном процессе в отрасли, управляющая подсистема может формировать наглядные графики, которые также будут использоваться в процедурах стратегического управления РЭП.

### **ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

В результате поэтапного внедрения цифрового двойника РЭП ожидаются следующие результаты:

1. Обеспечение безопасности системы благодаря эшелонированной подсистеме авторизации пользователей.
2. Создание цифровой отраслевой корпоративной площадки для взаимодействия всех авторизованных участников воспроизводства в электронике, которую можно обобщенно назвать «Государственная информационная система промышленности (электроника)» – ГИСПЭ.
3. Создание динамически поддерживаемого цифрового классификатора предприятий РЭП, актуальность которого будет непрерывно поддерживаться «интеллектуальным» агентом.
4. Создание цифрового классификатора продукции РЭП в разрезе основных подотраслей и увязка его с механизмом маркировки продукции и ее компонент.
5. Создание классификатора технологий РЭП, который в онлайн-режиме будет показывать относительные технологические уровни российских и иностранных производителей и их динамику.
6. Создание динамически поддерживаемого классификатора персонала РЭП, увязанного цифровыми алгоритмами с существующими системами подготовки и повышения квалификации кадров, а также с персональными карьерограммами.

7. Создание достоверной исчерпывающей статистической базы по РЭП с инструментом ее «интеллектуальной» верификации, обработки и визуализации.
8. Введение в эксплуатацию цифрового «интеллектуального» агента, который будет верифицировать все сведения в системе в онлайн-режиме 24/7.
9. Аналитический блок в формате модели цифрового двойника РЭП будет рассчитывать все варианты последствий управленческих и технологических решений и предлагать несколько сценариев стратегических действий для оптимизации конечного результата.
10. Модель цифрового двойника РЭП будет непрерывно фиксировать баланс/дисбаланс не только в целом по отрасли, но и в разрезе отдельных номенклатурных позиций производства благодаря оцифрованным продуктовым графам.
11. Продуктовые графы позволят не только поддерживать в актуальном конкурентоспособном состоянии показатель себестоимости продукции РЭП благодаря строгой увязке натуральных пропорций производства, но и проводить в онлайн-режиме функционально-стоимостной анализ «цена – качество», что снизит нагрузку на бюджет.
12. Модель цифрового двойника РЭП, развернутая до мощности генеральной схемы развития и размещения производительных сил, обеспечит эшелонированную связку НИОКР и производства на 10–15 лет.
13. Все отраслевые агрегированные показатели будут программно связаны с фактическими первичными показателями предприятий и организаций РЭП, что позволит адресно выявлять виновников сбоев воспроизводства и устранять причины.
14. Всеобъемлющим обобщающим показателем эффективности воспроизводственного цикла электронной продукции будет не только производство, но и учет всей социально значимой цепочки «разработка изделия – ресурсно-материальное обеспечение его воспроизводства – производство изделий, максимально соответствующих требованиям потребителей – эксплуатационное и ремонтное обеспечение – безопасная для природы утилизация».

## ВЫВОДЫ

Разработанная в России в концептуальном варианте представленная модель стратегического планирования и управления позволит после ее внедрения в упреждающем варианте реагировать на возникающие риски и вызовы развития отрасли, преодолеть технологическое отставание российской электроники, дефицит высококвалифицированных кадров, уйти от зависимости импорта критической электроники в условиях санкционной агрессии.

Генеральная схема развития и размещения производительных сил РЭП даст возможность проведения эффективных НИОКР и развития собственных технологий в интеграции с подготовкой квалифицированных кадров, ориентированных на новый технологический уровень, создаст условия для формирования, развития и укрепления макроэкономического региона из дружественных стран, будет способствовать возникновению альтернативных производственных и поставочных цепочек, что увеличит массовость и эффективность производства.

Такая модель цифровизации отрасли будет иметь перспективу масштабирования для целей управления всей экономики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шваб К., Маллере Т. *Covid-19: Великая перезагрузка*. Форум; 2020, 262 с.
2. Виндж В. *Сингулярность*: пер. с англ. М.: АСТ; 2019, 224 с. ISBN 978-5-17-114349-7
3. Курцвейл Р. *Революция разума: на подступах к Сингулярности. Как технологии изменят общество и сознание*. М.: Эксмо, БОМБОРА; 2025, 661 с. ISBN 978-5-04-228765-7
4. Печчи А. Вызов 70-х годов современному миру. Тема для дискуссии. В сб.: *Римский клуб. История создания, избранные доклады и выступления, официальные материалы*; под ред. Д.М. Гвишиани. М.: УРСС; 1997, 384 с. ISBN 5-88417-100-5
5. Кондратьев Н.Д. *Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения*: Междунар. фонд Н.Д. Кондратьева и др. М.: Экономика; 2002, 550 с. ISBN 5-282-02181-1
6. Ковальчук М.В. *Идеология природоподобных технологий*. М.: Физматлит; 2021, 329 с. ISBN 978-5-9221-1931-3
7. Hara Sh. *Minimal FAB. Fab System Research Consortium*. AIST, Japan. 2010.
8. Маленков Ю.А., Давыдова А.Э. Возможности применения цифровых технологий в стратегическом планировании и прогнозировании устойчивого развития организаций. *Молодой ученый*. 2021;14(356):84–89. <https://elibrary.ru/zrjnia>
9. Глазьев С.Ю. Новые подходы к организации предприятий в условиях смены технологического и мирохозяйственного укладов. В сб.: *Стратегическое планирование и развитие предприятий*: пленарные доклады Двадцатого Всероссийского симпозиума; под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. М.: ЦЭМИ РАН; 2019. С. 7–18.

10. Шпак В.В. *Развитие электронной промышленности в условиях меняющегося мира*. М.: Техносфера; 2024, 128 с. ISBN 978-5-94836-708-8
11. Дясин Г.Г. *Азбука Гермеса Трисмегиста или молекулярная тайнопись мышления*. М.: Белые альвы; 2002, 141 с. ISBN 5-7619-0126-9
12. Шпак В.В. Стратегическое планирование в современных условиях. В сб.: *Государственное управление в новых геополитических и геоэкономических условиях*: Материалы XIX международной конференции. МГУ, 5–9 декабря 2022 г. М.: КДУ, Добросвет; 2023. С. 130–136. <https://elibrary.ru/lehfav>
13. *Мезоэкономика: состояние и перспективы*: монография; под ред. Маевского В.И. М.: Институт экономики Российской академии наук; 2018, 314 с. ISBN 978-5-9940-0642-9
14. Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010;12:33–46. <https://elibrary.ru/nblbbh>
15. Шпак В.В. Основы мультиагентной планово-логистической модели управления воспроизводственным циклом отрасли в режиме «онлайн». *Фундаментальные исследования*. 2022;3:146–155. <https://doi.org/10.17513/fr.43229>
16. Шпак В.В. Формирование организационно-управленческой модели реализации «Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года». *Вестник Челябинского государственного университета*. 2021;3(449):10–23. <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2021-10302>
17. Шокин А.А. *Министр невероятной промышленности СССР*. М.: Техносфера; 2007, 455 с. ISBN 978-5-94836-151-2
18. Шпак В.В. Инвентаризация электроники – фундамент прорыва в лидеры. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):135–148. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-135-148>
19. Симчера В.М. *Изобличая лживые цифры. Этюды о пирровых победах и потерях России*. Издательские решения; 2019, 357 с. ISBN 978-5-4496-4788-7
20. Шведин Б.Я. *Онтология предприятия: экспериентологический подход. Технология построения онтологической модели предприятия на основе анализа и структурирования живого опыта*. М.: ЛЕНАНД; 2010, 240 с. ISBN 978-5-9710-0308-3

## REFERENCES

1. Schwab K., Malleret T. *Covid-19: Velikaya perezagruzka (Covid-19: The Great Reset)*. Forum; 2020, 262 p. (In Russ.).
2. Vinge V. *Singulyarnost' (Singularity)*: transl. from Engl. Moscow: AST; 2019, 224 p. (In Russ.). ISBN 978-5-17-114349-7
3. Kurzweil R. *Revolyutsiya razuma: na podstupakh k Singulyarnosti. Kak tekhnologii izmenyat obshchestvo i soznanie (Revolution of the Mind: on the Approaches to the Singularity. How Technologies Will Change Society and Consciousness)*. Moscow: Eksmo, BOMBORA; 2025. 661 p. (In Russ.). ISBN 978-5-04-228765-7
4. Peccei A. The Challenge of the 1970s to the Modern World. Topic for Discussion. In: Gvishiani D.M. (Ed.). *The Club of Rome. History of Creation, Selected Papers and Speeches, Official Proceedings*. Moscow: URSS; 1997, 384 p. (In Russ.). ISBN 5-88417-100-5
5. Kondrat'ev N.D. *Bol'shie tsikly kon'yunktury i teoriya predvideniya (Large Cycles of Economic Conditions and the Theory of Foresight)*: International Fund of Kondratiev N.D., et al. Moscow: Ehkonomika; 2002, 550 p. (In Russ.). ISBN 5-282-02181-1
6. Koval'chuk M.V. *Ideologiya prirodopodobnykh tekhnologii (Ideology of Nature-Inspired Technologies)*. Moscow: Fizmatlit; 2021, 329 p. (In Russ.). ISBN 978-5-9221-1931-3
7. Hara Sh. *Minimal FAB. Fab System Research Consortium*. AIST, Japan. 2010.
8. Malenkov Yu.A., Davydova A.E. Possibilities of applying digital technologies in strategic planning and forecasting of sustainable development of organizations. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2021;14(356):84–89 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rzjnia>
9. Glaz'ev S.Yu. New approaches to the organization of enterprises in the context of changing technological and world economic modes. In: Kleiner G.B. (Ed.). *Strategic Planning and Evolution of Enterprises: Materials of the 20th Russian Symposium*. Moscow: CEMI RAS; 2019. P. 7–18 (in Russ.).
10. Shpak V.V. *Razvitie elektronnoi promyshlennosti v usloviyakh menyayushchegosya mira (Development of the Electronics Industry in a Changing World)*. Moscow: Tekhnosfera; 2024, 128 p. (In Russ.). ISBN 978-5-94836-708-8
11. Dlyasin G.G. *Azbuka Germesa Trismegista ili molekulyarnaya tainopis' myshleniya (The ABCs of Hermes Trismegistus, or the Molecular Secret Writing of Thinking)*. Moscow: Belye al'vy; 2002, 141 p. (In Russ.). ISBN 5-7619-0126-9
12. Shpak V.V. Strategic planning in modern conditions. In: *Public Administration in New Geopolitical and Geoeconomic Conditions: Proceedings of the 19th International Conference*. Moscow State University, December 5–9, 2022. Moscow: KDU, Dobrosvet; 2023. P. 130–136 (in Russ.). <https://elibrary.ru/lehfav>
13. Maevskii V.I. (Ed.). *Mezoekonomika: sostoyanie i perspektivy: monografiya (Meso-economics: State and Prospects: monograph)*. Moscow: Institute of Economics, RAS; 2018, 314 p. (In Russ.). ISBN 978-5-9940-0642-9
14. Skobelev P.O. Multi-agent technology for industrial applications: towards 20 years anniversary of Samara scientific school of multi-agent systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2010;12:33–46 (in Russ.). <https://elibrary.ru/nblbbh>
15. Shpak V.V. Fundamentals of a multi-agent planning and logistics model for managing the reproduction cycle of the industry in the “online” mode. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2022;3:146–155 (in Russ.). <https://doi.org/10.17513/fr.43229>
16. Shpak V.V. Formation of the organizational and managerial model for the implementation of the “Strategy for the Development of the Electronics Industry of the Russian Federation for the period up to 2030.” *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Chelyabinsk State University*. 2021;3(449):10–23 (in Russ.). <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2021-10302>

17. Shokin A.A. *Ministr neveroyatnoi promyshlennosti SSSR (Minister of Incredible Industry of the USSR)*. Moscow: Tekhnosfera; 2007, 455 p. (In Russ.). ISBN 978-5-94836-151-2
18. Shpak V.V. Electronics inventory as the foundation of breakthrough into global leadership. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):135–148. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-135-148>
19. Simchera V.M. *Izoblichaya lzhiyye tsify. Etyudy o pirrovykh pobedakh i poteryakh Rossii (Exposing False Figures. Studies on Russia's Pyrrhic Victories and Losses)*. Izdatel'skie resheniya; 2019, 357 p. (In Russ.). ISBN 978-5-4496-4788-7
20. Shvedin B.Ya. *Ontologiya predpriyatiya: ehkspirientologicheskii podkhod. Tekhnologiya postroeniya ontologicheskoi modeli predpriyatiya na osnove analiza i strukturovaniya zhivogo opyta (Enterprise Ontology: An Experiential Approach. Technology for Constructing an Enterprise Ontological Model Based on the Analysis and Structuring of Lived Experience)*. Moscow: LENAND; 2010, 240 p. (In Russ.). ISBN 978-5-9710-0308-3

#### Об авторе

**Шпак Василий Викторович**, к.э.н., доцент, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: morser@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0002-3548-1070>

#### About the Author

**Vasily V. Shpak**, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: morser@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0002-3548-1070>

Мировоззренческие основы технологии и общества  
Philosophical foundations of technology and society

УДК 304.5, 327, 339.9

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-145-153>

EDN UHPJPA



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Осмысление глобальных экологических вызовов современности: технологические и социокультурные аспекты

Н.Ю. Рябченко<sup>1</sup>,  
А.П. Федоров<sup>2, @</sup>

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,  
Санкт-Петербург, 190005 Россия

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: z333e@yandex.ru

• Поступила: 01.11.2025 • Доработана: 23.12.2025 • Принята к опубликованию: 22.03.2026

### Резюме

**Цели.** В настоящее время глобальная экологическая повестка стала значимым фактором мировой политики и международных отношений. Происходящие в мире климатические изменения, нарастающее демографическое и техногенное давление на среду обитания, деградация биосферы и истощение невозобновляемых природных ресурсов представляют собой единый комплекс экологических вызовов для всего человечества, который останется актуальным в течение всего XXI века. Целью настоящей статьи является рассмотрение технологических и социокультурных аспектов глобальных экологических вызовов современности в их взаимосвязи.

**Методы.** В статье используются системно-исторический метод и циклически-волновой подход к изучению мировой динамики.

**Результаты.** Рассмотрены особенности взаимодействия человечества с природной средой, проанализированы факторы и характер изменения антропогенных нагрузок в исторической ретроспективе, показаны этапы становления глобально-политической повестки экологизма, проведено сравнение климатической картины прошлого и наших дней, обозначены приоритеты управления экологической повесткой в новом мироустройстве.

**Выводы.** Общее антропогенное влияние на природную среду определяется рядом социокультурных, экономических и технологических факторов. Хотя степень этого влияния на протяжении истории повышается, однако именно климатические изменения не имеют выраженной антропогенной природы, будучи подчинены главным образом солнечным и геофизическим циклам. Наряду с этим, тема климатических изменений стала одним из ключевых элементов глобальной экологической повестки, которая в ряде случаев приводит к постановке регуляторных требований и технологических стандартов, затрудняющих темпы индустриализации и модернизации в развивающихся странах. В условиях формирования новой системы международных отношений появляется возможность переосмысления экологической повестки с дальнейшим перенаправлением ее на приоритеты климатического прогнозирования и адаптации, обеспечения экологической безопасности и развития природоподобных технологий.

**Ключевые слова:** глобальные экологические вызовы, экологическая повестка, антропогенные нагрузки, техносфера, спектры потребностей, природоподобные технологии, национальная безопасность, Мировое большинство

**Для цитирования:** Рябченко Н.Ю., Федоров А.П. Осмысление глобальных экологических вызовов современности: технологические и социокультурные аспекты. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):145–153. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-145-153>, <https://www.elibrary.ru/UHPJPA>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Conceptualizing the global environmental challenges of our time: Technological and sociocultural aspects

Nikita Yu. Ryabtchenko <sup>1</sup>,  
Artem P. Fedorov <sup>2</sup>, @

<sup>1</sup> D.F. Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint Petersburg, 190005 Russia

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: z333e@yandex.ru

• Submitted: 01.11.2025 • Revised: 23.12.2025 • Accepted: 22.03.2026

### Abstract

**Objectives.** Nowadays, the global environmental agenda has become a significant factor in world politics and international relations. Along with climate change, growing demographic and technological pressures on the environment, the degradation of ecosystems, and the depletion of nonrenewable natural resources represent a single set of environmental challenges for humanity as a whole, which will remain relevant throughout the 21st century. The objective of this article is to consider the technological and sociocultural aspects of modern global environmental challenges in terms of their interconnectedness.

**Methods.** The article is based on the systems history method and the cycles and waves approach to studying global dynamics.

**Results.** Considering the main features of humanity’s interaction with the environment, the factors and nature of changes in the anthropogenic burden are analyzed to reveal the stages according to which environmentalism is shaped as part of the global political agenda. Based on a comparison of the climatic picture of the past and modernity, priorities for steering the environmental agenda as a key component of the emerging world system are identified.

**Conclusions.** The overall anthropogenic impact on the environment is determined by a number of sociocultural, economic and technological factors. Although the degree of this impact has been increasing throughout history, climate change as such does not have a pronounced anthropogenic nature, being driven mainly by solar and geophysical cycles. Meanwhile, the very fact that climate change has become a key element of the global environmental agenda often leads to imposing regulatory requirements and technological standards that slow down the pace of industrialization and modernization in developing countries. In the context of the emerging world system architecture, it becomes possible to rethink the environmental agenda and repurpose it to take account of the priorities of climate forecasting and adaptation to ensure environmental safety while developing environmentally appropriate nature-similar technologies.

**Keywords:** global environmental challenges, environmental agenda, anthropogenic pressures, technosphere, spectrums of needs, nature-similar technologies, national security, the World Majority

**For citation:** Ryabtchenko N.Yu., Fedorov A.P. Conceptualizing the global environmental challenges of our time: Technological and sociocultural aspects. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):145–153. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-145-153>, <https://www.elibrary.ru/UHPJPA>

**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 глобальная экологическая повестка стала значимым фактором мировой политики и международных отношений. Происходящие в мире климатические изменения, нарастающее демографическое и техногенное давление на среду обитания, деградация биогеоценозов и истощение невозобновляемых природных ресурсов представляют собой единый комплекс экологических вызовов для всего человечества, который останется актуальным в течение всего XXI в. Экологическая повестка нередко используется как инструмент международного регулирования, в котором отражаются противоречия между различными группами стран, уровнем их технологического развития и долгосрочными приоритетами экономического роста. В свете последнего обстоятельства представляется важным выявить причины наблюдаемого сегодня глобального биосферно-экологического кризиса, для чего необходимо обратиться к объективным общебиосферным, видовым и социокультурным закономерностям и перейти к рассмотрению некоторых аспектов глобального исторического процесса через призму этих закономерностей.

## ФЕНОМЕН SAPIENS: ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРИРОДНОЙ СРЕДОЙ

Человек разумный – единственный биологический вид в биосфере Земли, не получающий из природной среды все необходимые ему ресурсы в готовом виде, а занимающийся осознанным целенаправленным преобразованием природной среды для получения разнообразных промежуточных ресурсов, продуктов материального производства и иных благ, ранее в его среде обитания не существовавших [1, 2].

Как и другие биологические виды, человек также имеет свою исходную, предопределенную экологическую нишу, по исчерпанию которой возникает риск дальнейшему существованию вида. Однако по мере развития культуры (включая техносферу), материальной практики человечества и его энерговооруженности экологическая ниша *Homo sapiens* постоянно

расширялась [3]. При этом всегда существует определенный набор параметров естественной среды обитания, при значительном нарушении граничных значений которых сколь угодно обширная среда обитания становится непригодной для дальнейшего воспроизводства, выживания и развития вида.

Вместе с тем у человеческой популяции имеется другое важное отличие от остальной биосферы Земли: если всем другим биологическим видам свойственен детерминированный спектр потребностей, неизменный на длительных интервалах времени, то спектр потребностей человека изначально вариативен, иерархически сложен и на всем протяжении истории имеет тенденцию расширяться по мере развития культуры в аспектах самопознания, самоорганизации и материальной практики человечества [3, 4].

## АНТРОПОГЕННЫЕ НАГРУЗКИ В ИСТОРИЧЕСКОЙ РЕТРОСПЕКТИВЕ

В самом общем виде можно выделить четыре взаимосвязанных фактора, определяющих уровень антропогенной нагрузки на природную среду: демография, спектры потребностей, основа энергетики и уровень развития производительных сил (включая технологическое развитие). На протяжении всей человеческой истории динамика этих факторов была неравномерной и нелинейной, а их скачкообразное изменение всякий раз приводило к переходу цивилизации в качественно новое состояние, что характеризуется понятием «фаза развития» [5].

Первый такой фазовый переход (из архаичной в традиционную фазу развития) известен как неолитическая революция и связан со становлением системы производящего хозяйства. В то время освоение севооборотов, первых строительных технологий и металлургии обусловило кратный рост численности человеческой популяции и первый скачок антропогенной нагрузки на земную экосистему. Однако на начальном уровне развития цивилизации энерговооруженность человека все еще была несопоставимо ниже энергетической мощности естественных общепланетарных процессов, поэтому даже возросший экологический след человечества тогда оставался исчезающе малым [5, 6].

Впоследствии, уже в XVIII в., с переходом из традиционной в индустриальную фазу развития человечество впервые стало использовать техногенную энергию, которая затем будет все больше заменять био-генную во всех производственных циклах, кратно повышая энерговооруженность вида *Homo sapiens*. Рост антропогенной нагрузки в период первой промышленной революции был также связан с новым сочетанием социокультурных факторов – светской идеологии буржуазного либерализма и капиталистического способа производства. Это сочетание привело к значительному расширению массового спектра потребностей, увеличению объемов продукции и сокращению циклов производства, что впервые в истории стало оказывать заметное влияние на природную среду [7, 8].

К началу первой научно-технической революции на рубеже XIX–XX вв. численность населения Земли достигла 1 млрд чел., при этом сохранялось и усиливалось действие упомянутых социокультурных факторов, что в новых технологических условиях выразилось в начале эпохи конвейерного производства предметов массового спроса.

Отдельный важный феномен того времени – появление индустрии массовых коммуникаций, которая по мере развития стала существенным фактором искусственного разрастания деградационного спектра потребностей. Последнее обстоятельство требует пояснения: в отличие от базовых, демографически обусловленных личных, семейных и инфраструктурных потребностей людей, деградационные потребности представляют собой искусственно культивируемые потребности, удовлетворение которых объективно наносит ущерб самому потребителю, обществу и окружающей среде [4, 9].

На протяжении всего XX в. вплоть до наших дней под влиянием социокультурных факторов в мире в целом, особенно в развитых странах, наблюдается преобладание искусственно формируемого спектра потребностей, что в сочетании с кратным ростом численности населения до 8 млрд чел. и ускоряющейся сменой технологических укладов выразилось в исторически беспрецедентном повышении антропогенной нагрузки на среду обитания [10].

### **ЭКОЛОГИЗМ: СТАНОВЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНО-ПОЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕСТКИ**

Во 2-й половине XX в. на Западе проявили действительную обеспокоенность проблемой сохранения необходимой человечеству экологической ниши, одновременно рассматривая экологические вызовы как стимул для консолидации усилий и укрепления собственных технологических и институциональных преимуществ [11]. Исходя из этой мотивации, опираясь на свое совокупное интеллектуальное,

технологическое и (что наиболее важно) институциональное лидерство, в странах Запада стали планомерно формировать новую глобально-политическую повестку, в центре которой находились вопросы экологии и, в особенности, климатических изменений.

Основными вехами этой повестки являются доклад Римскому клубу «Пределы роста» (доклад супругов Медоуз, 1972 г.), доклад Всемирной комиссии ООН<sup>1</sup> по окружающей среде и развитию «Наше общее будущее» (доклад Брунтланд, 1987 г.), принятие «Повестки дня на XXI век» и Рамочной конвенции ООН об изменении климата на конференции в Рио-де-Жанейро (1992 г.), подписание Киотского протокола (1997 г.), принятие «Декларации тысячелетия» на заседании ГА ООН<sup>2</sup> в Нью-Йорке (2000 г.), принятие «Повестки-2030» и ЦУР<sup>3</sup> ООН, подписание Парижского соглашения (2015 г.), последние конференции COP<sup>4</sup> в Глазго, Шарм-эш-Шейхе и Дубае (2021–2023 гг.) и проведение Саммита будущего ООН в сентябре 2024 г. [12].

Все вышеперечисленные программные документы и мероприятия этой повестки объединяет основная мысль о том, что изменение климата носит преимущественно антропогенный характер, связано в первую очередь с парниковым эффектом и при инерционном сценарии будет иметь катастрофические последствия для человечества.

Оформленная институционально и активно реализуемая в международной политической практике климатическая повестка обрела качество современной квази-идеологии, которую можно определить как политический экологизм. В своей радикальной версии эта квази-идеология уже приобретает радикальные черты, ставя *Homo sapiens* вровень с животным миром и даже с царством растений, таким образом умаляя ценность и человеческой жизни, и всех достижений культуры.

В общественных дебатах вокруг климатической политики иногда проявляется избирательное использование научных данных, что отражает многообразие позиций и интересов в этой сфере. Еще одним признаком, позволяющим говорить о сугубо политически-инструментальном характере этой

<sup>1</sup> Организация Объединенных Наций.

<sup>2</sup> Генеральная Ассамблея Организации Объединенных Наций.

<sup>3</sup> Цели в области устойчивого развития.

<sup>4</sup> Дискуссия, посвященная экологической повестке и итогам климатической конференции COP28 в Дубае. Международный дискуссионный клуб «Валдай». <https://ru.valdaiclub.com/multimedia/video/diskussiya-po-ekologicheskoy-povestke-i-itogam-cop28/>. Дата обращения 06.09.2025. [Discussion on the environmental agenda and the outcomes of the COP28 climate conference in Dubai. Valdai Discussion Club. <https://ru.valdaiclub.com/multimedia/video/diskussiya-po-ekologicheskoy-povestke-i-itogam-cop28/>. Accessed September 06, 2025. (In Russ.).]

квази-идеологии, является неравномерность ее медийного освещения: в одни годы наблюдается массивное медийное продвижение соответствующих идей, мероприятий и персоналий, в другие же климатическая повестка практически «затихает», поскольку в данный период глобальная политика осуществляется иными средствами.

Показательным примером политизации экологического дискурса стала деятельность шведской экоактивистки Греты Тунберг, чьи публичные выступления нередко рассматриваются как инструмент формирования эмоционального давления в рамках продвижения климатической повестки. Характерно, что вся ее семья сознательно перешла на веганство, рассматривая это как личный вклад в сокращение углеродного следа. Тем самым экологическая проблематика приобретает черты массовой идеологической мобилизации, в которой индивидуальные практики и ценностные установки превращаются в элементы глобального воздействия.

При всем этом важно понимать, что экологическая повестка все чаще переплетается с вопросами экономической, энергетической и технологической политики [11]. Как представляется, стратегические цели этой политики состоят в нарастании глобально-социально-экономического неравенства и диспропорций в доступе к технологиям и ресурсам модернизационного развития<sup>5</sup>. Вместе с тем в международной практике экологической политики прослеживается стремление промышленно развитых стран сохранить технологическое лидерство и приоритетный доступ к финансовым и инновационным ресурсам в процессе реализации энергетического перехода [13].

### **МНОГОФАКТОРНАЯ ПРИРОДА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ: ОТ ПРОШЛОГО К НАСТОЯЩЕМУ**

Принимая во внимание, что в рамках современной глобальной экологической повестки особое внимание уделяется антропогенным факторам климатических изменений, представляется важным отметить наличие и иных научных подходов, рассматривающих климатическую динамику как результат сложного взаимодействия природных и антропогенных

<sup>5</sup> Барабанов О., Беспалов А., Ибрагимова К., Колташов В., Полетаев Д., Саворская Е. *Социальное измерение «глобального всеобщего достояния»: можно ли преодолеть неравенство в мире?* Международный дискуссионный клуб «Валдай». <https://ru.valdaiclub.com/a/reports/sotsialnoe-izmerenie-globalnogo-dostoyaniya/>. Дата обращения 05.09.2025. [Barabanov O., Bepalov A., Ibragimova K., Koltashov V., Poletaev D., Savorskaya E. *The social dimension of the “global commons”: can inequality in the world be overcome?* Valdai Discussion Club. <https://ru.valdaiclub.com/a/reports/sotsialnoe-izmerenie-globalnogo-dostoyaniya/>. Accessed September 05, 2025. (In Russ.)]

процессов. В этом контексте целесообразно кратко рассмотреть природу и факторы климатических изменений, опираясь как на данные палеоклиматологии, так и на результаты современных исследований в области климатической науки [14].

В целом климатическая динамика планеты представляет собой систему взаимосвязанных циклических процессов различной продолжительности. Основными факторами, определяющими формирование земного климата, являются: 1) мощность поглощаемого солнечного излучения; 2) мощность собственного излучения недр Земли и 3) пространственное соотношение мирового океана и геоструктур суши.

Так, на горизонте миллионов лет сменяются криозеры и термоэры, определяемые возможностью непрерывного теплопереноса в экваториальной плоскости планеты. Соответственно, поскольку в нашей геологической эпохе экватор «перекрывает» двумя континентами, все человечество неизменно жило и живет в климатической криозере. При термоэре температура Земли была гораздо выше.

Далее, на горизонте десятков тысяч лет регулярно сменяют друг друга ледники и межледниковья, а на горизонте столетий – малые ледниковые периоды и так называемые климатические оптимумы. Так, падение Римской империи и кризис античного мира частично совпали по времени с фазой климатического похолодания, известной как позднеантичный малый ледниковый период. В свою очередь, относительное потепление в XI–XII вв., известное как Средневековый климатический оптимум, сопровождалось благоприятными климатическими условиями в Северной Атлантике, что, в частности, позволило норманнам освоить южные прибрежные районы Гренландии, которая сейчас покрыта ледником.

Пятьсот лет спустя, на рубеже XVII в. очередной малый ледниковый период принес с собой лед на ледной Москве-реке и известные неурожайные годы, обусловившие голод в средневековой царской России. Здесь немаловажно отметить, что общая температурная разница климатической ситуации XII и XVII вв. составляла те самые 1.5–2 °C – диапазон, который активно обсуждается в международных климатических соглашениях и служит ориентиром для оценки возможных последствий потепления<sup>6</sup>. При этом очевидно, что описанные различия климатической ситуации XII и XVII вв. не могли быть связаны с деятельностью человечества, учитывая исчезающе малые энерговооруженность и антропогенную нагрузку глобальной цивилизации в той, доиндустриальной эпохе.

<sup>6</sup> Special report: global warming of 1.5°C. IPCC. <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Дата обращения 10.09.2025. / Accessed September 10, 2025.

Сегодня же мы наблюдаем очередную фазу климатических колебаний, обусловленных естественными геофизическими и астрономическими циклами, наряду с антропогенными факторами [14].

Наконец, согласно ряду российских и зарубежных исследований, среди естественных факторов, влияющих на современное потепление климата, рассматривается изменение угла наклона оси вращения Земли, что влияет на инсоляцию полярных и экваториальных областей и, как следствие, на интенсивность меридионального теплопереноса [15–17]. В то же время большинство климатических моделей указывают на существенную роль антропогенных факторов – прежде всего увеличения концентрации парниковых газов в формировании текущих климатических тенденций, что остается предметом активных научных дискуссий.

Вместе с тем в научной литературе обсуждаются различные гипотезы, объясняющие процессы разрушения атмосферного озона. Наряду с антропогенными источниками, в частности, выбросами хлорфторуглеродов, сыгравшими ключевую роль в формировании озоновых «дыр» в конце XX в., исследуются и естественные геофизические факторы, включая процессы дегазации из недр Земли, вулканическую активность и солнечную вариабельность. Изучение взаимосвязей между этими процессами открывает возможности для более точного прогнозирования метеорологических изменений и оценки климатических рисков [18].

Таким образом, климатические изменения прошлого и настоящего обусловлены преимущественно действием природных факторов. При этом антропогенное воздействие выступает только усиливающим элементом общего климатического процесса [19]. Однако, в отличие от череды поколений прошлого, сегодня человечество впервые имеет достаточные научно-технологические возможности, чтобы не только прогнозировать неблагоприятные изменения климата, но и вести заблаговременную адаптацию своей среды обитания к этим изменениям с использованием самых передовых технологий и принципов управления [10, 12, 14].

### **УПРАВЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВЕСТКОЙ В НОВОМ МИРОУСТРОЙСТВЕ: ЗАДАЧИ НАУКИ И МНОГОСТОРОННЕЙ ДИПЛОМАТИИ**

Помимо не зависящих от человека объективных макропроцессов, реальные экологические вызовы современности обусловлены совокупной антропогенной нагрузкой на природную среду, которая определяется прежде всего технологическими и социокультурными факторами. И если основным социокультурным фактором выступают уже описанные искусственно формируемые спектры потребностей,

то на технологическом факторе следует остановиться подробнее.

На всем протяжении истории человечества техносфера развивалась как защита от природной среды и во многом в противовес последней. Закономерным следствием такого подхода стали примитивные принципы функционирования доступных нам технологий, неадекватные с точки зрения сложности и устойчивости наблюдаемых природных процессов.

Большая часть нашей энергетики до сих пор основана на сжигании ископаемого топлива. Даже современные ядерные энергетические установки в своей основе используют традиционные принципы теплоэнергетики, где ключевым процессом остается преобразование тепловой энергии в механическую и электрическую посредством образования водяного пара. В то же время в окружающем мире преобладают реакции биохимического и термоядерного синтеза с выделением энергии.

Перспективным направлением в этой области может стать развитие природоподобных технологий<sup>7</sup>, разрабатываемых российским Курчатовским институтом<sup>8</sup>, филиал которого сегодня открыт и в Республике Беларусь.

Речь идет о технологиях, моделирующих принципы организации живых систем и воспроизводящих природные процессы в форме технических решений<sup>9</sup>. Природоподобные технологии основаны на использовании возобновляемых ресурсов,

<sup>7</sup> Указ Президента Российской Федерации от 02.11.2023 № 818 «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации». Официальное опубликование правовых актов. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311020021>. Дата обращения 25.09.2025. [Decree of the President of the Russian Federation No. 818 dated November 2, 2023, “On the Development of Nature-Inspired Technologies in the Russian Federation.” Official publication of legal acts. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311020021>. Accessed September 25, 2025. (In Russ.).]

<sup>8</sup> Тематическая сессия «Природоподобные технологии: новая эра развития человечества» в рамках III Конгресса молодых ученых. Фонд «Росконгресс». <https://roscongress.org/sessions/kmu-2023-prirodopodobnye-tekhnologii-novaya-era-razvitiya-chelovechestva/about/#>. Дата обращения 22.09.2025. [Thematic session “Nature-like technologies: a new era of human development” as part of the Third Congress of Young Scientists. Roscongress Foundation. <https://roscongress.org/sessions/kmu-2023-prirodopodobnye-tekhnologii-novaya-era-razvitiya-chelovechestva/about/#>. Accessed September 22, 2025. (In Russ.).]

<sup>9</sup> Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». Правительство России. <http://government.ru/docs/all/152305/>. Дата обращения 30.09.2025. [Decree of the President of the Russian Federation No. 145 dated February 28, 2024, “On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation.” Government of Russia. <http://government.ru/docs/all/152305/>. Accessed September 30, 2025. (In Russ.).]

т.е. не нарушают кругооборота веществ в природе, а также отличаются высокой энергоэффективностью<sup>10</sup>.

Особое значение взаимосвязь технологических и экологических аспектов мировой динамики имеет с точки зрения обеспечения комплексной безопасности суверенных государств. Так, согласно Стратегии национальной безопасности Российской Федерации в действующей редакции, одними из ее стратегических национальных приоритетов являются научно-технологическое развитие, экологическая безопасность и рациональное природопользование. Кроме того, в числе национальных интересов Российской Федерации с учетом долгосрочных тенденций развития ситуации в России и в мире обозначены охрана окружающей среды, сохранение природных ресурсов, адаптация к изменениям климата, а также устойчивое развитие российской экономики на новой технологической основе<sup>11</sup>.

Вместе с тем, в Климатической доктрине Российской Федерации справедливо отмечается, что проблемы, связанные с изменением климата, в частности обеспечение баланса между эффективностью экономики и социальной справедливостью, устранение потенциальных конфликтов интересов в связи с экстремальными проявлениями изменения климата (тепловые волны, наводнения, засухи и другие явления), не могут быть решены посредством только научных методов. В таких условиях достижение необходимого баланса возможно только посредством комплексных управленческих решений<sup>12</sup>. При выработке этих решений целесообразно учитывать

<sup>10</sup> Природоподобные технологии. НИЦ «Курчатовский институт». <https://nrcki.ru/catalog/nauka/fundamentalnye-i-prikladnye-nauchnye-issledovaniya/nbiks-prirodopodobnye-tekhnologii/>. Дата обращения 02.10.2025. [Nature-like technologies. Kurchatov Institute Research Center. <https://nrcki.ru/catalog/nauka/fundamentalnye-i-prikladnye-nauchnye-issledovaniya/nbiks-prirodopodobnye-tekhnologii/>. Accessed October 02, 2025. (In Russ.)]

<sup>11</sup> Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». Президент России. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1>. Дата обращения 02.10.2025. [Decree of the President of the Russian Federation No. 400 dated July 2, 2021, "On the National Security Strategy of the Russian Federation." President of Russia. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046/page/1>. Accessed October 02, 2025. (In Russ.)]

<sup>12</sup> Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». Официальное опубликование правовых актов. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009>. Дата обращения 04.10.2025. [Decree of the President of the Russian Federation No. 812, dated October 26, 2023, "On the Approval of the Climate Doctrine of the Russian Federation." Official publication of legal acts. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009>. Accessed October 04, 2025. (In Russ.)]

и то обстоятельство, что в настоящее время вектор развития мировой экономики и, соответственно, научных исследований меняет свое направление с роботизации и автоматизации (Индустрия 4.0) на разработку социоцентричных и экологически устойчивых технологий [20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, говоря о глобальных экологических вызовах в целом, изложенное понимание данной темы открывает для заинтересованных ответственных субъектов мировой политики возможность формировать и продвигать в рамках новых форматов взаимодействия стран Мирового большинства и специализированных организаций системы ООН общие позиции в этой сфере, ориентированные на более сбалансированный подход к мировому развитию, учитывающий интересы всех групп стран. Такие общие позиции могут касаться, прежде всего, следующих вопросов:

- адаптация к ожидаемому изменению климата, инструментарий климатического прогнозирования и перспективная энергетика;
- принципы благоразумного управления научно-техническим прогрессом, приоритет развития природоподобных технологий;
- необходимость смены парадигмы хозяйственного и общекультурного развития с целью сведения к минимуму деградационного спектра потребностей;
- принципы ответственного производства, справедливого распределения и умеренного потребления в мировом хозяйстве.

Представляется, что обновленная в предложенном ключе «экологическая повестка Мирового большинства» могла бы стать реальным объединительным направлением сотрудничества в рамках международных организаций поверх любых этнических и конфессиональных разногласий.

### Вклад авторов

**Н.Ю. Рябченко** – концепция и методология исследования, написание текста рукописи.

**А.П. Федоров** – обзор литературы, редактирование рукописи, переработка научного содержания.

Все авторы прочитали и согласовали публикуемую версию рукописи.

### Authors' contributions

**N.Yu. Ryabtchenko** – conceptualization, methodology, writing (original draft preparation).

**A.P. Fedorov** – literature review, manuscript editing, revising the research content.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стёпин В.С. Коренной перелом цивилизации. *Экология и жизнь*. 2012;5:10–14. <https://www.elibrary.ru/pdfdqh>
2. Миловзорова М.Н. *Аксиологические основания безопасного развития социальных систем в условиях глобализации*: монография. СПб.: Астерион; 2021, 266 с. ISBN 978-5-00188-109-4
3. Ракитский Б.В. *Наука о бытии человечества (общество и человек в обществе)*. М.: Пробел-2000; 2020, 152 с. ISBN 978-5-98604-527-6
4. Величко М.В., Ефимов В.А., Зазнобин В.М. *Экономика инновационного развития: управленческие основы экономической теории*. М.: Концептуал; 2017, 571 с. ISBN 978-5-906867-59-9
5. Переслегин С.Б., Переслегина Е. «Дикие карты» будущего. *Форс-мажор для человечества*. М.: Алгоритм; 2015, 480 с. ISBN 978-5-4438-0983-0
6. Переслегин С.Б. VI технологический уклад: пространство возможностей. *Экономические стратегии*. 2019;21(3-161): 24–34. <https://elibrary.ru/malwfm>
7. Маслов Г.А. Теория технологических укладов: осмысливая смены волн глобализации. *Проблемы современной экономики*. 2021;1(77):65–70. <https://elibrary.ru/jqclai>
8. Глазьев С.Ю. Современная теория длинных волн в развитии экономики. *Экономическая наука современной России (ЭНСР)*. 2012;2(57):27–42. <https://www.elibrary.ru/ozejdt>
9. Ковалёв Д.В. Трансформация сознания под влиянием технологических факторов глобализации. *Тенденции развития науки и образования*. 2019;(56-14):37–41. <https://doi.org/10.18411/lj-11-2019-305>, <https://www.elibrary.ru/kdcdfj>
10. Садовничий В.А., Акаев А.А., Ильин И.В., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование глобальной динамики в XXI веке. *Вестник Московского университета. Серия 27. Глобалистика и геополитика*. 2022;1:5–35. <https://doi.org/10.56429/2414-4894-2022-39-1-5-35>
11. *Картина нарождающегося мира: базовые черты и тенденции*: доклад; под ред. А.В. Яковенко. М.: Дипломатическая академия МИД России; 2024, 62 с.
12. *Преодолевая пределы роста. Основные положения доклада для Римского клуба*: монография; под ред. В.А. Садовничего. М.: Изд-во Московского университета; 2023, 99 с. ISBN 978-5-19-011875-9
13. Дынкин А.А. Трансформация мирового порядка: экономика, идеология, технологии. *Полис. Политические исследования*. 2024;5:8–23. <https://doi.org/10.17976/jpps/2024.05.02>
14. Глазьев С.Ю., Безруков Л.Б., Долголаптев А.В., Ларин Н.В., Сывороткин В.Л., Федоров В.М. Климатические изменения и энергопереход. *Экономические стратегии*. 2023;6:16–29. <https://www.elibrary.ru/ugbxrb>
15. Смирнов Б.М. *Физика глобальной атмосферы. Парниковый эффект, атмосферное электричество, эволюция климата*. М.: Изд-во «Интеллект»; 2017, 256 с.
16. Riser S.C., Freeland H.J., Roemmich D., et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*. 2016;6:145–153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>
17. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*. 1960;12(2):200–203. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v12i2.9366>
18. Сывороткин В.Л. *Глубинная дегазация и глобальные катастрофы*. М.: Геоинформцентр; 2002, 250 с. ISBN 5-900357-80-5
19. Монин А.С., Сонечкин Д.М. *Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы*. М.: Наука; 2005, 190 с.
20. Карпухина Н.Н., Митяков Е.С., Пронин А.Ю. Промышленные революции: от Индустрии 3.0 к Индустрии 5.0 в контексте российской экономики. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):123–134. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-123-134>

## REFERENCES

1. Stepin V.S. A radical change in civilization. *Ekologiya i zhizn' = Ecology and Life*. 2012;5:10–14 (in Russ.).
2. Milovzorova M.N. *Aksiologicheskie osnovaniya bezopasnogo razvitiya sotsial'nykh sistem v usloviyakh globalizatsii (Axiological Foundations for Secure Development of Social Systems in the Context of Globalization)*: monograph. Saint Petersburg: Asterion; 2021, 266 p. (In Russ.). ISBN 978-5-00188-109-4
3. Rakitskii B.V. *Nauka o bytii chelovechestva (obshchestvo i chelovek v obshchestve) (Science on Humanity in Being (Society and a Person within Society))*. Moscow: Probel-2000; 2020, 152 p. (In Russ.). ISBN 978-5-98604-527-6
4. Velichko M.V., Efimov V.A., Zaznobin V.M. *Ehkonomika innovatsionnogo razvitiya: upravlencheskie osnovy ehkonomicheskoi teorii (Economics for Innovative Development: Managerial Foundations of Economic Theory)*. Moscow: Kontseptual; 2017, 571 p. (In Russ.). ISBN 978-5-906867-59-9
5. Pereslegin S.B., Pereslegina E. “Dikie karty” budushchego. Fors-mazhor dlya chelovechestva (“Wild Cards” of the Future. Force Majeure for Humanity). Moscow: Algoritm; 2015, 480 p. (In Russ.). ISBN 978-5-4438-0983-0
6. Pereslegin S.B. Technological order VI: The space of opportunities. *Ekonomicheskie strategii*. 2019;21(3-161):24–34 (in Russ.). <https://elibrary.ru/malwfm>
7. Maslov G.A. Theory of technologic orders: reconsidering the change of globalization waves. *Problemy sovremennoi ekonomiki = Problems of Modern Economics*. 2021;1(77):65–70 (in Russ.). <https://elibrary.ru/jqclai>
8. Glazyev S.Yu. The modern theory of long waves in economic development. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii = Economics of Contemporary Russia*. 2012;2(57):27–42 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/ozejdt>

9. Kovalev D.V. A transformation of consciousness influenced by technological factors of globalization. *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*, 2019;(56-14):37–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.18411/lj-11-2019-305>, <https://www.elibrary.ru/kdcdfj>
10. Sadovnichiy V.A., Akaev A.A., Il'in I.V., Korotaev A.V., Malkov S.Yu. Modeling and forecasting of global dynamics in the 21st century. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 27. Globalistika i geopolitika = Bulletin of Moscow University. Series 27. Global Studies and Geopolitics*. 2022;1:5–35 (in Russ.). <https://doi.org/10.56429/2414-4894-2022-39-1-5-35>
11. Yakovenko A.V. (Ed.). *Kartina narozhdayushchegosya mira: bazovye cherty i tendentsii (A Picture of the Emerging World: Basic Features and Trends)*: Report. Moscow; 2024, 62 p. (In Russ.).
12. Sadovnichiy V.A. (Ed.). *Preodolevaya predely rosta. Osnovnye položeniya doklada dlya Rimskogo kluba (Overcoming the Limits to Growth. Main Provisions of the Report to the Club of Rome)*: monograph. Moscow: Moscow University Press; 2023, 99 p. (In Russ.). ISBN 978-5-19-011875-9
13. Dynkin A.A. World order transformation: economy, ideology, technology. *Polis. Politicheskie issledovaniya = Polis. Political Studies*. 2024;5:8–23 (in Russ.). <https://doi.org/10.17976/jpps/2024.05.02>
14. Glaz'ev S.Yu., Bezrukov L.B., Dolgolaptev A.V., Larin N.V., Syvorotkin V.L., Fedorov V.M. Climate change and energy transition. *Ehkonomicheskie strategii*. 2023;6:16–29 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/ugbxrb>
15. Smirnov B.M. *Fizika global'noi atmosfery. Parnikovi ehffekt, atmosfernoe ehlektrichestvo, ehvolyutsiya klimata (Physics of Global Atmosphere. Greenhouse Effect, Atmospheric Electricity, Evolution of Climate)*. Moscow: Intellekt; 2017, 256 p. (In Russ.).
16. Riser S.C., Freeland H.J., Roemmich D., et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*. 2016;6:145–153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>
17. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*. 1960;12(2):200–203. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v12i2.9366>
18. Syvorotkin V.L. *Glubinnaya degazatsiya i global'nye katastrofy (Deep Degassing and Global Disasters)*. Moscow: Geoinformtsentr; 2002, 250 p. (In Russ.). ISBN 5-900357-80-5
19. Monin A.S., Sonechkin D.M. *Kolebaniya klimata po dannym nablyudenii. Troinoi solnechnyi i drugie tsikly (Climate Fluctuations Based on Observation Data. Triple Solar and Other Cycles)*. Moscow: Nauka; 2005, 190 p. (In Russ.).
20. Karpukhina N.N., Mityakov E.S., Pronin A.Yu. Industrial revolutions: From Industry 3.0 to Industry 5.0 in the context of the Russian economy. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):123–134. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-123-134>

#### Об авторах

**Рябченко Никита Юрьевич**, аспирант, ФГБОУ ВО Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова) (190005, Россия, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1). E-mail: [latempetedeneige@yandex.ru](mailto:latempetedeneige@yandex.ru). <https://orcid.org/0009-0001-9269-7612>

**Федоров Артем Павлович**, к.полит.н., доцент, кафедра КБ-2 «Информационно-аналитические системы кибербезопасности», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [z333e@yandex.ru](mailto:z333e@yandex.ru). SPIN-код РИНЦ 7872-8580, <https://orcid.org/0009-0004-1772-7254>

#### About the Authors

**Nikita Yu. Ryabtchenko**, Postgraduate Student, D.F. Ustinov Baltic State Technical University “Voenmeh” (1, 1-ya Krasnoarmeiskaya ul., Saint Petersburg, 190005 Russia). E-mail: [latempetedeneige@yandex.ru](mailto:latempetedeneige@yandex.ru). <https://orcid.org/0009-0001-9269-7612>

**Artem P. Fedorov**, Cand. Sci. (Polit.), Associate Professor, Department of Information and Analytical Systems of Cybersecurity, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: [z333e@yandex.ru](mailto:z333e@yandex.ru). RSCI SPIN-code 7872-8580, <https://orcid.org/0009-0004-1772-7254>

Мировоззренческие основы технологии и общества  
Philosophical foundations of technology and society

УДК 372.881.1  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-154-165>  
EDN VWGQAB



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Дидактическое моделирование обучения студентов технологического университета правилам чтения иноязычных текстов

Н.И. Чернова<sup>@</sup>,  
Е.А. Иванова,  
Н.В. Катахова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия  
<sup>@</sup> Автор для переписки, e-mail: [chernova@mirea.ru](mailto:chernova@mirea.ru)

• Поступила: 01.12.2025 • Доработана: 12.12.2025 • Принята к опубликованию: 27.03.2026

### Резюме

**Цели.** Целями работы являются разработка дидактических моделей процесса преподавания правил чтения французского языка, изучаемого студентами первого курса с нуля, и выбор оптимальной модели для дальнейшего использования в обучении.

**Методы.** Применение дидактических моделей, разработанных с привлечением таких инструментов, как регрессионный анализ, математическая теория обучения и эксперимент по применению полученных моделей в группах, обучающихся французскому языку с нуля.

**Результаты.** Для сравнения и анализа представлены 3 полученные модели изучения 48 правил чтения во французском языке в течение 4, 8 и 16 недель по 12, 6 и 3 правила за одно занятие, соответственно, с повторением правил, изученных на предыдущем занятии. Учитывалось также влияние различных индивидуальных факторов на эффективность всех 3 моделей (лингвистические способности студента, уровень тревожности, предыдущий опыт изучения языков и т.п.). В результате была выбрана оптимальная модель обучения.

**Выводы.** Среднестатистический студент эффективнее усвоил правила чтения при восьминедельном обучении, когда последующие 8 недель (до конца семестра) правила регулярно повторялись на каждом занятии. При изучении правил чтения в течение 16 недель студенты не успели повторить некоторый материал в конце семестра, меньше правил повторялось на занятиях. При четырехнедельном изучении студенты путали правила, плохо их запоминали из-за когнитивной перегрузки. При наличии неблагоприятных факторов (слабые способности и мотивация, отсутствие самостоятельной работы и т.п.) результаты обучения оказались низкими независимо от выбранной модели. Напротив, при благоприятных условиях (хорошие способности, мотивация и т.п.) оказалось, что модель обучения не играет решающей роли.

**Ключевые слова:** дидактическая модель, правила чтения, французский язык, технологический университет

**Для цитирования:** Чернова Н.И., Иванова Е.А., Катахова Н.В. Дидактическое моделирование обучения студентов технологического университета правилам чтения иноязычных текстов. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):154–165. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-154-165>, <https://www.elibrary.ru/VWGQAB>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Didactic modeling for teaching technological university students the rules of foreign language texts reading

Nadezhda I. Chernova<sup>®</sup>,  
Ekaterina A. Ivanova,  
Nataliya V. Katakhova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia  
<sup>®</sup> Corresponding author, e-mail: [chernova@mirea.ru](mailto:chernova@mirea.ru)

• Submitted: 01.12.2025 • Revised: 12.12.2025 • Accepted: 27.03.2026

### Abstract

**Objectives.** The work set out to develop didactic models for teaching French reading rules to first-year students from scratch, followed by a choice of the appropriate model to use in teaching.

**Methods.** The application of didactic models developed using tools such as regression analysis and mathematical theory of learning along with an experiment on the application of the obtained models in groups of French language learners “from scratch.”

**Results.** Three obtained models of studying 48 French reading rules over 4, 8, and 16 weeks with 12, 6, and 3 rules per lesson respectively, along with a review of the rules learned in the previous lesson, are presented for comparison and analysis. The influence of various factors such as students’ linguistic abilities, their levels of anxiety, previous language learning experience, etc., on the effectiveness of all three models were also taken into account. Based on the results of these analyses, the optimal learning model was chosen.

**Conclusions.** The average student learned reading rules more efficiently during an eight-week course when the rules were regularly reviewed at each lesson until the end of the semester. When studying reading rules for 16 weeks, students failed to review some material at the end of the semester, with fewer rules being reviewed in lesson. During a four-week study, students confused the rules and had difficulties to remember them due to cognitive overload. In the presence of adverse factors (weak ability and motivation, lack of independent work, etc.) training results were low regardless of the model chosen. On the contrary, under favorable conditions (good abilities, motivation, etc.) the learning model was turned out to be unimportant.

**Keywords:** didactic model, reading rules, French language, technological university

**For citation:** Chernova N.I., Ivanova E.A., Katakhova N.V. Didactic modeling for teaching technological university students the rules of foreign language texts reading. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):154–165. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-154-165>, <https://www.elibrary.ru/VWGQAB>

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

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная образовательная парадигма претерпевает трансформацию, заключающуюся в комплексном и скоординированном преобразовании ключевых аспектов обучения, в т.ч. целей обучения, учебных программ, методов организации занятий, структуры учебной деятельности. С одной стороны, происходит цифровая трансформация, под которой понимаются интеграция цифровых технологий, создание цифровых образовательных платформ, внедрение искусственного интеллекта в процесс преподавания с целью оптимизации управления образовательными процессами [1–3]. С другой стороны, построение математических и дидактических моделей, в т.ч. замещающих экспериментальное исследование, внедрение математических методов и методов дидактического моделирования в гуманитарные науки означает трансформацию профессиональной подготовки в вузах, что представляется особенно актуальным при обучении иностранным языкам в технических вузах, где образовательный акцент делается на изучении профилирующих дисциплин, и расчет структуры учебного плана, рабочей программы, учебных материалов, математически выверенное прогнозирование результатов обучения для каждой учебной группы, каждого обучающегося призваны оптимизировать как процесс преподавания, так и изучения иностранного языка. Современные дидактические модели предоставляют эквивалентное описание объектов, их связей и динамики, а также параметров функциональных зависимостей. Таким образом, дидактическое моделирование дает инструменты для объективного оценивания и моделирования обучения иностранным языкам.

Целью данной статьи является моделирование процесса преподавания правил чтения французского языка, изучаемого студентами первого курса с нуля, и определение оптимальной модели.

В качестве основного метода исследования выступает применение дидактических моделей, для разработки которых задействованы, в т.ч. регрессионный анализ и математическая теория обучения. Полученные таким образом модели прошли экспериментальную проверку в разных группах студентов РТУ МИРЭА, приступивших к изучению французского языка.

Авторами работы не выявлено формально-логических педагогических исследований, сопоставимых с предложенной ими моделью, что свидетельствует о новизне данного исследования.

Практическая значимость проведенного исследования состоит в перспективе управления образовательной работой обучающихся в технологическом университете, выборе оптимальной образовательной

траектории. Это достигается за счет анализа влияния различных параметров на процесс обучения и за счет выявления их взаимосвязей.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследование осуществлялось в рамках учебной аналитики, нацеленной на изучение учебного процесса и качества обучения. В опубликованных ранее работах учебная аналитика рассматривается лишь с точки зрения применения информационных платформ [1], актуальной информационной поддержки для преподавателя и обучаемых, оценки успешности последних [4], разработки информационных систем, прогнозирующих академическую успеваемость студентов по трем параметрам [5]. Цифровая трансформация образования подразумевает использование учебной аналитики для создания системы управления образовательным процессом [1, 3]. В рассматриваемом случае пример подобной системы основан на математических выкладках, которые в дальнейшем можно перевести в цифровой формат и разместить на учебных платформах вузов. При построении модели как в случае реализации информационных платформ, так и математических расчетов учитываются различные типы данных, которые могут быть постоянными и переменными. Именно на их основе строится система управления образовательным процессом, разрабатываются инструменты учебной аналитики, что приводит к выбору оптимальных учебных планов и рабочих программ.

В работах [6–8] представлены разработанные математические и компьютерные модели исследования образовательного процесса, основанные на общей теории систем и аксиомах математической теории обучения. Моделирование слабо формализованных систем, охватывающих аспекты подбора учебных ресурсов, педагогических методик и критериев оценки их результативности, возможно исключительно в рамках нечеткого когнитивного моделирования [8–10].

Имеются работы, посвященные стохастической модели, в которой вероятность данных может меняться<sup>1</sup>. В этой работе также представлены методы оценки параметров этой модели и примеры ее применения к различным типам данных, связанных с процессом обучения.

В работе [10] дается описание алгоритмов для создания учебных материалов, модели обучения на их основе, а также программы «Траектория

<sup>1</sup> Bush R.R., Mosteller F.A. *Stochastic Model with Applications to Learning*. [https://projecteuclid.org/download/pdf\\_1/euclid.aoms/1177728914](https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.aoms/1177728914). Дата обращения 24.04.2024. / Accessed April 24, 2024.

обучения» для любой дисциплины и «Траектория группы». Кроме того, работа позволяет ознакомиться с процессом обучения преподавателей по использованию методов математического моделирования.

В обзоре Е.М. Тишиной [11] отмечается, что учебный процесс представляет сложную систему, обусловленную многочисленными и постоянно меняющимися факторами, что требует постоянной корректировки применяемых методик при помощи определенного алгоритма и математических моделей, которые автор считает необходимыми проверять экспериментально, поскольку модели «не могут быть абсолютно адекватны объекту». Для эффективного выбора и составления математической модели обучения автор рекомендует применять аналитические методы, разработанные в рамках теории графов.

Исследователи В.Г. Кирий и Чан Ван Ан [6] предлагают математическую модель, предназначенную для изучения процесса освоения иностранного языка. Эта модель, основанная на уравнениях Колмогорова, устанавливает зависимость уровня владения языком студентом от его начальной подготовки, скорости изучения и скорости забывания.

В исследовании Р.В. Майера [7] дан достаточно подробный анализ системы взаимодействия «преподаватель – обучаемые», изучены как линейные, так и нелинейные подходы к моделированию обучения, а также модели, описывающие процесс усвоения знаний и последующей потери информации.

Исследование [12] иллюстрирует описание учебного процесса математическими методами. В нем детально рассмотрены ключевые факторы, такие как обучаемость студентов, профессиональная компетентность преподавателей и т.п. Автор выявила взаимосвязи между этими факторами, например, между техническим оснащением и организацией учебного материала. Что касается исходных параметров, то значимым, на наш взгляд, представляется определение и анализ обучаемости студентов, отраженные в исследовании [13]. Данный параметр, благодаря созданному и продуктивно реализованному авторами входному тесту, можно рассматривать как «четкую» переменную, в отличие от большинства параметров в гуманитарных дисциплинах.

Е.Д. Reichle [9] разработал вычислительные модели, которые содействуют пониманию когнитивных процессов, участвующих в распознавании слов, анализе предложений, построении связного текста и управлении движениями глаз.

О. Varack, M.D. Tsodyks [14] демонстрируют различные типы обучения (классическое обусловливание, ассоциативная память, свободное запоминание) на конкретных примерах. В работе рассматриваются

уровни моделирования и их связь с эмпирическими данными и математическими концепциями, которые часто встречаются в моделях обучения, с точки зрения оптимизации. Важно отметить, что данная работа относится к области нейромоделирования, а не чисто математического моделирования.

В исследовании [15] предложена математическая модель, оценивающая полноту усвоенных знаний по всем темам курса и динамику изучения учебных элементов за определенный период. Также представлен проект поэтапной организации учебной деятельности студентов.

В исследовании, представленном в работе [16], дан анализ различных моделей обучения в контексте длительного наблюдения. Результаты показали, что некоторые когнитивные способности могут сохраняться даже при отсутствии регулярной практики. Однако в данном исследовании акцент сделан на психологическое моделирование обучения.

В статье [17] отражено, как усреднение индивидуальных кривых обучения и забывания трансформирует общие кривые, что подводит нас к выводу о том, что скорость обучения может следовать различным распределениям. Авторы анализируют смещение этих распределений, чтобы исключить случаи низкой скорости обучения.

В работе [18] для изучения интеллектуального адаптивного обучения используется граф знаний, который интерпретируется в качестве ведущего инструмента для приобретения, управления и оптимизации учебного процесса. Предлагается модель графа знаний по типу «знания – ресурсы – цели», основанная на прочной связи между знаниями, учебными материалами и образовательными задачами. Автором также заявлена двунаправленная модель, учитывающая как долговременную, так и кратковременную память. Исследование подтверждает, что такая модель успешно адаптируется под цели обучения, перестраивает знания и ресурсы, оптимизирует учебные траектории, предлагает рекомендации по выбору материалов и визуализирует когнитивное состояние обучающихся, тем самым повышая эффективность интеллектуального адаптивного обучения.

В статье [19] предложена система персонализированных рекомендаций, основанная на предметных графах знаний, профилях обучающихся (полученных с помощью xAPI<sup>2</sup>) и обратной связи по процессу обучения.

<sup>2</sup> Experience Application Programming Interface – стандарт обмена данными между учебным контентом и системами дистанционного обучения. [Experience Application Programming Interface is a standard for data exchange between educational content and distance learning systems.]

Работа [20] посвящена решению проблемы разнообразия генеративных языковых теорий путем применения формальных математических методов к анализу языка.

Одной из задач в исследовании [21] стало выявление связей между факторами, которые побуждают студентов продолжать изучать язык. Для проверки выдвинутых предположений и подтверждения состоятельности предложенной модели использовался метод множественного линейного регрессионного анализа. В рамках этого анализа математически моделируются такие аспекты, как «соответствие учебных материалов и технологий целям обучения и доступным технологиям», «согласованность используемых технологий с индивидуальными предпочтениями учащихся», «открытость и авторитет образовательных учреждений, предлагающих мультимодальное языковое обучение», «личные вложения студентов в мультимодальное языковое образование».

Работа<sup>3</sup> посвящена разработке следующих тем: «Алгоритмы обучения языку с использованием подкрепления», «Асимметрия различий в процессе освоения языка между взрослыми и детьми», «Математическое моделирование языкового развития в рамках популяции».

В статье [22] представлена математическая модель, в которой исследуется влияние образовательных программ. В частности, рассматривается модель изучения английского языка студентами университетов, учитывающая такие переменные, как общее количество обучаемых; количество обучаемых, выбравших современный формат обучения; количество обучаемых, выбравших традиционный формат обучения; количество обучаемых, успешно завершивших курс. Результаты анализа данной модели указывают на то, что попытки решить проблемы в образовании могут привести к неожиданным негативным последствиям, таким как обратная бифуркация и усложнение ситуации, что подразумевает возможность сохранения существующих образовательных проблем.

В статье [23] рассматривается математическая модель, основанная на множественном линейном регрессионном анализе. Эта модель устанавливает взаимосвязи между применяемыми стратегиями изучения языка и уровнем владения английским языком. Изучение модели показало, что для точного прогнозирования уровня владения языком не обязательно включать в модель все существующие стратегии изучения языка.

В логике системно-структурного подхода в работе [24] рассматриваются количественные характеристики учебного процесса: обученность, состояние системы, степень обученности, точность обучения. Предложенная математическая модель процесса обучения реализуется с использованием программных средств.

Программные средства, разработанные и заявленные в [25] для моделирования преподавания иностранного языка, анализируют, прогнозируют, контролируют уровень владения неродным языком, находят приближения к параметрам математической модели процесса обучения иностранному языку, строят график прогрессивного изменения вероятностей трех выбранных авторами состояний, дают возможность проводить тестирование с различными параметрами, чтобы оптимизировать их значения для достижения целевого уровня владения иностранным языком.

В статье [26] авторы предлагают выявлять ранее неизвестные лингвистические особенности, которым нужно приписать определенные формальные признаки, создавать алгоритмы обучения с подкреплением для обучения разговорному языку.

К сожалению, как и в большинстве подобных исследований, в упомянутых работах рассматриваются математические модели обучения в общем виде, без их конкретного применения к процессу изучения иностранных языков.

Среди имеющихся исследований представлены также алгоритмы и модели, работающие в области изучения процесса освоения иностранного языка<sup>4</sup> [6, 21, 22, 26]. Однако данные работы определяют уровень владения иностранным языком, мотивацию, языковое развитие и не затрагивают специфические модели преподавания конкретных тем в рамках изучения иностранных языков вообще, и французского языка в частности.

Таким образом, анализ показал, что проводятся многочисленные исследования в области моделирования образовательных процессов, которые призваны строго формализовать размытые дидактические понятия, объекты, категории. Отметим, что в ряду рассмотренных работ нет дидактической модели, построенной на базе обучения правилам чтения во французском языке, призванной выявлять оптимальные время их изучения и объем материала, изучаемого за одно занятие.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования в качестве примера моделирования образовательных процессов

<sup>4</sup> Там же.

<sup>3</sup> Rische J.L. *Mathematical Modeling of Language Learning: Dissertation*. University of California. Irvine. 2014, 89 p. <https://escholarship.org/uc/item/0kb837r3>. Дата обращения 17.08.2024. / Accessed August 17, 2024.

послужили правила чтения, преподаваемые студентам первого курса всех направлений подготовки РГУ МИРЭА, изучающим французский язык с нуля.

Методами исследования послужили регрессионный анализ данных<sup>5</sup> (количество правил чтения, изучаемых за одно занятие; количество повторяемых правил чтения на занятии; обучаемость конкретного контингента студентов) и построение дидактической модели выбора оптимального количества правил, изучаемых за одно занятие, и общего количества занятий, посвященных изучению правил и их повторению определенным контингентом обучающихся. Таким образом, данная дидактическая модель описывает соотношение переменных и зависимость между ними.

Необходимо признать, что педагогические структуры обладают вероятностной природой и зависят от множества параметров, не поддающихся полному, строгому и объективному описанию [15]. Следовательно, предложенная в данной работе модель основывается лишь на самых существенных характеристиках системы учебной деятельности.

### ПОСТРОЕНИЕ ДИДАКТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Разработка дидактической модели, описывающей правила произношения во французском языке, представляет собой непростую задачу. Основная трудность заключается в существенном расхождении между написанием и звучанием слов. Цель модели – формализовать правила соответствия между графическими элементами и фонетическими единицами.

Были созданы правила вида:

$$L_n + (L_{n+1} (+L_{n+2})) = S_m (+S_k),$$

где  $L_n$  ( $L$  от Lettre – буква) – первый графический элемент в буквосочетании,  $L_{n+1}$  – второй графический элемент,  $L_{n+2}$  – третий графический элемент, если три графических элемента создают буквосочетание, читающееся особым способом;  $S_{m/k}$  ( $S$  от Son – звук) – фонетическая единица (реже сочетание фонетических единиц), соответствующая одному или двум звукам. Например,  $L_1 = S_1$ :  $\zeta = [s]$ ;  $L_2 + L_3 + L_4 = S_2$ :  $eau = [o]$ ;  $L_3 + L_4 = S_2$ :  $au = [o]$ ;  $L_5 + L_6 = S_3 + S_4$ :  $oi = [wa]$ ;  $L_2 + L_7 + L_8 = S_0$ :  $-ent$  как окончание глаголов, стоящих в 3-м лице

<sup>5</sup> Дьячук А.А. *Математические методы в психологических и педагогических исследованиях: учебное пособие*. Красноярск; 2013, 347 с. [Dyachuk A.A. *Mathematical Methods in Psychological and Pedagogical Research. Study Guide*. Krasnoyarsk; 2013, 347 p. (In Russ.).]

множественного числа, никак не произносится, т.е.  $S_0$  – отсутствие звуков.

После предъявления обучающимся какого-либо правила чтения из 48 проводится проверка его усвоения. При отсутствии усвоения правило повторяется на всех следующих занятиях.

При моделировании рассматриваемой дидактической ситуации в данной работе исследуется модель обучения правилам написания и произношения французских графем и их сочетаний при изменении лишь одной переменной – количества изучаемых правил за одну неделю. Прочие параметры, связанные с характеристиками преподавателя, учебными материалами, психологическими и мнемоническими особенностями студентов и т.д., в работе не рассматриваются. Однако данная переменная представляется наиболее весомой при обучении на начальном этапе, поскольку, с одной стороны, без достаточно быстрого освоения правил чтения невозможно эффективное продвижение по учебному плану, с другой стороны, среднестатистическая человеческая память обычно не способна одновременно воспринимать и переводить в долговременную память большие объемы информации. Гипотеза состояла в том, что студентов технологического вуза, имеющих технический склад ума и имеющих лингвистическую память хуже, чем гуманитарии, тем более следует обучать медленнее, подавать правила порционно. Расчеты в данном случае заключались в том, чтобы найти оптимальное количество занятий и порций преподаваемых правил чтения контингенту студентов первого курса РГУ МИРЭА. На рис. 1 описаны шаги, в соответствии с которыми происходит обучение фонетике и чтению. Правило  $R_n$  ( $R$  от Règle) – правило номер  $n$  из списка, состоящего из 48 правил.

На каждом  $i$ -м занятии изучается  $q$  правил и повторяется  $q \cdot i$  правил, за исключением первого занятия, на котором ни одно правило не повторяется, а только изучается первый пул правил. Данная формула действует до тех пор, пока не будут изучены все правила, поскольку далее до конца семестра обучающиеся лишь повторяют ранее изученное.

Для определения оптимальной модели процесса обучения, связанного с освоением норм произнесения буквосочетаний французского языка, были исследованы эффекты трех дидактических ситуаций: интенсивное изучение всех 48 правил за 4 недели, медленное – в течение всего семестра и изучение в среднем темпе – в течение половины семестра. Более эффективной считалась та модель, при реализации которой процент корректных ответов при прочтении французских слов было наибольшим по сравнению с другими моделями.



Рис. 1. Последовательность шагов для изучения правил чтения

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Модель 1. При обучении французским нормам произнесения определенных сочетаний графем в течение половины семестра на каждом занятии дается 6 новых правил, а на следующем они повторяются наряду с изучением еще 6 новых, и так до исчерпания всех правил чтения. Как следует из рис. 2, на девятом занятии, т.е. после изучения всех 48 правил и повторений большинства из них, среднестатистический обучающийся еще недостаточно хорошо осваивает нормы прочтения буквосочетаний. Каждое следующее занятие повышает процент корректных ответов студентов при прочтении слов, содержащих то или иное сочетание графем, произносимых особым образом. Таким образом, к концу семестра успешность освоения правил выросла до 93%.

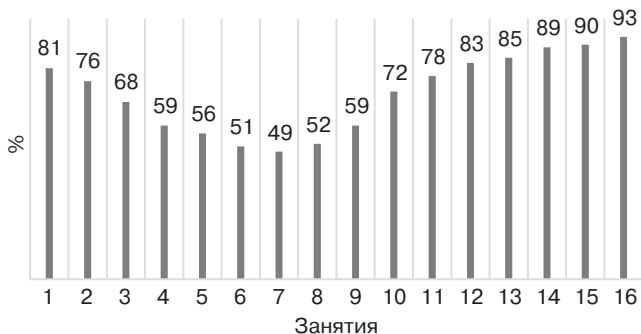


Рис. 2. Процент корректных ответов на занятиях за семестр при изучении по 6 правил в течение 8 недель

Модель 2. При интенсивном обучении французским нормам произнесения определенных сочетаний графем в течение четверти семестра на каждом

занятии дается 12 новых правил, а на следующем они повторяются наряду с изучением еще 12 новых, и так до исчерпания всех правил чтения. Как следует из рис. 3, на пятом занятии достаточно плохо освоены нормы прочтения буквосочетаний. Каждое следующее занятие опять же повышает процент корректных ответов студентов, поскольку все правила повторяются многократно. Таким образом, к концу семестра успешность освоения правил выросла до 81%.

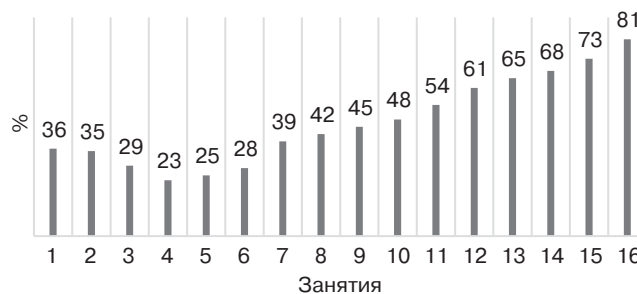


Рис. 3. Процент корректных ответов на занятиях за семестр при изучении по 12 правил в течение 4 недель

Модель 3. При медленном обучении французским нормам произнесения определенных сочетаний графем в течение всего семестра на каждом занятии дается 3 новых правила, а на следующем они повторяются наряду с изучением еще 3 новых, и так до конца семестра. Таким образом, последние 3 правила изучаются на самом последнем в семестре занятии, вследствие чего они не могут быть повторены на следующих занятиях. Как следует из рис. 4, к концу семестра, несмотря на многократные повторения ряда правил, не все правила могли быть полностью усвоены, что привело к тому, что общее количество правильных ответов не достигло требуемого уровня.

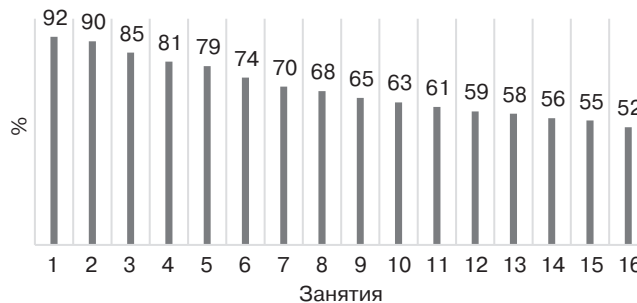


Рис. 4. Процент корректных ответов при изучении по 3 правила в течение 16 недель

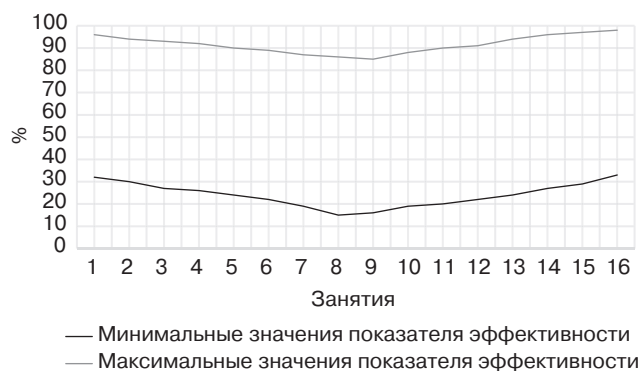
Таким образом, интенсивное и медленное обучение в условиях неязыкового вуза привело к меньшей результативности в конце семестра. Правильно читать научилось меньшее количество обучающихся, чем при средней скорости обучения,

т.е. при преподнесении всех правил в течение первой половины семестра и повторении их в течение второй половины семестра.

Предложенные модели иллюстрируют усредненные данные в отношении обучения французскому языку на начальном этапе в РТУ МИРЭА. Однако следует учитывать высокую вариативность как индивидуальных траекторий обучения, так и среднего уровня в рамках конкретной группы, поскольку, как показывает опыт, все группы имеют разный уровень, разные характеристики. Эта вариативность детерминирована рядом факторов ( $F$ ), среди которых когнитивно-лингвистические способности, психологические особенности личности, мотивационные установки, объем учебной нагрузки, условия образовательного процесса и т.п. [14]. В рамках построения прогностически корректной модели усвоение учащимся правил чтения французского языка будет определяться аддитивной суммой влияния всех возможных факторов и уровня освоения каждого конкретного правила. Следовательно, показатель эффективности занятия (рис. 5) выражается в количестве корректных ответов, зафиксированных по итогам освоения правил чтения, в соответствии с формулой:

$$Ef = \sum_{i=1}^n F_i + \sum_{R=1}^m Z_R,$$

где  $F_i$  – один из  $n$  значимых факторов, характеризующих возможности студентов к освоению норм чтения и произнесения сочетаний французских графем;  $Z_R$  – накопленные знания обучающимся  $N$  в отношении норм чтения (правила  $R$  с 1 по  $m$ ).



**Рис. 5.** График эффективности занятий, отображающий процент корректных ответов за 16 недель в зависимости от показателя эффективности при использовании модели 1

## ВЫВОДЫ

Оптимальным подходом к обучению французскому языку для начинающих оказалась программа, в рамках которой правила чтения преподаются только в первой половине семестра, а затем регулярно повторяются на каждом занятии до конца.

Исследование показало, что студенты, обучавшиеся по этой модели, усвоили материал лучше, чем те, кто учился в соответствии с двумя другими схемами – медленным изучением на протяжении всего семестра и интенсивным изучением всех правил в течение четырех занятий.

В первом случае, из-за растянутого во времени изучения, студенты не успели повторить некоторый материал в конце семестра, меньше правил повторялось на занятиях. Так, например, правила 1, 2 и 3 практиковались весь семестр во всех вариантах, правила 46, 47 и 48 практиковались немногим более половины семестра при изучении правил в течение 8 недель и всего лишь во время одного занятия при изучении правил в течение всего семестра.

Во втором случае, интенсивное изучение приводило к путанице правил и когнитивной перегрузке, итогом которого стало ухудшение запоминания [27].

Более того, важно учитывать, что на эффективность обучения влияют различные факторы [28], такие как:

1. Интеллектуальные и лингвистические способности студента.
2. Уровень тревожности и адаптивности.
3. Скорость восприятия информации.
4. Мотивация (внутренняя и внешняя).
5. Размер группы.
6. Расписание занятий.
7. Объем самостоятельной работы.
8. Предыдущий опыт изучения языков.

При наличии неблагоприятных факторов (слабые способности, высокая тревожность и т.д.) результаты обучения оказались низкими независимо от выбранной модели. Напротив, при благоприятных условиях (хорошие способности, мотивация и т.д.) модель обучения не играет решающей роли.

Учитывая средний уровень студентов, восьминедельная модель (с изучением правил в первой половине семестра и последующим повторением) оказалась наиболее эффективной, так что ее можно рекомендовать для использования в учебном процессе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретико-практическая значимость проведенного исследования состоит в решении поставленных задач и аргументированных выводах по его результатам:

- 1) определены переменные для формализации образовательного процесса;
- 2) выбраны варианты моделей, приемлемых для оценки учебных аспектов обучения французскому языку в условиях технологического вуза;
- 3) проанализированы определенные модели, описывающие процесс освоения норм произнесения французских буквосочетаний;

4) показано, что оптимальной при изучении норм произнесения французских буквосочетаний является такая модель, когда все правила студенты изучают за 8 занятий с повторениями на последующих занятиях.

Дидактическое моделирование элементов учебного процесса позволяет оптимально планировать учебную деятельность студентов, в т.ч. и по иностранному языку. Создание ряда моделей, охватывающих все потенциальные объекты, концепции, формы, характеристики, закономерности, параметры, категории, факторы обучения, и обобщение полученных результатов позволяют модернизировать учебные программы и планы, методы и технологии.

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение потенциала созданной методики как базы для разработки дидактических, математических и компьютерных моделей иных тематических блоков учебного плана, универсальных,

адаптивных и эффективных форм, методов и технологий преподавания иностранных языков в неязыковых образовательных учреждениях.

#### Вклад авторов

**Н.И. Чернова** – обоснование концепции исследования, разработка алгоритма экспериментальной работы, обобщение результатов исследования.

**Е.А. Иванова** – анализ и обобщение литературы, изучение российских и зарубежных публикаций по проблеме, написание рукописи.

**Н.В. Катахова** – формулирование выводов, интерпретация результатов исследования.

#### Authors' contributions

**N.I. Chernova** – justification for the study concept, developing the experimental work algorithm, research findings synthesis.

**E.A. Ivanova** – analysis and synthesis of the literature, study of Russian and foreign publications on the issue, drafting the manuscript.

**N.V. Katakhova** – formulation of the conclusions, interpretation of the study results.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кытманов А.А., Горелова Ю.Н., Зыкова Т.В., Пихтилькова О.А., Пронина Е.В. Концептуальный подход к цифровой трансформации образовательного процесса в вузе. *Russian Technological Journal*. 2024;12(5):98–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-98-110>
2. Сысоев П.В. Персонализированное обучение на основе технологий искусственного интеллекта: насколько готовы современные студенты к новым возможностям получения образования. *Высшее образование в России*. 2025;34(2): 51–71. <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2025-34-2-51-71>
3. Воног В.В. Цифровая трансформация системы иноязычной подготовки в процессе обучения студентов инженерного профиля. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Проблемы языкознания и педагогики*. 2024;2:150–162. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-sistemy-inoyazychnoy-podgotovki-v-protse-ss-obucheniya-studentov-inzhener-nogo-profilya>. Дата обращения 24.04.2026.
4. Teasley S.D., Kay M., Elkins S., Hammond J. User-Centered Design for a Student-Facing Dashboard Grounded in Learning Theory. In: Sahin M., Ifenthaler D. (Eds.). *Visualizations and Dashboards for Learning Analytics. Advances in Analytics for Learning and Teaching*. Cham, Switzerland: Springer; 2021. P. 191–212. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81222-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81222-5_9)
5. Arnold K.E., Pistilli M.D. Course Signals at Purdue: Using learning analytics to increase student success. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge (LAK'12)*. 2012. P. 267–270. <https://doi.org/10.1145/2330601.2330666>
6. Кирий В.Г., Чан Ван Ан. Об одной математической модели амбивалентной системы обучения неродному языку. *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии (Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии)*. 2010;8(1):45–53. <https://www.elibrary.ru/lalalb>
7. Майер Р.В. Применение математических и компьютерных моделей в теории обучения. В сб: *Теория и практика педагогической деятельности: эксперименты и инновации*: сборник материалов XVII Международной очно-заочной научно-практической конференции. М.: НИЦ «Империя»; 2019. С. 79–88. <https://elibrary.ru/rfbiii>
8. Флегонтов А.В., Дюк В.А., Фомина И.К. Мягкие знания и нечеткая системология гуманитарных областей. *Программные продукты и системы*. 2008;3:97–102. <https://elibrary.ru/jwdpvt>
9. Reichle E.D. *Computational Models of Reading: A Handbook*. Oxford University Press; 2021, 608 p.
10. Киселева О.М. Использование математических методов для формализации элементов образовательного процесса. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2013;2:51–57. <https://elibrary.ru/pvxpov>
11. Тишина Е.М. Методологические основы использования принципов математического моделирования в учебном процессе. *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2018;5(18):28–33. <https://elibrary.ru/xwezcx>
12. Найниш Л.А., Тишина Е.М. Повышение эффективности процесса обучения методами математического моделирования. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2008;2:27–31. <https://elibrary.ru/ujxnbd>
13. Чернова Н.И., Иванова Е.А., Богуш Н.Б., Катахова Н.В. Технология определения когнитивно-психологических особенностей студентов негуманитарного вуза. *Russian Technological Journal*. 2023;11(3):104–116. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-104-116>

14. Barak O., Tsodyks M. Mathematical models of learning and what can be learned from them. *Curr. Opin. Neurobiol.* 2023;80:102721. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2023.102721>
15. Куликова О.В., Чуев Н.П. Проектирование учебного процесса на основе математического моделирования качества освоения дидактических единиц. *Фундаментальные исследования.* 2014;8-7:1658–1662. <https://elibrary.ru/swoibv>
16. Kumar A., Benjamin A.S., Heathcote A., Steyvers M. Comparing models of learning and relearning in large-scale cognitive training data sets. *npj Sci. Learn.* 2022;7(1):24. <https://doi.org/10.1038/s41539-022-00142-x>
17. Murre J.M.J. How averaging individual curves transforms their shape: Mathematical analyses with application to learning and forgetting curves. *J. Math. Psychology.* 2023;117(5):102816. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2023.102816>
18. Zhu Y. A knowledge graph and BiLSTM-CRF-enabled intelligent adaptive learning model and its potential application. *Alexandria Eng. J.* 2024;91:305–320. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.011>
19. Duan S., Chen K., Yang Y., Shi S. Research on Personalized Learning Recommendation Based on Subject Knowledge Graphs and Learner Portraits. In: Gan J., Pan Y., Zhou J., Liu D., Song X., Lu Z. (Eds.). *Computer Science and Educational Informatization. CSEI 2023. Communications in Computer and Information Science.* 2024. V. 1900. P. 367–374. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-9492-2\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-99-9492-2_31)
20. O'Donnell T.J., Hauser M.D., Tecumseh Fitch W. Using mathematical models of language experimentally. *Trends in Cogn. Sci.* 2005;9(6):284–289. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.04.011>
21. Huang Y., Xu W., Sukjairungwattana P., Yu Zh. Learners' continuance intention in multimodal language learning education: An innovative multiple linear regression model. *Heliyon.* 2024;10(6):e28104. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28104>
22. Ghasemabadi A., Soltanian N. Qualitative properties of mathematical model of English language education. *Adv. Differ. Equations.* 2021;2021:15. <https://doi.org/10.1186/s13662-020-03180-0>
23. Kiram J.J., Sulaiman J., Swanto S., Din W.A. Modeling the language learning strategies and English language proficiency of pre-university students in UMS. A case study. *AIP Conf. Proc.* 2015;1682(1):050004. <https://doi.org/10.1063/1.4932495>
24. Аскарова А.Х., Светлов М.С., Светлова М.К. Математическая модель процесса обучения иностранным языкам. В сб.: *Проблемы управления, обработки и передачи информации: сборник трудов IV Международной научной конференции в 2 т. Саратов, 22–25 сентября 2015 г. Т. 2.* Саратов: Райт-Экспо; 2015, с. 199–204. <https://elibrary.ru/woxvhh>
25. Лэ В.Х., Черненькая Л.В., Нгуен Т.Т.З. *Программа решения обратной задачи восстановления параметров в математической модели процесса обучения неродному языку: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617166* Российская Федерация. Заявка № 2023615774: заявл. 29.03.2023; опубл. 06.04.2023.
26. Ухова Т.В., Ухов А.В. Обзор математических моделей обучения иностранному языку. В сб.: *Современные тенденции в преподавании иностранных языков в неязыковом вузе: Сборник статей XVII Всероссийской научно-методической конференции с международным участием.* Красноярск, 18 мая 2023 г. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева; 2023. С. 89–93.
27. Иванова Е.А. Регулирование когнитивной нагрузки при обучении иностранному языку в технологическом вузе. *Мир науки. Педагогика и психология.* 2024;12(1). URL: <https://mir-nauki.com/PDF/73PDMN124.pdf>. Дата обращения 24.04.2026.
28. Богущ Н.Б., Иванова Е.А. Трудности формирования иноязычных компетенций студентов технологического вуза, обусловленные лингвистическими факторами. *Образование и право.* 2023;3:230–238. <https://doi.org/10.24412/2076-1503-2023-3-230-238>

## REFERENCES

1. Kytmanov A.A., Gorelova Yu.N., Zykova T.V., Pikhilokova O.A., Pronina E.V. A conceptual approach to digital transformation of the educational process at a higher education institution. *Russian Technological Journal.* 2024;12(5):98–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-98-110>
2. Sysoev P.V. Personalized Learning Based on Artificial Intelligence: How Ready Are Modern Students for New Educational Opportunities. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia.* 2025;34(2):51–71 (in Russ.). <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2025-34-2-51-71>
3. Vonog V.V. Digital transformation of the foreign language training system in terms of educating students of engineering profile. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Problemy yazykoznanija i pedagogiki (Vestnik PNIPU. Problemy yazykoznanija i pedagogiki) = PNRPU Linguistics and Pedagogy Bulletin.* 2024;2:150–162 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-sistemy-inojazychnoy-podgotovki-v-protssesse-obucheniya-studentov-inzhenerenogo-profilya>. Accessed April 24, 2026.
4. Teasley S.D., Kay M., Elkins S., Hammond J. User-Centered Design for a Student-Facing Dashboard Grounded in Learning Theory. In: Sahin M., Ifenthaler D. (Eds.). *Visualizations and Dashboards for Learning Analytics. Advances in Analytics for Learning and Teaching.* Cham, Switzerland: Springer; 2021. P. 191–212. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81222-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81222-5_9)
5. Arnold K.E., Pistilli M.D. Course Signals at Purdue: Using learning analytics to increase student success. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge (LAK'12).* 2012. P. 267–270. <https://doi.org/10.1145/2330601.2330666>
6. Kiriya V.G., Chan Van An. About one Mathematical Model of Ambivalent System of Teaching in the Foreign Language. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies.* 2010;8(1):45–53 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/lalalb>

7. Mayer R.V. Application of Mathematical and Computer Models in Learning Theory. In: *Theory and Practice of Pedagogical Activity: Experiments and Innovations*: Proceedings of the 17th International In-Person and Correspondence Scientific and Practical Conference. Moscow: 2019. P. 79–88 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rfbiii>
8. Flegontov A.V., Dyuk V.A., Fomina I.K. Soft Knowledge and Fuzzy Systemology of the Humanities. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2008;3:97–102 (in Russ.). <https://elibrary.ru/jwdpvt>
9. Reichle E.D. *Computational Models of Reading*: A Handbook. Oxford University Press; 2021, 608 p.
10. Kiseleva O.M. Mathematical Methods to Formalize Elements of the Educational Process. *Kontsept = Concept*. 2013;2:51–57 (in Russ.). <https://elibrary.ru/pvxpov>
11. Tishina E.M. Methodological Basis of the Principles of the Mathematical Model in the Learning Process. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovatsii = Education and Science in the Modern World. Innovations*. 2018;5(18):28–33 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xwezcx>
12. Nainish L.A., Tishina E.M. Improvement of Training Process Efficiency by Mathematical Modeling Methods. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2008;2: 27–31 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ujxnbx>
13. Chernova N.I., Ivanova E.A., Bogush N.B., Katakova N.V. Technology for determining non-humanities university students' cognitive-and-psychological characteristics. *Russian Technological Journal*. 2023;11(3):104–116. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-104-116>
14. Barak O., Tsodyks M. Mathematical models of learning and what can be learned from them. *Curr. Opin. Neurobiol*. 2023;80:102721. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2023.102721>
15. Kulikova O.V., Chuev N.P. Learning process planning with the help of mathematical modeling the quality study. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2014;8-7:1658–1662 (in Russ.). <https://elibrary.ru/swoibv>
16. Kumar A., Benjamin A.S., Heathcote A., Steyvers M. Comparing models of learning and relearning in large-scale cognitive training data sets. *npj Sci. Learn*. 2022;7(1):24. <https://doi.org/10.1038/s41539-022-00142-x>
17. Murre J.M.J. How averaging individual curves transforms their shape: Mathematical analyses with application to learning and forgetting curves. *J. Math. Psychology*. 2023;117(5):102816. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2023.102816>
18. Zhu Y. A knowledge graph and BiLSTM-CRF-enabled intelligent adaptive learning model and its potential application. *Alexandria Eng. J*. 2024;91:305–320. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.011>
19. Duan S., Chen K., Yang Y., Shi S. Research on Personalized Learning Recommendation Based on Subject Knowledge Graphs and Learner Portraits. In: Gan J., Pan Y., Zhou J., Liu D., Song X., Lu Z. (Eds.). *Computer Science and Educational Informatization. CSEI 2023. Communications in Computer and Information Science*. 2024. V. 1900. P. 367–374. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-9492-2\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-99-9492-2_31)
20. O'Donnell T.J., Hauser M.D., Tecumseh Fitch W. Using mathematical models of language experimentally. *Trends in Cogn. Sci*. 2005;9(6):284–289. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.04.011>
21. Huang Y., Xu W., Sukjairungwattana P., Yu Zh. Learners' continuance intention in multimodal language learning education: An innovative multiple linear regression model. *Heliyon*. 2024;10(6):e28104. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28104>
22. Ghasemabadi A., Soltanian N. Qualitative properties of mathematical model of English language education. *Adv. Differ. Equations*. 2021;202115. <https://doi.org/10.1186/s13662-020-03180-0>
23. Kiram J.J., Sulaiman J., Swanto S., Din W.A. Modeling the language learning strategies and English language proficiency of pre-university students in UMS. A case study. *AIP Conf. Proc*. 2015;1682(1):050004. <https://doi.org/10.1063/1.4932495>
24. Askarova A.H., Svetlov M.S., Svetlova M.K. Mathematical Model for the Process of Training. In: *Problems of Control, Processing and Transmission of Information*: Collection of works of the 4th International Scientific Conference in 2 v. Saratov: 2015. V. 2. P. 199–204 (in Russ.). <https://elibrary.ru/woxvhh>
25. Le V.Kh., Chernenkaya L.V., Nguyen T.T.Z. *Program for Solving the Inverse Problem of Restoring Parameters in a Mathematical Model of the Process of Teaching a Foreign Language*: Certificate of state registration of computer software No. 2023617166 Russian Federation. Publ. 06.04.2023 (in Russ.).
26. Ukhova T.V., Ukhov A.V. The Overview of Mathematical Models for a Foreign Language Learning. In: *Current Trends in Teaching Foreign Languages at Non-Linguistic Universities*: Proceedings of the 17th All-Russian Scientific and Methodological Conference with International Participation. Krasnoyarsk: 2023. P. 89–93 (in Russ.).
27. Ivanova E.A. Regulation of Cognitive Load in Teaching a Foreign Language at a Technological University. *Mir nauki. Pedagogika i psikhologiya = World of Science. Pedagogy and Psychology*. 2024;12(1) (in Russ.). Available from URL: <https://mir-nauki.com/PDF/73PDMN124.pdf>. Accessed April 24, 2024.
28. Bogush N.B., Ivanova E.A. Difficulties in the formation of Foreign Language Competences of Foreign Language Competences of a Technological University Students due to Non-Linguistic Factors. *Obrazovanie i pravo = Education and Law*. 2023;3:230–238 (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2076-1503-2023-3-230-238>

#### Об авторах

**Чернова Надежда Ивановна**, д.пед.н., профессор, заведующий кафедрой иностранных языков, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [chernova@mirea.ru](mailto:chernova@mirea.ru). Scopus Author ID 57194042371, SPIN-код РИНЦ 7391-4040, <https://orcid.org/0000-0002-5685-9733>

**Иванова Екатерина Александровна**, к.филол.н, доцент, кафедра иностранных языков, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ivanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57216646627, SPIN-код РИНЦ 8980-5591, <https://orcid.org/0000-0001-6891-4966>

**Катахова Наталия Владимировна**, к.пед.н., доцент, кафедра иностранных языков, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: katakhova@mirea.ru. Scopus Author ID 57204175929, SPIN-код РИНЦ 2552-5380, <https://orcid.org/0000-0002-9416-5011>

#### About the Authors

**Nadezhda I. Chernova**, Dr. Sci. (Pedagog.), Professor, Head of the Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: chernova@mirea.ru. Scopus Author ID 57194042371, RSCI SPIN-code 7391-4040, <https://orcid.org/0000-0002-5685-9733>

**Ekaterina A. Ivanova**, Cand. Sci. (Philolog.), Associate Professor, Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ivanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57216646627, RSCI SPIN-code 8980-5591, <https://orcid.org/0000-0001-6891-4966>

**Nataliya V. Katakhova**, Cand. Sci. (Pedagog.), Associate Professor, Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: katakhova@mirea.ru. Scopus Author ID 57204175929, RSCI SPIN-code 2552-5380, <https://orcid.org/0000-0002-9416-5011>

---

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».  
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.  
Подписано в печать 28.05.2026 г.  
Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.  
Уч.-изд. листов 20.75.  
Тираж 50 экз. Заказ № 4086.

Подписку на печатную версию  
*Russian Technological Journal* можно оформить  
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», [www.akc.ru](http://www.akc.ru).  
Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.  
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian  
Federation.  
Signed to print May 28, 2026.  
Format 60 × 90/8. Digital print.  
C.p.l. 20.75.  
50 copies. Order No. 4086.

Subscription to the *Russian Technological Journal* printed version can be made through  
the *Kniga-Servis* Agency, [www.akc.ru](http://www.akc.ru).  
Subscription index: **79641**.

