



RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

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

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и нанoeлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

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

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества



RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Russian Technological Journal
2025, том 13, № 1

Russian Technological Journal
2025, Vol. 13, No. 1

Russian Technological Journal 2025, том 13, № 1

Дата опубликования 30 января 2025 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: один раз в два месяца.

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. Л-119.
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 2025, Vol. 13, No. 1

Publication date January 30, 2025.

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: bimonthly.

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

Editorial Board

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

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *С.В. Кочергин, С.В. Артемова, А.А. Бакаев, Е.С. Митяков, Ж.Г. Вегера, Е.А. Максимова*
Повышение безопасности смарт-сетей: спектральный и фрактальный анализ как инструменты выявления кибератак
- 16** *С.О. Крамаров, О.Р. Попов, И.Э. Джариев, Е.А. Петров*
Перколяция и формирование связности в динамике сетей цитирования данных по физике высоких энергий
- 28** *А.С. Леонтьев, Д.В. Жматов*
Анализ вероятностных характеристик воздействия вирусных атак на цифровые подстанции
- 38** *Е.С. Мозаидзе*
Тематическое моделирование в потоке коротких сообщений на русском языке
- 49** *Г.В. Петушков, А.С. Сигов*
Технико-экономический анализ серверов как вычислительных модулей вычислительных систем класса WSC

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 59** *В.К. Битюков, А.И. Лавренов*
Метод проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии
- 68** *М.Н. Крижановский, О.В. Тихонова*
Разбиение множества базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы
- 76** *Г.В. Куликов, Данг Суан Ханг, А.А. Лелюх*
Оптимизация созвездий сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в каналах связи с нефлуктуационными помехами
- 89** *И.В. Пешков, Д.Н. Борисов*
Моделирование цифровой пространственной обработки в условиях тропосферного распространения сантиметровых радиоволн для задач телекоммуникации
- 103** *Д.Р. Хафизов, И.Н. Лобов, Л.Ю. Фетисов*
Резонансный источник электропитания для мощных сверхвысокочастотных устройств

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния

- 115** *М.М. Яшин, В.Е. Рябухин, А.Н. Юрасов*
Магнитооптический экваториальный эффект Керра в нанокompозитах $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$

Аналитическое приборостроение и технологии

- 122** *Д.В. Казанцев, Е.А. Казанцева*
Шумовые свойства предварительного усилителя для инфракрасного фотоприемника на основе HgCdTe

Математическое моделирование

- 136** *А.Е. Коренченко, А.В. Сухов*
Моделирование работы трубчатых теплообменников методом сглаженных частиц
- 144** *П.А. Сахарова, В.А. Баландин*
Многофакторный дискриминантный анализ электрокардиограммы

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Sergey V. Kochergin, Svetlana V. Artemova, Anatoly A. Bakaev, Evgeny S. Mityakov, Zhanna G. Vejera, Elena A. Maksimova*
Improving Smart Grid security: Spectral and fractal analysis as tools for detecting cyberattacks
- 16** *Sergey O. Kramarov, Oleg R. Popov, Ismail E. Dzhariev, Egor A. Petrov*
Percolation and connectivity formation in the dynamics of data citation networks in high energy physics
- 28** *Alexander S. Leontyev, Dmitry V. Zhmatov*
Probabilistic characteristics analysis of virus attack effect on digital substations
- 38** *Elena S. Mozaidze*
Topic modeling in the stream of short messages in Russian
- 49** *Grigory V. Petushkov, Alexander S. Sigov*
Technical and economic analysis of servers as computing system modules of the warehouse scale computer class

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 59** *Vladimir K. Bityukov, Aleksey I. Lavrenov*
Method for designing DC/DC converters based on Zeta topology
- 68** *Mikhail N. Krizhanovsky, Olga V. Tikhonova*
Formation of a database of auxiliary information for positioning in an environment with heterogeneous radio transparency
- 76** *Gennady V. Kulikov, Dang Xuan Khang, Andrey A. Lelyukh*
Optimization of signal constellations with amplitude-phase shift keying in communication channels with non-fluctuating interference
- 89** *Ilya W. Peshkov, Dmitry N. Borisov*
Modeling of digital spatial processing under conditions of troposphere propagation of centimeter radio waves for wireless telecommunication
- 103** *Damir R. Hafizov, Ilya N. Lobov, Leonid Y. Fetisov*
Resonant power supply for high-power microwave devices

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 115** *Maxim M. Yashin, Vitaly E. Ryabukhin, Alexey N. Yurasov*
Magneto-optical transverse Kerr effect in $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$ nanocomposites

Analytical instrument engineering and technology

- 122** *Dmitry V. Kazantsev, Elena A. Kazantseva*
Noise properties of preamplifier to be used with LN_2 -cooled HgCdTe photodetector

Mathematical modeling

- 136** *Anna E. Korenchenko, Anton V. Sukhov*
A smoothed particle hydrodynamics approach for numerical simulation of tube heat exchangers
- 144** *Polina A. Sakharova, Vyacheslav A. Balandin*
Multivariate discriminant analysis of the electrocardiogram

УДК 621.311.1

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-7-15>

EDN DUNSTG



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Повышение безопасности смарт-сетей: спектральный и фрактальный анализ как инструменты выявления кибератак

С.В. Кочергин[@],
С.В. Артемова,
А.А. Бакаев,
Е.С. Митяков,
Ж.Г. Вегера,
Е.А. Максимова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. В статье рассматриваются гармонические искажения и кибератаки как основные источники нарушений в смарт-сетях (Smart Grid). Цель работы – разработка эффективного инструмента для выявления и численной оценки различий между гармоническими и аномальными сигналами, что позволит обнаруживать кибератаки, связанные с искажением гармонических сигналов, и для более точной классификации паттернов, характерных для вредоносных воздействий.

Методы. Проведен сравнительный анализ различных методов обнаружения аномалий, таких как фрактальный анализ, мультифрактальный анализ, расчет энтропии Шеннона и плотности спектральной мощности (power spectral density, PSD).

Результаты. Полученные результаты показывают, что гармонические искажения и аномальные сигналы, вызванные кибератаками, обладают схожими фрактальными и мультифрактальными характеристиками, что затрудняет их различение. Использование метода энтропии Шеннона не позволило в полной мере оценить сложность и неопределенность гармонических и аномальных сигналов. Для более глубокого понимания природы этих сигналов был применен комплексный подход, включающий анализ их частотных характеристик и применение других методов оценки неопределенности, таких как мультифрактальный анализ и метод PSD. В результате метод PSD выявил значительные различия в распределении энергии между этими сигналами, что позволяет более точно идентифицировать кибератаки.

Выводы. Для эффективного обнаружения кибератак, связанных с искажением гармонических сигналов в энергетических системах, необходим комплексный подход, включающий методы анализа временных рядов, частотный анализ и методы машинного обучения. Такой подход позволяет не только выявлять аномалии в сигналах, но и проводить их численную оценку, что повышает точность классификации вредоносных воздействий. Интеграция этих методов обеспечивает повышение надежности и безопасности энергетических систем, делая их менее уязвимыми к кибератакам.

Ключевые слова: Smart Grid, гармонические искажения, кибератаки, мультифрактальный анализ, спектральная плотность мощности, обнаружение аномалий

• Поступила: 12.09.2024 • Доработана: 15.11.2024 • Принята к опубликованию: 03.12.2024

Для цитирования: Кочергин С.В., Артемова С.В., Бакаев А.А., Митяков Е.С., Вегера Ж.Г., Максимова Е.А. Повышение безопасности смарт-сетей: спектральный и фрактальный анализ как инструменты выявления кибератак. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-7-15>, <https://elibrary.ru/DUNSTG>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Improving Smart Grid security: Spectral and fractal analysis as tools for detecting cyberattacks

Sergey V. Kochergin [@],
Svetlana V. Artemova,
Anatoly A. Bakaev,
Evgeny S. Mityakov,
Zhanna G. Vegera,
Elena A. Maksimova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Cyberattacks are major potential sources of disturbances in modern electrical networks (Smart Grid). However, distinguishing between the various kinds of harmonic distortions and malicious interventions can be challenging. The objective of this work is to develop an effective tool for detecting and quantifying the differences between harmonic and anomalous signals. This will permit the identification of cyberattacks associated with harmonic signal distortions to provide a more accurate classification of patterns characteristic of malicious impacts.

Methods. A comparative analysis of various anomaly detection methods was conducted, including fractal analysis, multifractal analysis, Shannon entropy calculation, and power spectral density (PSD) analysis.

Results. Harmonic distortions and anomalous signals caused by cyberattacks may share similar fractal and multifractal characteristics, making it harder to distinguish between them. The use of the Shannon entropy method does not fully capture the complexity and uncertainty of harmonic and anomalous signals. To gain a deeper understanding of the nature of these signals, a comprehensive approach was applied, including analysis of their frequency characteristics and the use of other uncertainty assessment methods, such as multifractal analysis and PSD. Use of the PSD method revealed significant differences in energy distribution between these signals, permitting a more accurate identification of cyberattacks.

Conclusions. For the effective detection of cyberattacks associated with harmonic signal distortions in power systems, a comprehensive approach is required, including time series analysis, frequency analysis, and machine learning methods. This approach not only detects anomalies in signals but also provides their quantitative assessment to improve the accuracy of classifying malicious impacts. The integration of these methods enhances the reliability and security of power systems, making them less vulnerable to cyberattacks.

Keywords: Smart Grid, harmonic distortion, cyberattacks, multifractal analysis, spectral power density (PSD), anomaly detection

• Submitted: 12.09.2024 • Revised: 15.11.2024 • Accepted: 03.12.2024

For citation: Kochergin S.V., Artemova S.V., Bakaev A.A., Mityakov E.S., Vegeza Zh.G., Maksimova E.A. Improving Smart Grid security: Spectral and fractal analysis as tools for detecting cyberattacks. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-7-15>, <https://elibrary.ru/DUNSTG>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Современные киберугрозы представляют собой серьезную опасность для интеллектуальных энергетических сетей, известных как смарт-сети (Smart Grid). Эти угрозы включают атаки с использованием вредоносного программного обеспечения, фишинг, DDoS-атаки¹ и целенаправленные кибероперации, направленные на нарушение работы критически важных элементов энергетической инфраструктуры. Из-за того, что технология Smart Grid объединяет традиционные системы электроэнергетики с современными информационными и коммуникационными технологиями, она становится более подверженной различным угрозам. Это связано с ее зависимостью от цифровых технологий и сетевых подключений. В условиях роста числа кибератак обеспечение безопасности Smart Grid становится приоритетной задачей для сохранения стабильности и безопасности энергетической системы [1–6].

Характерной особенностью современного электроснабжения является наличие большого количества потребителей с нелинейными источниками питания, которые вызывают искажение синусоидальной характеристики напряжения и тока. Это приводит к негативным последствиям, ухудшает

качество электрической энергии, вызывает дополнительные потери, в ряде случаев возможно появление резонансных явлений [7–9].

В тоже время кибератаки на электрические сети могут маскироваться под искажения естественного характера и оставаться незамеченными. Это осложняет процесс выявления подобных аномалий, существенно усложняет выявление и различение кибератак от нормальных эксплуатационных режимов, что представляет серьезную угрозу для стабильности и безопасности электрической сети.

ИССЛЕДОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ И АНОМАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В КОНТЕКСТЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

Для проведения исследований был создан искусственный датасет, включающий в себя 100 электрических сигналов с гармоническими искажениями (на рис. 1 изображены сплошной линией), вызванными работой нелинейных источников питания с характерным преобладанием гармоник, кратных трем (инверторы, блоки питания и др.). Также были созданы 100 сигналов со случайными аномальными искажениями, особенностью которых являются случайные всплески (на рис. 1 изображены штриховой линией),

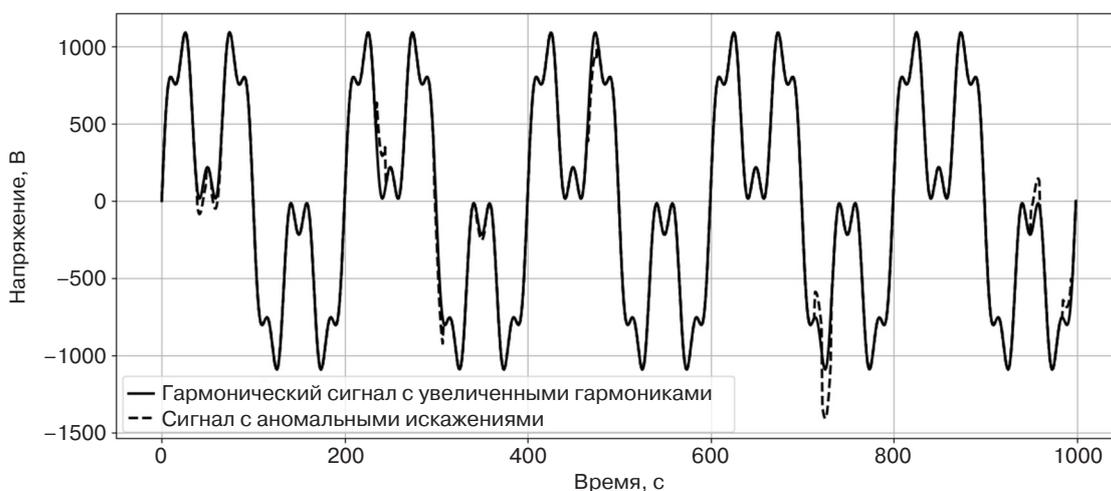


Рис. 1. Сравнение гармонического сигнала и сигнала с аномалиями

¹ Distributed denial of service – распределенная атака, которая создает нагрузку на сервер и приводит к отказу системы. [Distributed denial of service is a distributed attack that creates a load on the server and leads to a system failure.]

отличающиеся от повторяющихся сигналов естественного происхождения.

Аномальные искажения отличаются от гармонических не только формой, но и характером изменений: они могут быть более непредсказуемыми и хаотичными, что усложняет их обнаружение и классификацию. На графике (рис. 1) видно, что, хотя оба сигнала имеют похожие элементы, аномальные искажения более выражены и могут существенно отличаться по амплитуде и фазе от гармонических искажений.

Ввиду того, что гармонические искажения в электрических сетях часто демонстрируют сложную динамику и самоподобие, проведем оценку этих сигналов с использованием фрактальных методов.

Выполним расчет фрактальной размерности и коэффициента Херста, которые вместе позволяют количественно оценить степень сложности, самоподобия и корреляционной структуры сигнала. Одним из наиболее распространенных методов определения фрактальной размерности является метод коробочного подсчета (box-counting) [10]. Для одномерного временного ряда фрактальная размерность D определяется по следующей формуле:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)}, \quad (1)$$

где $N(\varepsilon)$ – количество коробок (отрезков длины ε), необходимых для покрытия всей кривой сигнала.

Коэффициент Херста H представляет собой важный фрактальный параметр, характеризующий степень долговременной зависимости и корреляции в сигнале. Он вычисляется по формуле:

$$H = \frac{\ln(R/S)}{\ln n}, \quad (2)$$

где R – размах (range) накопленного отклонения сигнала от среднего значения, S – стандартное отклонение, а n – размер выборки.

Результаты расчета (таблица) фрактальных характеристик для гармонических и аномальных сигналов, представленных в нашем исследовании, показали, что оба типа сигналов имеют схожие значения как фрактальной размерности, так и коэффициента Херста. Среднее значение коэффициента Херста для аномальных сигналов оказалось незначительно выше, что может свидетельствовать о более выраженной автокорреляции или «запоминаемости» в этих сигналах по сравнению с гармоническими. Однако это различие минимально и, возможно, недостаточно для четкого разграничения двух типов сигналов.

Анализ фрактальной размерности показал: оба типа сигналов имеют схожие значения, что говорит о том, что на малых масштабах они имеют похожую структуру. Это может усложнить задачу различения

гармонических и аномальных искажений на основе только фрактальных параметров.

Таблица. Сравнение фрактальных характеристик для гармонических и аномальных сигналов

Параметр	Тип сигнала	Среднее значение
Коэффициент Херста	Гармонические сигналы	0.643
	Аномальные сигналы	0.652
Фрактальная размерность	Гармонические сигналы	0.988
	Аномальные сигналы	0.988

Результаты исследования показывают, что, несмотря на различия в природе сигналов, их фрактальные характеристики оказались очень схожими, что затрудняет точное их различение. Для более точной классификации аномальных и гармонических искажений проведем мультифрактальный анализ [11, 12]. Выбор мультифрактального спектра объясняется его способностью более глубоко характеризовать сложные и неоднородные структуры сигналов, которые недостаточно описываются традиционными монофрактальными методами.

В результате выполненного расчета мультифрактального спектра была получена зависимость (рис. 2), которая отображает показатель Херста $H(q)$ в зависимости от параметра масштабирования q .

Для достижения этой цели сигнал был разложен на поддиапазоны, используя различные значения параметра масштабирования q , который связан с моментами сигнала. В процессе декомпозиции была рассчитана обобщенная кумулятивная функция $Z(q, s)$, определяемая как:

$$Z(q, s) = \sum_{i=1}^{N_s} |X(i, s)|^q, \quad (3)$$

где $X(i, s)$ представляет собой амплитуду сигнала на масштабе s , а N_s – количество элементов на этом масштабе.

Было проведено масштабное преобразование для каждого значения q , чтобы вычислить зависимость кумулятивной функции $Z(q, s)$ от масштаба s . Установлено, что для сигналов с мультифрактальными свойствами эта зависимость подчиняется степенному закону:

$$Z(q, s) \sim s^{\tau(q)}, \quad (4)$$

где $\tau(q)$ – спектральная функция, описывающая мультифрактальные характеристики сигнала.

В результате были вычислены значения показателя Херста $H(q)$ для каждого значения q с использованием соотношения:

$$H(q) = \frac{\tau(q)}{q}. \quad (5)$$

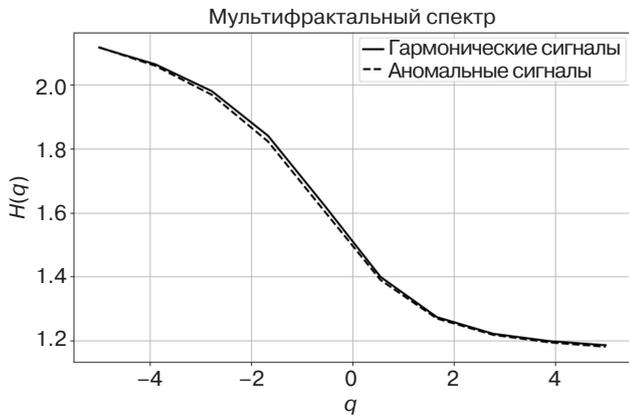


Рис. 2. Зависимость показателя Херста от параметра масштабирования

Результаты мультифрактального анализа (рис. 2) показывают, что спектры сложности гармонических и аномальных сигналов очень похожи. Это означает, что похожи сложность и структура этих сигналов на разных масштабах. Несмотря на то, что природа этих сигналов различна, их мультифрактальные свойства очень похожи. Это ограничивает возможность использования мультифрактального анализа для различения гармонических и аномальных сигналов.

Для более точной классификации и выявления различий между этими типами сигналов возникает необходимость в использовании дополнительных методов анализа. Одним из таких методов является энтропия Шеннона [13, 14], которая была выбрана для дальнейшего исследования благодаря своей способности количественно оценивать уровень неопределенности и сложности в системе. Энтропия Шеннона позволяет анализировать изменения в распределении вероятностей различных событий, связанных с сигналом, что может быть особенно полезным при исследовании сигналов с аномалиями. В контексте электрических сетей этот метод может выявить скрытые аномалии или нестабильности, которые остаются незамеченными при использовании только мультифрактального анализа.

Чтобы сравнить гармонические и аномальные сигналы, использован метод оценки энтропии Шеннона. Он помогает измерить уровень неопределенности в сигнале. Энтропия Шеннона H показывает, насколько равномерно распределены значения сигнала. Ее можно рассчитать по формуле:

$$H = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \lg p(x_i), \quad (6)$$

где $p(x_i)$ — вероятность того, что сигнал примет значение x_i , а n — количество возможных значений сигнала.

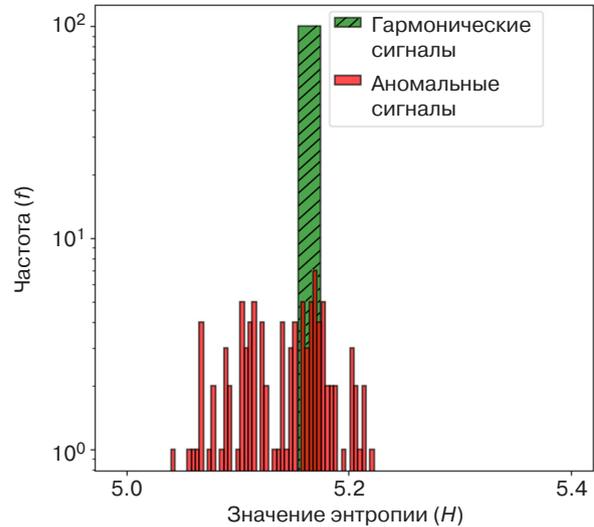


Рис. 3. Энтропия Шеннона (логарифмическая шкала)

График (рис. 3) демонстрирует распределение значений энтропии Шеннона для двух типов сигналов: гармонических (зеленый цвет, штриховка) и аномальных (красный цвет). Частота f по оси ординат показывает, как часто различные значения энтропии H встречаются в выборке данных. Гармоническим сигналам свойственны значения энтропии, сосредоточенные в узком диапазоне около ~ 5.2 , что образует высокий и узкий пик на гистограмме. Это свидетельствует о высокой степени упорядоченности и предсказуемости гармонических сигналов, отражающейся в их стабильных и относительно низких значениях энтропии.

Аномальные сигналы, напротив, имеют более широкое распределение энтропии, варьирующееся от 5 до ~ 5.4 , с более низким и размытым пиком. Это указывает на большую хаотичность и неупорядоченность в их структуре, что приводит к повышенной вариативности энтропии. Частичное перекрытие распределений гармонических и аномальных сигналов показывает, что некоторые аномальные сигналы имеют энтропию, схожую с энтропией гармонических сигналов.

Хотя энтропия Шеннона предоставляет важную информацию о степени неопределенности сигнала, для полного понимания природы гармонических и аномальных сигналов требуется также анализ их частотных характеристик.

С целью выявления ключевых частотных характеристик сигналов в работе использован метод расчета спектральной плотности мощности (power spectral density, PSD) [15, 16]. Особенностью этого метода является то,

что он позволяет обнаружить скрытые периодичности и аномалии, которые могут остаться незамеченными при анализе только временных характеристик сигнала.

Метод PSD дает более полное представление о спектральной структуре сигналов, анализируя распределение энергии по частотам. Это важно для дифференциации гармонических и аномальных сигналов, особенно в сложных временных рядах. Применение PSD позволяет не только качественно, но и количественно оценивать различия между сигналами, обеспечивая более точную их классификацию и выявление скрытых аномалий.

Расчет PSD был выполнен с использованием метода Уэлча (Welch) [17], который представляет собой улучшенный метод оценки спектра мощности, снижающий шум путем разбиения сигнала на перекрывающиеся сегменты и усреднения их спектров.

Спектральная плотность мощности $P(\omega)$ сигналов была рассчитана по следующей формуле:

$$P(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |X_k(\omega)|^2, \quad (7)$$

где ω – частота, $X_k(\omega)$ – дискретное преобразование Фурье k -го сегмента сигнала, а N – количество сегментов.

Метод Уэлча используют для более точного определения спектра мощности. При этом сигнал разделяют на несколько частей, которые могут перекрываться. Затем для каждой части применяют преобразование Фурье. После этого вычисляют среднее значение спектров мощности всех сегментов. Это позволяет снизить влияние случайных помех и повысить стабильность оценки:

$$P_{\text{Welch}}(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P_m(\omega), \quad (8)$$

где M – количество сегментов, а $P_m(\omega)$ – спектральная плотность мощности для m -го сегмента.

На рис. 4 представлено сравнение распределения спектральной плотности мощности гармонических и аномальных сигналов. На низких частотах гармонические сигналы демонстрируют более концентрированное распределение энергии. Для аномальных сигналов характерен более широкий спектр.

Чтобы глубже проанализировать спектральные характеристики и точно оценить разницу между гармоническими и аномальными сигналами, нужно вычислить интегральную энергию сигналов. Это делается путем интегрирования значений PSD по всему диапазону частот. Интегральная энергия сигнала, которая определяется как площадь под кривой PSD, служит количественной мерой общей энергии, распределенной по частотам. Она может предоставить дополнительные сведения о различиях между типами сигналов.

Интегральная энергия сигнала E вычисляется путем интегрирования значений PSD $P(\omega)$ по всему диапазону частот ω :

$$E = \int_0^{\omega_{\max}} P(\omega) d\omega, \quad (9)$$

где ω_{\max} – максимальная частота, до которой выполняется интегрирование.

Этот переход к интегральной оценке энергии позволяет не только выявить, как энергия распределена по частотам, но и количественно оценить общую энергетическую составляющую сигналов, что является важным для более глубокого понимания их природы и для точной их классификации.

Результаты расчета спектральной плотности мощности выявили значительное различие в энергетическом распределении между аномальными и гармоническими сигналами в диапазоне частот 200–300 Гц. В частности, энергия в этом диапазоне для аномальных данных составила 224.53 единицы, что существенно

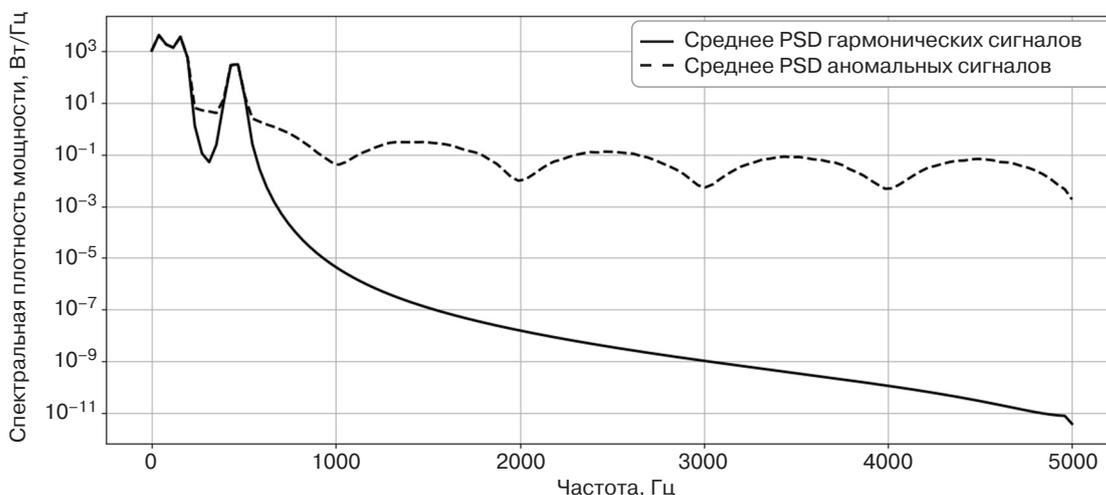


Рис. 4. Сравнение распределения PSD гармонических и аномальных сигналов

превышает энергию гармонических данных, равную 27.51 единицам. Это различие указывает на то, что в аномальных данных в диапазоне 200–300 Гц присутствует значительное увеличение энергии, что может свидетельствовать о наличии дополнительных частотных компонентов или повышенной активности, характерной для аномальных сигналов.

Рост энергии может быть вызван дополнительными шумами, негармоническими составляющими или другими факторами, которые отсутствуют в гармонических сигналах. Это подчеркивает значимость частотного анализа, особенно метода PSD, для обнаружения аномалий, которые могут быть незаметны при анализе сигналов во временной области.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования демонстрируют, что метод PSD является эффективным инструментом для выявления и численной оценки различий между гармоническими и аномальными сигналами. Это позволяет использовать данный метод для обнаружения кибератак, связанных с искажением гармонических сигналов, и более точной классификации паттернов, характерных для вредоносных воздействий. Применение такого подхода способствует повышению уровня безопасности и устойчивости энергосистем, обеспечивая своевременное обнаружение и нейтрализацию угроз.

Вклад авторов

С.В. Кочергин – разработка основной концепции исследования, формулирование ключевых целей и задач, проведение обзора литературы в соответствующей

области, подготовка материалов для исследований и координация экспериментальных работ.

С.В. Артемова – разработка и оптимизация методологии исследования, проведение сравнительного анализа и участие в редактировании и подготовке статьи.

А.А. Бакаев – определение темы исследования, координация обсуждения результатов и завершающих этапов подготовки статьи.

Е.С. Митяков – анализ и интерпретация результатов, подготовка выводов и участие в обсуждении данных.

Ж.Г. Вегера – математическое и статистическое сопровождение, обеспечение точности методов анализа и проверка целостности данных.

Е.А. Максимова – исследование существующих методов обнаружения аномалий и определение наиболее перспективных подходов для сравнительного анализа.

Authors' contributions

S.V. Kochergin – development of the main research concept, formulation of key aims and objectives, conducting a literature review in the relevant field, preparation of research materials, and coordination of experimental studies.

S.V. Artemova – development and optimization of the research methodology, conducting comparative analyses, and participation in editing and preparing the article.

A.A. Bakaev – determination of the research topic, coordination of result discussions, and final stages of article preparation.

E.S. Mityakov – analysis and interpretation of results, preparation of conclusions, and participation in data discussions.

Zh.G. Vegera – mathematical and statistical support, ensuring the accuracy of quantitative analysis methods, and data integrity verification.

E.A. Maksimova – exploration of existing anomaly detection methods and identification of the most promising approaches for comparative analysis.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ихсанов И.И. Безопасность в электроэнергетике: актуальные угрозы и защитные меры. *Юность и знания – гарантия успеха – 2023: Сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции*. Курск, 19–20 сентября 2023 года. Курск: Университетская книга; 2023. Т. 2. С. 472–474. <https://elibrary.ru/tyyddx>
- Папков Б.В., Осокин Л.В., Кучин Н.Н. Кибербезопасность объектов распределительных электрических сетей. *Сельский механизатор*. 2024;5:3–7. <https://elibrary.ru/tfmvhi>
- Колосок И.Н., Коркина Е.С. Анализ кибербезопасности объектов энергетики с учетом механизма и кинетики нежелательных процессов. *Энергетик*. 2024;2:3–8. <http://doi.org/10.34831/EP.2024.60.27.001>, <https://elibrary.ru/escxvjr>
- Абдрахманов И.И. Опасности и угрозы для кибербезопасности в электроэнергетике: анализ современных угроз и механизмов защиты. *Научный аспект*. 2024;31(3):3970–3973. <https://elibrary.ru/lrouni>
- Гурина Л.А. Оценка киберустойчивости системы оперативно-диспетчерского управления ЭЭС. *Вопросы кибербезопасности*. 2022;3(49):23–31. <https://elibrary.ru/sapiyh>
- Гурина Л.А., Айзенберг Н.И. Поиск эффективного решения по обеспечению защиты от киберугроз сообщества микросетей со взаимосвязанными информационными системами. *Вопросы кибербезопасности*. 2023;3(55):37–49. <https://www.elibrary.ru/qguuyt>
- Семенов А.С., Бебихов Ю.В., Егоров А.Н., Федоров О.В. Влияние высших гармоник на качество электроэнергии в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий. *Горный журнал*. 2024;2:84–91. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.02.14>, <https://www.elibrary.ru/nmssyq>
- Воронин М.С. Влияние высших гармоник в сети электроснабжения предприятия на качество электроэнергии. В сб.: *Технологии, машины и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК: сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров*. Курск: ЗАО «Университетская книга»; 2024. С. 440–442. <https://www.elibrary.ru/wxelva>

9. Овечкин И.С., Пузина Е.Ю. Разработка технических решений по уменьшению искажения синусоидальности кривой напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2023;3(79):112–123. <https://www.elibrary.ru/smcqdv>
10. Iannaccone P.M., Khokha M. *Fractal Geometry in Biological Systems: An Analytical Approach*. CRC Press; 1996. 366 p. ISBN 978-0-8493-7636-8.
11. Басараб М.А., Строганов И.С. Обнаружение аномалий в информационных процессах на основе мультифрактального анализа. *Вопросы кибербезопасности*. 2014;4(7):30–40. <https://www.elibrary.ru/tcssen>
12. Шелухин О.И., Панкрушин А.В. Обнаружение аномальных выбросов в реальном масштабе времени методами мультифрактального анализа. *Нелинейный мир*. 2016;14(2):72–82. <https://www.elibrary.ru/vtznth>
13. Добровольский Г.А., Тодорико О.А. Использование энтропии Шеннона для детекции голосовой активности в зашумленных звукозаписях. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2016;3(58):218–223. <https://www.elibrary.ru/xdsiyx>
14. Шеннон К. *Работы по теории информации и кибернетике*. М.: ИЛ; 1963. 829 с.
15. Гольденберг Л.М., Магюшкин Б.Д., Поляк М.Н. *Цифровая обработка сигналов: Справочник*. М.: Радио и связь; 1985. 256 с.
16. Беспалов А.Д., Мишагин К.Г. Расчет спектральной плотности мощности фазового шума с выделением дискретных спектральных компонент. В: *Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой: Материалы конференции*. Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского; 2022. С. 208–211. <https://www.elibrary.ru/xwykrc>
17. Welch P.D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967;15(2):70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>

REFERENCES

1. Ihsanov I.I. Security in the electric power industry: current threats and protective measures. In: *Youth and Knowledge – Guarantee of Success – 2023: Collection of Scientific Articles of the 10th International Youth Scientific Conference*. Kursk, September 19–20, 2023. Kursk: Universitetskaya kniga; 2023. V. 2. P. 472–474 (in Russ.). <https://elibrary.ru/tfyddx>
2. Papkov B.V., Osokin L.V., Kuchin N.N. Cyber security of distribution facilities electrical networks. *Sel'skii mekhanizator = Selskiy Mechanizator*. 2024;5:3–7 (in Russ.). <https://elibrary.ru/tfmvhi>
3. Kolosok I.N., Korkina E.S. Analysis of cybersecurity of power facilities taking into account the mechanism and kinetics of undesirable processes. *Energetik*. 2024;2:3–8 (in Russ.). <http://doi.org/10.34831/EP.2024.60.27.001>, <https://elibrary.ru/ecxvjp>
4. Abdrakhmanov I.I. Dangers and threats to cybersecurity in the electric power industry: analysis of modern threats and protection mechanisms. *Nauchnyi Aspekt*. 2024;31(3):3970–3973 (in Russ.). <https://elibrary.ru/lrouni>
5. Gurina L.A. Assessment of cyber resilience of the operational dispatch control system of EPS. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity Issues*. 2022;3(49):23–31 (in Russ.). <https://elibrary.ru/sapiyh>
6. Gurina L.A., Aizenberg N.I. Search for an effective solution to protect microgrid community with interconnected information systems against cyber threats. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity Issues*. 2023;3(55):37–49 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/qguytv>
7. Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Egorov A.N., Fedorov O.V. Effect of higher harmonics on electric power quality in supply systems in mines. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2024;2:84–91 (in Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.02.14>, <https://www.elibrary.ru/nmssyq>
8. Voronin M.S. The influence of higher harmonics in the power supply network of an enterprise on the quality of electricity. In: *Technologies, Machines and Equipment for the Design and Construction of Agricultural Facilities: collection of scientific articles of the 2nd International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Graduate Students, Masters and Bachelors*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2024. P. 440–442 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/wxelva>
9. Ovechkin I.S., Puzina E.Yu. Development of technical solutions to reduce the distortion of the sinusoidal voltage curve of overhead lines supplying automatic blocking devices. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2023;3(79):112–123 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/smcqdv>
10. Iannaccone P.M., Khokha M. *Fractal Geometry in Biological Systems: An Analytical Approach*. CRC Press; 1996. 366 p. ISBN 978-0-8493-7636-8.
11. Basarab M.A., Stroganov I.S. Anomaly detection in information processes based on multifractal analysis. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity Issues*. 2014;4(7):30–40 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/tcssen>
12. Shelukhin O.I., Pankrushin A.V. Detection of anomalous in real time by methods of multifractal analysis. *Nelineinyi mir = Nonlinear World*. 2016;14(2):72–82 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vtznth>
13. Dobvol'skii G.A., Todoriko O.A. Application of Shannon entropy for voice activity detection in noisy sound recordings. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kherson National Technical University*. 2016;3(58):218–223 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/xdsiyx>
14. Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike (Works on Information Theory and Cybernetics)*. Moscow: IL; 1963. 829 p. (in Russ.).

15. Goldenberg L.M., Matyushkin B.D., Polyak M.N. *Tsifrovaya obrabotka signalov: Spravochnik (Digital Signal Processing: Handbook)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1985. 256 p. (in Russ.).
16. Bespalov A.D., Mishagin K.G. Calculation of the spectral power density of phase noise with the allocation of discrete spectral components. In: *Proceedings of the 26th Scientific Conference on Radiophysics dedicated to the 120th anniversary of M.T. Grekhova: Conference materials*. Nizhny Novgorod: N.I. Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University; 2022. P. 208–211 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/xwykrc>
17. Welch P.D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967;15(2):70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>

Об авторах

Кочергин Сергей Валерьевич, к.т.н., доцент, кафедра КБ-1 «Защита информации», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kochergin_s@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3598-8149>

Артемова Светлана Валерьевна, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой КБ-1 «Защита информации», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: artemova_s@mirea.ru. Scopus Author ID 6508256085, SPIN-код РИНЦ 3775-6241, <https://orcid.org/0009-0006-8374-8197>

Бакаев Анатолий Александрович, д.и.н., к.ю.н., доцент, директор Института кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bakaev@mirea.ru. Scopus Author ID 57297341000, SPIN-код РИНЦ 5283-9148, <https://orcid.org/0000-0002-9526-0117>

Митяков Евгений Сергеевич, д.э.н., профессор, и.о. заведующего кафедрой КБ-9 «Предметно-ориентированные информационные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mityakov@mirea.ru. Scopus Author ID 55960540500, SPIN-код РИНЦ 5691-8947, <https://orcid.org/0000-0001-6579-0988>

Вебера Жанна Геннадьевна, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики, Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vegera@mirea.ru. Scopus Author ID 57212931836, SPIN-код РИНЦ 9076-5678, <https://orcid.org/0000-0001-7312-3341>

Максимова Елена Александровна, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: maksimova@mirea.ru. Scopus Author ID 57219701980, SPIN-код РИНЦ 6876-5558, <https://orcid.org/0000-0001-8788-4256>

About the authors

Sergey V. Kochergin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Information Protection Department, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kochergin_s@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3598-8149>

Svetlana V. Artemova, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Information Protection Department, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: artemova_s@mirea.ru. Scopus Author ID 6508256085, RSCI SPIN-code 3775-6241, <https://orcid.org/0009-0006-8374-8197>

Anatoly A. Bakaev, Dr. Sci. (Hist.), Cand. Sci. (Juri.), Associate Professor, Director of the Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bakaev@mirea.ru. Scopus Author ID 57297341000, RSCI SPIN-code 5283-9148, <https://orcid.org/0000-0002-9526-0117>

Evgeny S. Mityakov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Acting Head of the Department “Subject-Oriented Information Systems,” Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mityakov@mirea.ru. Scopus Author ID 55960540500, RSCI SPIN-code 5691-8947, <https://orcid.org/0000-0001-6579-0988>

Zhanna G. Vegera, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vegera@mirea.ru. Scopus Author ID 57212931836, RSCI SPIN-code 9076-5678, <https://orcid.org/0000-0001-7312-3341>

Elena A. Maksimova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of Department “Intelligent Information Security Systems,” Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: maksimova@mirea.ru. Scopus Author ID 57219701980, RSCI SPIN-code 6876-5558, <https://orcid.org/0000-0001-8788-4256>

УДК 001.18:004.94:530.1

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-16-27>

EDN DUUBKW



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Перколяция и формирование связности в динамике сетей цитирования данных по физике высоких энергий

С.О. Крамаров^{1, 2},
О.Р. Попов³,
И.Э. Джариев^{2, @},
Е.А. Петров²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Сургутский государственный университет, Сургут, 628408 Россия

³ Академия информатизации образования, Ростов-на-Дону, 344065 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ismail.silver@yandex.ru

Резюме

Цели. Объектом исследования выступают информационные сети цитирования, структурированные на основе выборки в arXiv базы данных, связанной с теоретической физикой высоких энергий (high energy physics, HEP), индексирующей с 1974 г. более 500000 статей, включая их полное дерево цитирования. Предлагается методика обнаружения перколяционного перехода в динамике образования кластеров статей, имеющих схожее содержание и тесно связанных друг с другом. Повышение точности количественной оценки информационных циклов в сетях знаний может быть использовано в решении прикладных задач качества наукометрии и ее индикаторов.

Методы. Применен оптимизированный алгоритм по динамическому разделению сети в программной среде *Rajek* с целью обнаружения появления в ней гигантского компонента, эквивалентного перколяционному переходу. Данный подход позволяет с заданным временным шагом реализовать детальное исследование динамических и общих параметров для каждой новой сокращенной сети. Используемый алгоритм кластеризации объединяет структуру цитирования и темпоральную информацию о данных.

Результаты. Обнаружено, что в сети HEP происходит перколяционный переход, индикатором которого является образование вблизи локальной критической точки (10-го месяца интервала временной выборки) гигантского компонента. В то же время обобщенный вывод поведения параметров сетей свидетельствует о положительной динамике в росте связности исследуемой сети для всей временной выборки (с 1991 г. по 2003 г.). Обобщенный анализ распределения цитируемости обнаруживает 11 лауреатов высокоцитируемых статей, которые задавали базовый вектор развития в разделе HEP. Примечательно, что выдающиеся ученые из главной «тройки» цитирования связаны единой динамичной областью исследования – теорией струн. Верификация вышеуказанного факта подтверждает то, что предложенный метод оценки цитируемости – рабочий. Определение характеристик сети HEP позволяет определить важный для исследователя показатель и его поведение.

Выводы. В графе авторов, связанных отношениями соавторства, 7304 из 9200 авторов научного сообщества физиков HEP относятся к одному связному компоненту. Временной характер цитирования указывает на быстрое понимание и использование соответствующих новых работ. Перколяционный переход, являясь индикатором внезапных концептуальных изменений в сетях цитирования, позволяет выявлять и связывать статьи в исследовательскую схему, составляющую кластер новых идей или теорий.

Ключевые слова: информационная сеть, сеть цитирования, физика высоких энергий, НЕР, перколяция, перколяционный переход, связность, гигантский компонент, кластер, динамика

• Поступила: 23.07.2024 • Доработана: 20.09.2024 • Принята к опубликованию: 12.11.2024

Для цитирования: Крамаров С.О., Попов О.Р., Джариев И.Э., Петров Е.А. Перколяция и формирование связности в динамике сетей цитирования данных по физике высоких энергий. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-16-27>, <https://elibrary.ru/DUUBKW>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Percolation and connectivity formation in the dynamics of data citation networks in high energy physics

Sergey O. Kramarov ^{1, 2},
Oleg R. Popov ³,
Ismail E. Dzhariev ^{2, @},
Egor A. Petrov ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Surgut State University, Surgut, 628408 Russia

³ Academy of Informatization of Education, Rostov-on-Don, 344065 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ismail.silver@yandex.ru

Abstract

Objectives. The object of the research is to study citation information networks structured on the basis of a sample from the arXiv database related to theoretical high energy physics (high energy physics, HEP). Since 1974, this database has indexed more than 500000 articles, including their complete citation trees. The paper proposes a method for detecting percolation transitions in the dynamics of cluster formation of articles with similar content. Improving the accuracy of information cycles in knowledge networks can help resolve applied problems related to the quality of scientometrics and its indicators.

Methods. An optimized algorithm for dynamic network separation in the *Pajek* software environment was applied, in order to detect the emergence of a largest component equivalent to a percolation transition. This approach enables a detailed study of dynamic and general parameters to be carried out in each reduced network with a given time step. The clustering algorithm combines citation structure and temporal information about data.

Results. It was found that a percolation transition occurs in the HEP network. The indicator of this transition is the formation of a largest component near the critical point which occurs at the 10th month of the time sample interval. At the same time, a generalized conclusion about the behavior of network parameters shows a positive trend in the growth of connectivity for the entire time period (from 1991 to 2003). Furthermore, a generalized analysis of citation distribution reveals eleven laureates of highly cited articles who set the basic vector for development in the field of HEP. It is worth noting that the prominent scientists from the top three in terms of citations are linked by a shared field of research: string theory. Verification of this fact confirms that our citation evaluation method is effective.

Determining the characteristics of the HEP (high-energy physics) network enables an important indicator of the researcher's activity and behavior to be identified.

Conclusions. In the column of authors linked by co-authorship, of the 9200 authors in the HEP physics community, 7304 belong to a single connected component. The temporal nature of citations indicates a rapid uptake and understanding of relevant new work. Percolation transitions, which are indicators of sudden conceptual shifts in citation networks, allow us to identify and link articles into research schemes which form clusters of new ideas and theories.

Keywords: information network, citation network, high energy physics, HEP, percolation, percolation transition, connectivity, largest component, cluster, dynamics

• Submitted: 23.07.2024 • Revised: 20.09.2024 • Accepted: 12.11.2024

For citation: Kramarov S.O., Popov O.R., Dzhariyev I.E., Petrov E.A. Percolation and connectivity formation in the dynamics of data citation networks in high energy physics. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-16-27>, <https://elibrary.ru/DUUBKW>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Отдельную категорию сложных сетей, наряду с социальными, биологическими и технологическими, представляют информационные сети, называемые также «сетями знаний».

Ньюмен определяет информационную сеть как «состоящую из элементов данных, связанных между собой каким-либо образом» [1]. К двум наиболее изученным информационным сетям относятся сети цитирования научных публикаций и сети текстовых страниц «Всемирной паутины» [2–5]. В них вершинами являются статьи или интернет-страницы, а направленные ребра – это цитирования одной статьи в другой или гиперссылки.

В меньшей степени изучены некоторые другие информационные сети. Например, сеть цитирований между патентами, которые в некоторых отношениях похожи на цитаты между академическими научными статьями.

Близким к сетям веб-страниц и академических документов являются сети индекса ключевых слов. Они отличаются от сетей прямых связей между документами. Индекс – это двудольная сеть ссылок между записью ключевых слов и документа, на которые они указывают. Они используются, например, в качестве основы для алгоритмов поисковых систем, которые пытаются найти документы или страницы, похожие друг на друга.

Как информационную можно рассматривать также сеть отношений между классами слов в тезаурусе, которая изучалась в ряде работ [4, 6, 7]. Пользователи тезауруса переходят по сети от одного слова к другому в поисках конкретного термина, идеально отражающего идею, которую они имеют в виду.

Семантические связи между терминами и ментальные конструкции, используемые для смыслового

отображения специального научного языка, представляют концептуальные или терминологические сети. В [8] исследованы параметры динамики образования связей в сетях, структурированные на основе словарей модельных прогнозных терминов, тематически связанных с перспективными информационными технологиями.

Сеть ссылок цитирования между научными публикациями, структура которых достаточно точно отражает структуру информации, хранящейся в ее вершинах – статьях, хорошо соответствует концепции «информационная сеть».

Анализ цитирования может выявлять статьи и связывать их в исследовательскую схему, составляющую кластер, определяемый научной специальностью. Индикатором внезапных концептуальных изменений, возникшим в результате новых теорий или идей, являются резкие изменения в сети цитирования.

Существуют два базовых направления сетевого анализа ссылок цитирования, отражающих постепенное развитие знаний в динамике.

Большее распространение получил метод анализа основного пути (main path analysis), представляющий сети цитирования в виде системы каналов, которые переносят научные знания или информацию [9, 10]. Анализ основного пути вычисляет степень, в которой конкретная цитата или статья используется в качестве ссылки, что называется счетчиком обхода. Извлекаются пути или компоненты от исходной вершины к вершине-приемнику с наивысшим весом обхода, которые, как предполагается, определяют основной информационный поток. Анализ их динамики во времени отражает интеграцию или специализацию научного сообщества.

К разновидностям анализа подобного рода, связанного с фрагментацией данных, также относят

подходы, основанные на выявлении ключевых маршрутов, островов, вероятностных потоков [11].

Данные методы сосредоточены на локализации, выделении высокоцитируемых статей и оставляют вне внимания большой пласт всего объема данных, выраженных в слабых далекодействующих сетевых корреляциях [12, 13].

Другое направление моделирования и анализа информационных процессов, протекающих в сетях с нерегулярной структурой, связано с применением известных в физике твердого тела методов теории перколяции [14–19], которая способна ответить на важные прикладные вопросы. Теория перколяции успешно применяется в приложениях, обеспечивающих защиту технологических сетей от вирусных атак [20], нанотехнологиях дизайна вирусоподобных частиц [17], алгоритмах мониторинга и прогнозирования эволюции информации в социотехнических системах [21].

Перколяция в социальных сетях при анализе сетей знаний или информационная перколяция – актуальное, популярное и развивающееся направление на стыке научных концепций. Стройная теория данного направления, включая понятийный ряд, только формируется, элементы ее собираются в рамках ряда работ отечественных и зарубежных авторов [21–24], отражающих разные стороны сложного многоаспектного явления. Более универсальный взгляд на анализ критического поведения перколяционных переходов выявляет необходимость учета глобальной информации о связности сети, что решается алгоритмами искусственного интеллекта и машинного обучения [24].

Теория перколяции из статистической физики фокусируется на закономерностях связности сети, а именно кластеров узлов, до которых можно добраться друг от друга. Основным интересом представляет относительный размер самого большого кластера, т.е. доля узлов в наибольшем (гигантском) компоненте P_∞ , который служит мерой функциональности.

С точки зрения более полного охвата сетевых процессов важно, что, как и в случае тепловых фазовых переходов, далекодействующие корреляции контролируют перколяционный переход, а соответствующие величины вблизи критической точки p_c описываются формулами степенных законов и критических показателей.

Структура кластеров, образованных элементами сетей цитирования из одного и того же раздела теоретической физики высоких энергий, актуальна для выявления перколяционных фазовых переходов [25, 26].

В развитии науки о сетях и ее приложений [18] это важно:

- с точки зрения гетерогенных моделей взаимодействия компонентов, составляющих сложные сетевые системы;
- как парадигма случайной и полуслучайной связности компонентов сетевых систем;
- как подтверждение принципа универсальности фазовых переходов в большом разнообразии физических и социотехнических систем.

Понимание теории перколяции облегчает понимание сетевых систем, а также может быть использовано для количественной оценки и решения некоторых основных задач прикладной информатики и наукометрии, в частности, для обнаружения кластеров статей, имеющих схожее содержание и тесно связанных друг с другом. Данный подход к анализу связей между научными публикациями повышает точность оценки информационных циклов в наукометрии и качество индикаторов.

Таким образом, представляет интерес выявить и понять топологические свойства образующихся кластеров, а также распределение размеров кластеров и среднего расстояния между элементами сети, принадлежащими к одному кластеру.

Моделирование кластеров, образованных элементами сетей цитирования, отражающими как нелинейные процессы, происходящие в определенной научной области, так и широкое многообразие его сложных систем, дает возможность прогнозировать их динамику, выявлять скрытые связи, корреляции, циклы.

Объектом исследования выступают международные информационные сети, структурированные на основе базы данных Стэнфордского центра линейных ускорителей SPIRES-HEP. Начиная с 1974 г. ведется всесторонняя каталогизация литературы по теоретической физике элементарных частиц высоких энергий (high energy physics, HEP) в режиме онлайн и индексируется более 500000 статей, включая их полное дерево цитирования.

ИНСТРУМЕНТ И МЕТОДЫ

Базовая методика исследования исходит из задачи отображения динамики формирования сложной ассоциированной структуры исследуемой сети цитирования с узлами, связями с учетом веса различных элементов по трем базовым критериям: степени узлов, расстоянию и прочности связей между узлами.

В самом общем виде, независимо от физической природы и модели системы, теория перколяции отвечает на вопрос: какова вероятность того, что существует открытый путь из нуля до бесконечности (или существует ли бесконечный кластер связанных между собой пор или узлов)? Таким образом, проблема сводится к тому, существуют ли такие пути

для данной вероятности p . В основном теория касается существования такого кластера и его структуры по отношению к вероятности заполнения p .

В отличие от термического или магнитного фазовых переходов перколяционный переход является геометрическим фазовым переходом и характеризуется структурными свойствами кластеров вблизи критической вероятности p_c .

Мерой функциональности выступает вероятность того, что узел (или связь) принадлежит бесконечному кластеру. При $p < p_c$ существуют только конечные кластеры и $P_\infty = 0$. При $p > p_c$ P_∞ ведет себя аналогично плотности ниже критической температуры T_c и возрастает с ростом p по степенному закону:

$$P_\infty \sim (p - p_c)^\beta. \quad (1)$$

Линейный размер конечных кластеров ниже и выше p_c характеризуется длиной корреляции ξ . Длина корреляции определяется как среднее расстояние между двумя узлами в одном конечном кластере. Когда p приближается к p_c , ξ увеличивается с одинаковым показателем степени ν ниже и выше порога:

$$\xi \sim (p - p_c)^{-\nu}. \quad (2)$$

Среднее число узлов (масса) конечного кластера S также расходится с показателем γ выше и ниже p_c :

$$S \sim (p - p_c)^{-\gamma}. \quad (3)$$

Показатели β , ν и γ описывают критическое поведение типичных величин, связанных с перколяционным переходом, и называются критическими показателями.

Данные показатели степени универсальны и не зависят ни от структурных деталей решетки (например, квадратной или треугольной), ни от типа перколяции (узел, связь или континуум), а только от размерности пространства (см. таблицу). В сетевых науках применяются безразмерные величины.

Таблица. Оценки критических показателей перколяции

	Размерность пространства				
	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$	$d = 5$	$d \geq 6$
β	5/36	0.417 ± 0.003	0.5	0.7	1.0
ν	48/36	0.875 ± 0.008	0.7	0.6	0.5
γ	86/36	1.795 ± 0.005	1.8	1.6	1.0

С точки зрения формирования связной информационной сети важное значение имеют такие структурные параметры, как расстояние между

вершинами, диаметр сети, показатели кластеризации и промежуточности.

Поскольку структура перколяционных кластеров хорошо описывается фрактальной концепцией [27], обратим внимание на фрактальные размерности d_f , d_{\min} и d_l , описывающие расстояние между вершинами.

Фрактальная размерность d_f описывает $M(r)$, т.е. то, как в среднем масса M кластера внутри сферы радиуса r масштабируется с r . Размерность d_{\min} описывает самоподобие и структуру на кратчайшем пути между двумя произвольными узлами A и B , а d_l описывает $M(l)$, т.е. как M на кратчайшем расстоянии l от заданного узла масштабируется с l . Они связаны между собой:

$$d_l = \frac{d_f}{d_{\min}}. \quad (4)$$

Понятие кратчайшего расстояния (или оптимальной дистанции) играет также важную роль при описании динамических явлений в неупорядоченных системах, таких как распространение лесных пожаров или эпидемий, распространяющихся по кратчайшему пути от источника. В [27] показано, что скорость распространения фронта пожара или эпидемии связана с показателем степени ν . В сети знаний кратчайшие или оптимальные пути важны, поскольку они сообщают нам, как информация будет распространяться с наибольшей вероятностью.

На основе известной и апробированной [9, 28] программной среды *Pajek*¹ предлагается оптимизированный алгоритм динамического разделения сети с целью обнаружения появления в ней гигантского компонента, эквивалентного перколяционному переходу.

В нем можно выделить следующее:

1. Выбираем исходную сеть, полную или содержащую какую-либо подсеть в ней, с которой далее будем работать. В нашем случае сетевой параметр (.net) представляет граф цитирования части базы данных arXiv², соответствующей НЕР. Вершины графа – идентификаторы arXiv статей в виде вершин. Отношения между этими объектами, такие как цитирование статей, представлены связями между объектами, т.е. X цитирует Y . Векторный параметр (vec) представляет собой темпоральный ряд данных (даты выхода данных статей) с различным временным шагом (сутки, месяц, год);

¹ <http://mrvar.fdv.uni-lj.si/pajek/>. Дата обращения 20.04.2024. / Accessed April 20, 2024.

² <https://arxiv.org/archive/hep-th>. Дата обращения 20.04.2024. / Accessed April 20, 2024.

2. Чтобы извлечь часть сети, т.е. создать локализованное представление, необходимо определение наборов (или классов) вершин, которые необходимо выделить. Проводится разделение вершин исходной сети на некоторое количество взаимно эксклюзивных подмножеств (кластеров) с заданными временными порогом (начальным состоянием) и шагом;
3. Вычисление и детальное исследование динамических и общих параметров для каждой новой сокращенной сети [29]. Особое внимание уделяется динамике изменения гигантского компонента (largest component), измеряемого в процентах. Разделения (шаги) заканчиваются, когда этот параметр в новой сети перестанет быть значимым, т.е. от минимального значения до максимального;
4. Обработка и визуализация полученных данных временных зависимостей параметров связей в сетях цитирования.

В настоящее время существует значительный интерес к проблеме того, как образуется гигантский компонент в сетях и возможно ли прогнозирование данного процесса. Методика, включающая подробный анализ в сетях цитирования, может применяться в гораздо более широком диапазоне дисциплин – от химии, физики и биологии до социальных наук. Предлагаемый подход использует алгоритм кластеризации, который объединяет структуру цитирования и информацию о данных. Ожидается, что предлагаемая методика определяет кластеры, которые имеют отношение к перспективным научным тенденциям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В целях проведения анализа рассматривается сеть цитирования по физике высоких энергий с 1 августа 1991 г. по 12 мая 2003 г. в базе данных arXiv, в которой содержится 27770 публикаций статей в разделе High Energy Physics – Theory (HEP или hep-th) на момент сбора данных³.

Трансформированные в формат *Pajek* файлы позволяют провести исследование с данной сетью цитирования. Первый файл hep-th-new.net является сетевым файлом с 27770 вершинами и 352807 графами. Векторный файл под названием date-new.vec содержит в себе даты статей, преобразованные в количество дней, начиная с 1 августа 1991 г. Для наглядного представления результатов исследования количество дней разбито на месяцы.

Описание графиков временных зависимостей и распределения цитируемости начинается

с подробного анализа зависимости гигантского компонента от временного интервала. По оси абсцисс указано время t в месяцах, где 0 – это март 1993 г., 28 месяцев – июль 1995 г.

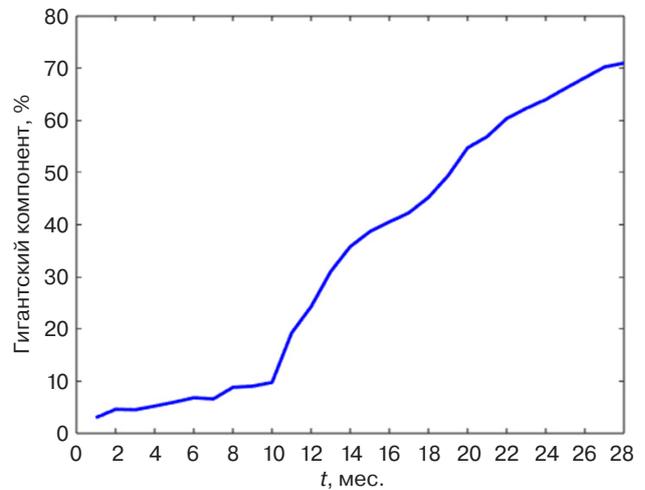


Рис. 1. Зависимость гигантского компонента от времени

На рис. 1 в промежутке 1993–1994 гг. наблюдается резкое увеличение показателя Largest component, что свидетельствует о наличии гигантского компонента. При определенном критическом значении график зависимости демонстрирует резкий рост от очень малого значения до конечной доли всей системы, что характерно для перколяционного фазового перехода. График перестает быть линейным, что сигнализирует об образовании гигантского компонента в определенный момент времени, равный 10 месяцам. Ключевым моментом для перколяционного перехода, как удалось выяснить в исследовании, является выступление на конференции по теории струн в 1994 г. Эдварда Виттена, который предложил М-теорию. В течение нескольких месяцев после заявления Виттена в сети Интернет появились сотни новых статей, подтверждающих, что новая теория играет важную роль в HEP. Сегодня этот шквал работ известен как вторая суперструнная революция. Спустя некоторое время пять теорий суперструн (тип I, тип IIA, тип IIB, HO и HE) рассматриваются как различные пределы единой М-теории.

Наблюдая резкий рост размера гигантского компонента в 10-м месяце, можно сделать предположение, что образование гигантского компонента вызвано большой публикационной активностью в HEP за этот период. Однако при проведении подробного исследования удалось выяснить, что пик публикаций приходится на 1997–1998 гг. В конце статьи будет показан график зависимости, подтверждающий этот факт.

³ <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/data/>. Дата обращения 15.04.2024. / Accessed April 15, 2024.

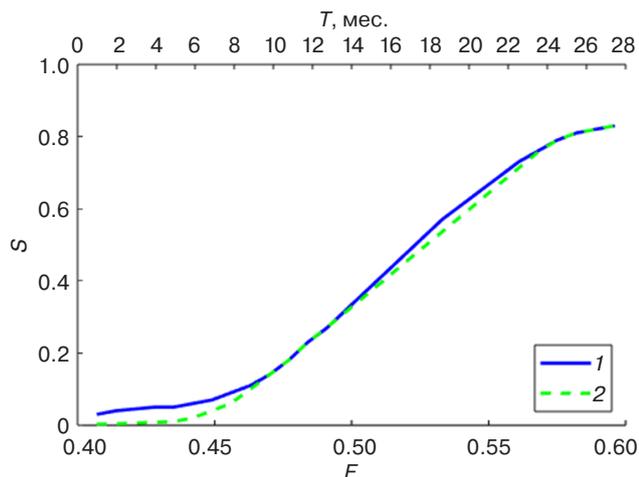


Рис. 2. Размер гигантского компонента как функция вероятности в динамике роста сети: 1 – нормированная посуточная зависимость представляемого алгоритма; 2 – нормированная пошаговая зависимость по данным моделирования [30]

На рис. 2 размер гигантского компонента S безразмерен и выражен в долях. Нормированная посуточная зависимость (график 1) представляемого алгоритма имеет сильную положительную корреляцию с нормированной пошаговой зависимостью от вероятности перколяции F (график 2) в модели динамического мнения («несогласованного мнения» или «без консенсуса», англ. non-consensus opinion, NCO), полученной в [30]. При этом обнаруживается, что фазовый переход в модели NCO принадлежит тому же классу универсальности, что и проникновение вторжения с захватом.

Обнаружено, что в [30] образование гигантского компонента наблюдается на промежутке 0.4–0.6 пошагового моделирования. Под шагом моделирования понимается доля вероятности F достижения сетью стабильного состояния. Этот промежуток совпадает с данными на временном интервале T продолжительностью

28 месяцев, полученными в данном исследовании. Из-за идентичности входных датасетов для НЕР взаимосвязь данных зависимостей ожидаема.

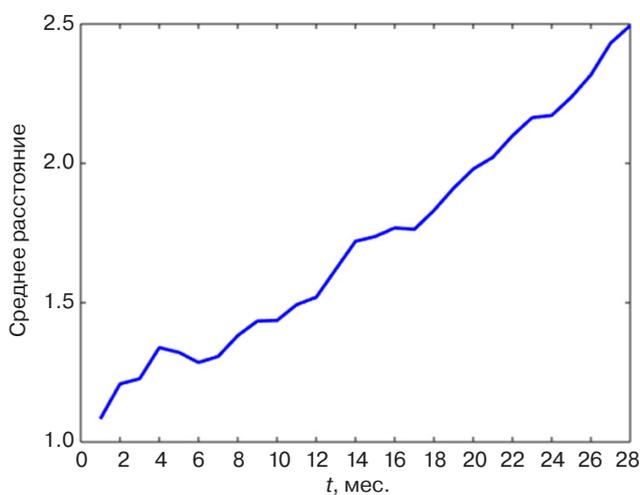
Чтобы понять, почему в этот момент происходит перколяция, изучим общие и динамические параметры исследуемой сети во временном промежутке. На рис. 3–6 показаны серии полученных зависимостей основных характеристик сети для НЕР.

Параметр «Среднее расстояние» (Average distance) отвечает за среднюю длину пути среди всех достижимых пар вершин сети [29]. Из рис. 3а следует, что с течением времени среднее расстояние в сети увеличивается, что привносит вклад в следующий параметр на рис. 3б – диаметр сети. Диаметром сети называется максимальный эксцентриситет среди всех вершин сети.

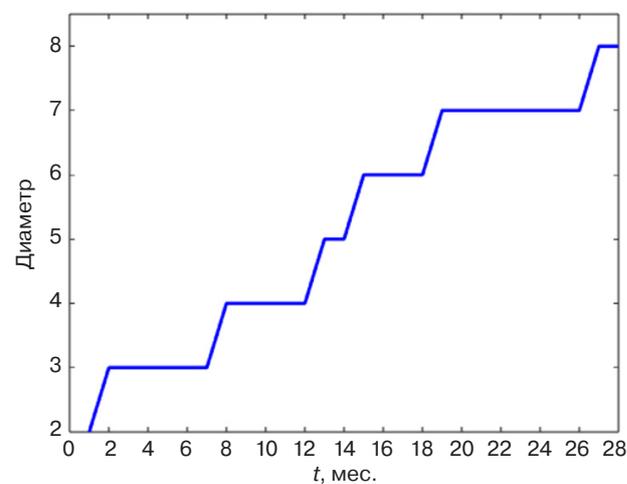
На рис. 4 показаны зависимости коэффициентов кластеризации от времени в месяцах. Коэффициент транзитивности отвечает за среднюю вероятность того, что две вершины, являющиеся сетевыми соседями одной и той же другой вершины, сами будут соседями. Резкое увеличение параметра говорит об увеличении вероятности соседства двух разных вершин в период с 1-й по 7-й месяцы, затем ситуация стабилизируется и коэффициент варьируется около 0.1.

Невзвешенное среднее значение, известное как коэффициент кластеризации Уоттса – Строгаца, также используется, но оно не дает точной доли замкнутых двухпутей. На рис. 4б коэффициент возрастает до 0.18 на 10-м месяце и стабилизируется на значении 0.13 после 18-го месяца.

На рис. 5а показано положительное линейное увеличение параметра «Общее число связей в сети» (Total link strength), что подтверждается ростом цитируемости в статьях на всем интервале исследования. Параметр «Средняя степень» (Average degree) отвечает за структурную сплоченность сети. Его увеличение свидетельствует о том, что количество связей на один узел возрастает.



(а)



(б)

Рис. 3. Зависимость среднего расстояния до вершины (а) и диаметра сети (б) от времени

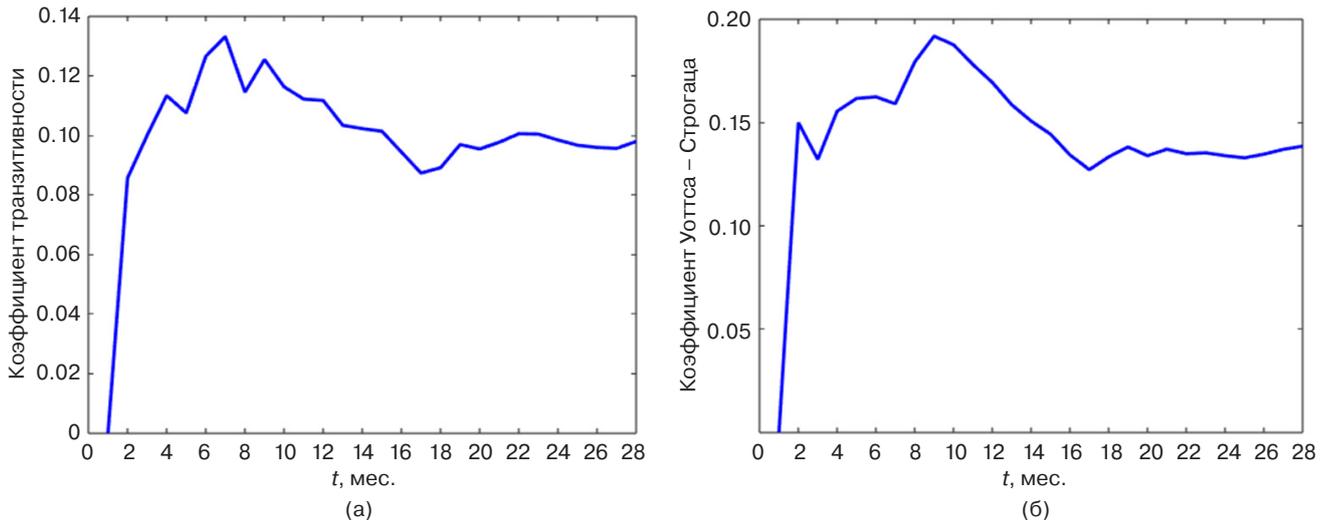


Рис. 4. Зависимость коэффициентов кластеризации от времени: (а) коэффициент транзитивности; (б) коэффициент Уоттса – Строгаца

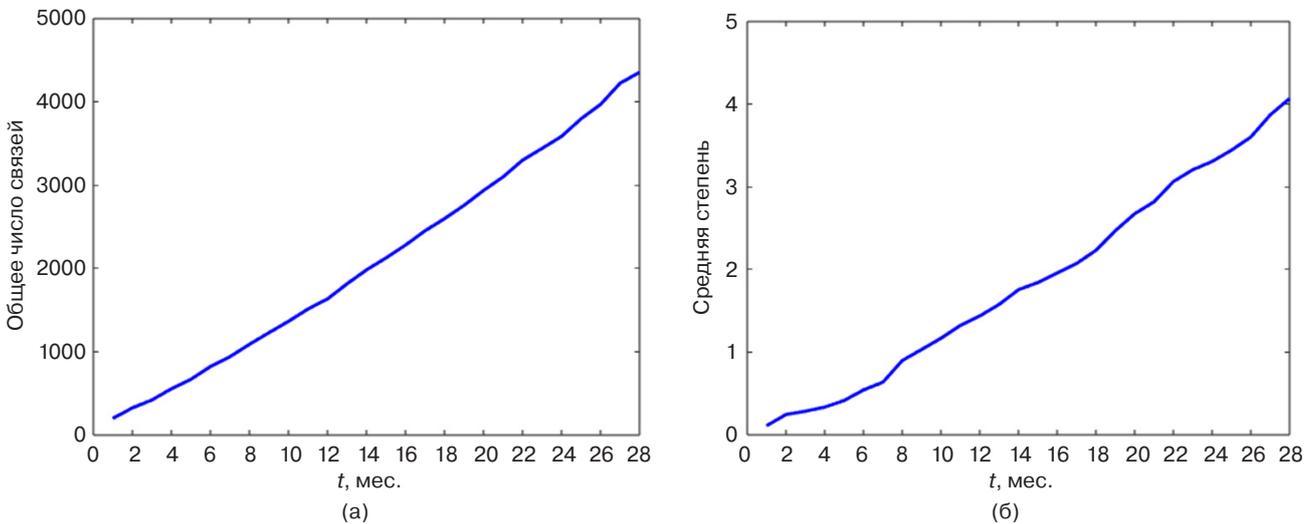


Рис. 5. Зависимость общего числа связей в сети (а) и средней степени всех вершин (б) от времени

Последним динамическим параметром в исследовании является показатель промежуточности (Betweenness centralization). Он определяет частоту интервальных значений между вершинами в сети, деленную на максимально возможное значение в сети того же размера. Другими словами, это показатель того, насколько центральными являются некоторые вершины в сети по сравнению с другими. На рис. 6 увеличение этого показателя свидетельствует о том, что в сети образуются элементы с повышенным количеством промежуточных связей, дополнительно свидетельствуя о росте ее связности. Значимость параметров Betweenness centralization и Average distance, определяющих степень передачи информации без потерь и искажений, очевидна [29].

Анализ поведения динамических и общих параметров сетей для каждой временной выборки на всем

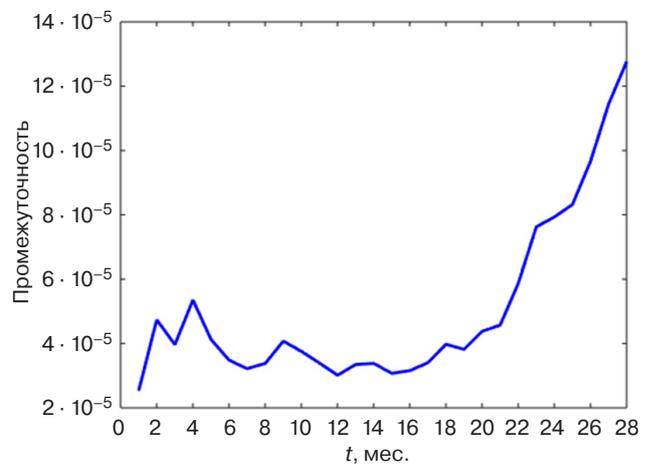


Рис. 6. Зависимость показателя промежуточности между вершинами сети от времени

интервале исследования позволил обнаружить, что сеть НЕР содержит гигантский компонент. Каждый из проведенных анализов способствует общему пониманию процессов динамики концептуальных изменений в области теоретической физики высоких энергий, которого невозможно было бы достичь без детального изучения отдельных сетевых свойств.

Завершающим этапом данного исследования является анализ распределения цитируемости с 1991 г. по 2003 г. Рассматривается общая структура подграфа для выявления влиятельных авторов. Наконец, прогнозируются потенциальные лауреаты премии в области теоретической физики высоких энергий.

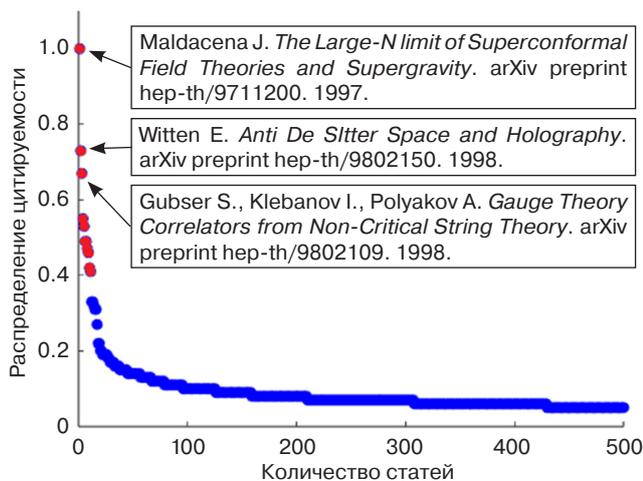


Рис. 7. Распределение цитируемости научных статей НЕР в период 1992–2003 гг.

Авторы, представившие статьи в arXiv с 1991 г. по 2003 г., были ранжированы в соответствии с количеством цитирований. Далее удалось построить зависимость доли цитирования авторов от количества статей (рис. 7). Основываясь на полученных результатах исследования, обнаружено 11 лауреатов высокоцитируемых статей, которые задавали вектор развития в разделе НЕР. Для наглядности на графике перечислены статьи из главной «тройки». Возглавляют список Хуан Мартин Малдасена, Эдвард Виттен, Стивен Скотт Губсер [31–33]. Стоит отметить, что достоверность результатов в данной зависимости подтверждается тем, что эти выдающиеся ученые связаны единой областью исследования – теорией струн. Кроме того, верификация вышеуказанного факта подтверждает то, что предлагаемый метод – рабочий.

Таким образом, определение характеристик сети НЕР позволяет внедрить новый метод для оценки цитируемости. В данном исследовании создание удобной для работы базы данных из выгружаемой сети является первым этапом. Второй задачей является определение параметров исходного файла. Далее, на практике, построение серий зависимостей параметров позволит определить важный для исследователя показатель сети и его поведение.

Практическое применение данного метода позволяет обнаружить нетривиальные зависимости различных сетей, исследование которых приводит к выявлению новых результатов. Для специалистов в узконаправленной области существует необходимость поиска ценной информации из большого объема данных определенной сети. Предлагаемая методика позволит обозначить не только момент времени, когда эта информация появилась, но и саму область, в которой она находится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование обнаруживает, что результаты перколяции частично отражают соединительные свойства сетей и, таким образом, могут использоваться в качестве алгоритма для идентификации особых подмножеств сетей, выявления сообществ агентов, придерживающихся одного и того же концептуального мнения.

В стабильном состоянии узлы, придерживающиеся одного и того же состояния, демонстрируют фазовый переход от небольших кластеров к большим связующим кластерам, когда концентрация цитирования увеличивается. Перколяционный переход, являясь индикатором внезапных концептуальных изменений в сетях цитирования, позволяет выявлять и связывать статьи в исследовательскую схему, составляющую кластер новых идей или теорий.

В графе авторов, связанных отношениями соавторства, 7304 из 9200 авторов принадлежат одному связному компоненту. Сети цитирования и авторства отражают структуру тесной коммуникации через формальную и неформальную научную литературу. Сообщество физиков НЕР публикует большое количество статей, и временной характер цитирования указывает на быстрое понимание и использование соответствующих новых работ.

Перколяция является распространенной моделью неупорядоченных систем, и подчеркивается ее тесная связь с фрактальной концепцией, от самоподобия до мультифрактальности. Поведение динамических и общих параметров реальной информационной сети для каждой временной выборки на всем интервале исследования, обнаруживает, что сеть НЕР содержит гигантский компонент. Однако анализ степени самоподобности случайных процессов, их стационарности или нестационарности подлежит дальнейшему изучению. В этой связи логическим продолжением работ является фрактальный анализ временных рядов информационных потоков в НЕР.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Newman M.E.J. *Networks: An Introduction*. Oxford; NY: Oxford University Press; 2010. 772 p.
2. Ландэ Д.В., Снарский А.А., Безсуднов И.В. Интернетика: Навигация в сложных сетях: модели и алгоритмы. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2011;7:98–99.
3. Doreian P., Batagelj V., Ferligoj A. (Eds.). *Advances in Network Clustering and Blockmodeling*. John Wiley & Sons; 2020. 432 p.
4. Newman M.E.J. The structure and function of complex networks. *SIAM Rev.* 2003;45(2):167–256. <https://doi.org/10.1137/S0036144503424280>
5. Мальцева Д.В., Павлова И.А., Капустина Л.В., Ващенко В.А., Фиала Д. Сравнительный анализ возможностей WoS и eLIBRARY для анализа библиографических сетей. *Социология: методология, методы, математическое моделирование (Социология:4М)*. 2023;56:7–68. <https://doi.org/10.19181/4m.2023.32.1.1>
6. Kinouchi O., Martinez A.S., Lima G.F., Lourenco G.M., Risau-Gusman S. Deterministic walks in random networks: An application to thesaurus graphs. *Phys. A*. 2002;315(3–4):665–676. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00972-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00972-X)
7. Motter A.E., de Moura A.P., Lai Y.-C., Dasgupta P. *Topology of the conceptual network of language*. arXiv preprint cond-mat/0206530. 2002. <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0206530v1>, <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/0206530>
8. Крамаров С.О., Попов О.Р., Джариев И.Э., Петров Е.А. Динамика формирования связей в сетях, структурированных на основе прогностических терминов. *Russian Technological Journal*. 2023;11(3):17–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-17-29>
9. De Nooy W., Mrvar A., Batagelj V. *Exploratory Social Network Analysis with Pajek: Revised and Expanded Edition for Updated Software*. 3rd ed. Ser.: Structural Analysis in the Social Sciences. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. 455 p. <https://doi.org/10.1017/9781108565691>
10. Batagelj V., Doreian P., Ferligoj A., Kejžar N. *Understanding Large Temporal Networks and Spatial Networks: Exploration, Pattern Searching, Visualization and Network Evolution*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2014. 464 p. <https://doi.org/10.1002/9781118915370>
11. Maltseva D., Batagelj V. Journals publishing social network analysis. *Scientometrics*. 2021;126:3593–3620. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03889-z>
12. Козлов А.С., Пыко С.А., Богачев М.И. Статистический анализ параметров объектов, выделяемых при многопороговой обработке случайных полей с дальнейшей корреляцией. *Наука настоящего и будущего*. 2021;2:164–167.
13. Sun H., Radicchi F., Kurths J., et al. The dynamic nature of percolation on networks with triadic interactions. *Nat. Commun.* 2023;14:1308. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37019-5>
14. Broadbent S.R., Hammersley J.M. Percolation processes: I. Crystals and mazes. *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1957;53(3):629–641. <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>
15. Stauffer D., Aharony A. *Introduction to Percolation Theory*. 2nd revised ed. London: Taylor & Francis; 2003. 180 p.
16. Dashko Yu.V., Kramarov S.O., Zhdanov A.V. Sintering of polycrystalline ferroelectrics and the percolation problem in stochastically packed networks. *Ferroelectrics*. 1996;186(1–4):85–88. <https://doi.org/10.1080/00150199608218039>
17. Brunk N.E., Twarock R. Percolation Theory Reveals Biophysical Properties of Virus-like Particles. *ACS Nano*. 2021;15(8):12988–12995. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c01882>
18. Li M., Liu R.-R., Lu L., Hu M.-B., Xu S., Zhang Y.-C. Percolation on complex networks: Theory and application. *Phys. Rep.* 2021;907:1–68. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.12.003>
19. Mondal S., Pachhal S., Agarwala A. Percolation transition in a topological phase. *Phys. Rev. B*. 2023;108(22): L220201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.L220201>
20. Лесько С.А., Алёшкин А.С., Филатов В.В. Стохастические и перколяционные модели динамики блокировки вычислительных сетей при распространении эпидемий эволюционирующих компьютерных вирусов. *Российский технологический журнал*. 2019;7(3):7–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-7-27>
21. Жуков Д.О., Хватова Т.Ю., Зальцман А.Д. Моделирование стохастической динамики изменения состояний узлов и перколяционных переходов в социальных сетях с учетом самоорганизации и наличия памяти. *Информатика и ее применения*. 2021;15(1):102–110. <https://doi.org/10.14357/19922264210114>
22. Перова Ю.П., Лесько С.А., Жуков Д.О., Чечурин А.В. Анализ и моделирование процессов в сложных социальных сетевых структурах на основе уравнения Фоккера-Планка. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2022;60:32–41. <https://doi.org/10.17223/19988605/60/4>
23. Xie J., Meng F., Sun J., Ma X., Yan G., Hu Y. Detecting and modelling real percolation and phase transitions of information on social media. *Nat. Hum. Behav.* 2021;5(9):1161–1168. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01090-z>
24. Oh S.M., Choi K., Kahng B. Machine learning approach to percolation transitions: global information. *J. Stat. Mech. (JSTAT)*. 2023;2023(8):083210. <http://doi.org/10.1088/1742-5468/aceef1>
25. Петров Е.А., Джариев И.Э., Попов О.Р., Сысоев С.М. Подход к прогнозированию универсальных динамических процессов на примере моделирования электромагнитного воздействия на газогидратные пласты. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;6:56–66. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_56
26. Сигов А.С., Жуков Д.О., Новикова О.А. Моделирование процессов реализации памяти и самоорганизации информации при прогнозировании новостных событий с использованием массивов естественно-языковых текстов. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2016;12(1):42–55.
27. Bunde A., Havlin S. *Fractals and Disordered Systems*. Springer Science & Business Media; 2012. 408 p.

28. Попов О.Р., Крамаров С.О. Исследование распространения информации в сетях, структурированных из набора прогностических терминов. *Вестник кибернетики*. 2022;1(45):38–45. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-1-38-45>
29. Джариев И.Э., Петров Е.А., Попов О.Р. и др. Исследование динамики научной образовательных сетей с помощью моделирования методом Монте-Карло. В кн.: *Возможности сочетания естественного и искусственного интеллектов в образовательных системах*. М.: Издательский Центр РИОР; 2023. С. 91–99. <https://doi.org/10.29039/02124-8>
30. Shao J., Havlin S., Stanley H.E. Dynamic opinion model and invasion percolation. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103(1):018701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.018701>
31. Maldacena J. *The Large-N limit of Superconformal Field Theories and Supergravity*. 1997. <https://arxiv.org/abs/hep-th/9711200>
32. Witten E. *Anti De Sitter Space and Holography*. 1998. <https://arxiv.org/abs/hep-th/9802150>
33. Gubser S., Klebanov I., Polyakov A. *Gauge Theory Correlators from Non-Critical String Theory*. 1998. <https://arxiv.org/abs/hep-th/9802109>

REFERENCES

1. Newman M.E.J. *Networks: An Introduction*. Oxford; NY: Oxford University Press; 2010. 772 p.
2. Lande D.V., Snarskii A.A., Bezsudnov I.V. Internet: Navigation in complex networks: models and algorithms. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2011;7:98–99 (in Russ.).
3. Doreian P., Batagelj V., Ferligoj A. (Eds.). *Advances in Network Clustering and Blockmodeling*. John Wiley & Sons; 2020. 432 p.
4. Newman M.E.J. The structure and function of complex networks. *SIAM Rev.* 2003;45(2):167–256. <https://doi.org/10.1137/S003614450342480>
5. Maltseva D.V., Pavlova I.A., Kapustina L.V., Vashchenko V.A., Fiala D. Comparative analysis of the capabilities of WoS and eLibrary for analyzing bibliographic networks. *Sotsiologiya: metodologiya, metody, matematicheskoe modelirovanie (Sotsiologiya: 4M) = Sociology: Methodology, Methods, Mathematical Modeling (Sociology: 4M)*. 2023;56:7–68 (in Russ.). <https://doi.org/10.19181/4m.2023.32.1.1>
6. Kinouchi O., Martinez A.S., Lima G.F., Lourenco G.M., Risau-Gusman S. Deterministic walks in random networks: An application to the saurus graphs. *Phys. A*. 2002;315(3–4):665–676. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00972-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00972-X)
7. Motter A.E., de Moura A.P., Lai Y.-C., Dasgupta P. *Topology of the conceptual network of language*. arXiv preprint cond-mat/0206530. 2002. <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0206530v1>, <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/0206530>
8. Kramarov S.O., Popov O.R., Dzhariyev I.E., Petrov E.A. Dynamics of link formation in networks structured on the basis of predictive terms. *Russian Technological Journal*. 2023;11(3):17–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-17-29>
9. De Nooy W., Mrvar A., Batagelj V. *Exploratory Social Network Analysis with Pajek: Revised and Expanded Edition for Updated Software*. 3rd ed. Ser.: Structural Analysis in the Social Sciences. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. 455 p. <https://doi.org/10.1017/9781108565691>
10. Batagelj V., Doreian P., Ferligoj A., Kejzar N. *Understanding Large Temporal Networks and Spatial Networks: Exploration, Pattern Searching, Visualization and Network Evolution*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2014. 464 p. <https://doi.org/10.1002/9781118915370>
11. Maltseva D., Batagelj V. Journals publishing social network analysis. *Scientometrics*. 2021;126:3593–3620. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03889-z>
12. Kozlov A.S., Pyko S.A., Bogachev M.I. Statistical analysis of object parameters identified during multi-threshold processing of random fields with long-range correlation. *Nauka nastoyashchego i budushchego = Science: Present and Future*. 2021;2:164–167 (in Russ.).
13. Sun H., Radicchi F., Kurths J., et al. The dynamic nature of percolation on networks with triadic interactions. *Nat. Commun.* 2023;14:1308. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37019-5>
14. Broadbent S.R., Hammersley J.M. Percolation processes: I. Crystals and mazes. *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1957;53(3):629–641. <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>
15. Stauffer D., Aharony A. *Introduction to Percolation Theory*. 2nd revised ed. London: Taylor & Francis; 2003. 180 p.
16. Dashko Yu.V., Kramarov S.O., Zhdanov A.V. Sintering of polycrystalline ferroelectrics and the percolation problem in stochastically packed networks. *Ferroelectrics*. 1996;186(1–4):85–88. <https://doi.org/10.1080/00150199608218039>
17. Brunk N.E., Twarock R. Percolation Theory Reveals Biophysical Properties of Virus-like Particles. *ACS Nano*. 2021;15(8):12988–12995. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c01882>
18. Li M., Liu R.-R., Lu L., Hu M.-B., Xu S., Zhang Y.-C. Percolation on complex networks: Theory and application. *Phys. Rep.* 2021;907:1–68. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.12.003>
19. Mondal S., Pachhal S., Agarwala A. Percolation transition in a topological phase. *Phys. Rev. B*. 2023;108(22): L220201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.L220201>
20. Lesko S.A., Alyoshkin A.S., Filatov V.V. Stochastic and Percolating Models of Blocking Computer Networks Dynamics during Distribution of Epidemics of Evolutionary Computer Viruses. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*. 2019;7(3):7–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-7-27>
21. Zhukov D.O., Khvatova T.Yu., Saltzman A.D. Modeling of stochastic dynamics of changes in node states and percolation transitions in social networks with self-organization and memory. *Informatika i ee primeneniya = Informatics and Applications*. 2021;15:102–110 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/19922264210114>

22. Perova Yu.P., Lesko S.A., Zhukov D.O., Chechurin A.V. Analysis and modeling of processes in complex social network structures based on the Fokker-Planck equation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 2022;60:32–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988605/60/4>
23. Xie J., Meng F., Sun J., Ma X., Yan G., Hu Y. Detecting and modelling real percolation and phase transitions of information on social media. *Nat. Hum. Behav.* 2021;5(9):1161–1168. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01090-z>
24. Oh S.M., Choi K., Kahng B. Machine learning approach to percolation transitions: global information. *J. Stat. Mech. (JSTAT)*. 2023;2023(8):083210. <http://doi.org/10.1088/1742-5468/acef1>
25. Petrov E.A., Dzhariiev I.E., Popov O.R., Sysoev S.M. An approach to prediction of universal dynamic processes: A case-study of modeling electromagnetic effect on gas-hydrate strata. *GIAB. Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten = MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;6:56–66 (in Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_56
26. Sigov A.S., Zhukov D.O., Novikova O.A. Modeling of memory realization processes and the implementation of information in self-organization in forecasting the new's events using arrays of natural language texts. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT Education*. 2016;12(1):42–55 (in Russ.).
27. Bunde A., Havlin S. *Fractals and Disordered Systems*. Springer Science & Business Media; 2012. 408 p.
28. Popov O.R., Kramarov S.O. The study of information dissemination in networks arranged from a set of forecasting terms. *Vestnik kibernetiki = Proceedings in Cybernetics*. 2022;1(45): 38–45 (in Russ.). <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-1-38-45>
29. Dzhariiev I.E., Petrov E.A., Popov O.R., et al. Studying the dynamics of scientific and educational networks using the Monte Carlo method. In: *The Possibilities of Natural and Artificial Intelligence Combining in Educational Systems*. Moscow: RIOR; 2023. P. 91–99 (in Russ.). <https://doi.org/10.29039/02124-8>
30. Shao J., Havlin S., Stanley H.E. Dynamic opinion model and invasion percolation. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103(1):018701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.018701>
31. Maldacena J. *The Large-N limit of Superconformal Field Theories and Supergravity*. 1997. <https://arxiv.org/abs/hep-th/9711200>
32. Witten E. *Anti De Sitter Space and Holography*. 1998. <https://arxiv.org/abs/hep-th/9802150>
33. Gubser S., Klebanov I., Polyakov A. *Gauge Theory Correlators from Non-Critical String Theory*. 1998. <https://arxiv.org/abs/hep-th/9802109>

Об авторах

Крамаров Сергей Олегович, д.ф.-м.н., профессор, советник президента университета, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); главный научный сотрудник, БУ ВО «Сургутский государственный университет» (628408, Россия, Сургут, ул. Энергетиков, д. 22). E-mail: maoovo@yandex.ru. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, SPIN-код РИНЦ 2821-6380, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

Попов Олег Русланович, к.т.н., доцент, эксперт-аналитик, Южное отделение МОО «Академия информатизации образования» (344065, Россия, Ростов-на-Дону, пер. Днепроvский, д. 124/5). E-mail: cs41825@aaanet.ru. ResearcherID AAT-8018-2021, SPIN-код РИНЦ 1041-0680, <http://orcid.org/0000-0001-6209-3554>

Джариев Исмаил Эльшан оглы, младший научный сотрудник, аспирант, кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления, Политехнический институт, БУ ВО «Сургутский государственный университет» (628408, Россия, Сургут, ул. Энергетиков, д. 22). E-mail: dzhariiev2_ie@edu.surgu.ru. ResearcherID GZB-1868-2022, SPIN-код РИНЦ 1667-2152, <https://orcid.org/0000-0003-4068-1050>

Петров Егор Аркадьевич, младший научный сотрудник, аспирант, кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления, Политехнический институт, БУ ВО «Сургутский государственный университет» (628408, Россия, Сургут, ул. Энергетиков, д. 22). E-mail: petrov2_ea@edu.surgu.ru. ResearcherID GZG-8857-2022, SPIN-код РИНЦ 4847-1445, <https://orcid.org/0000-0002-4151-197X>

About the authors

Sergey O. Kramarov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Advisor to the President of the University, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Chief Researcher, Surgut State University (22, Energetikov ul., Surgut, 628408 Russia). E-mail: maoovo@yandex.ru. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, RSCI SPIN-code 2821-6380, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

Oleg R. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Expert-Analyst, Southern Branch of the Academy of Informatization of Education (124/5, Dneprovskii per., Rostov-on-Don, 344065 Russia). E-mail: cs41825@aaanet.ru. ResearcherID AAT-8018-2021, RSCI SPIN-code 1041-0680, <http://orcid.org/0000-0001-6209-3554>

Ismail E. Dzhariiev, Junior Researcher, Postgraduate Student, Department of Automated Information Processing and Management Systems, Polytechnic Institute, Surgut State University (22, Energetikov ul., Surgut, 628408 Russia). E-mail: dzhariiev2_ie@edu.surgu.ru. ResearcherID GZB-1868-2022, RSCI SPIN-code 1667-2152, <https://orcid.org/0000-0003-4068-1050>

Egor A. Petrov, Junior Researcher, Postgraduate Student, Department of Automated Information Processing and Management Systems, Polytechnic Institute, Surgut State University (22, Energetikov ul., Surgut, 628408 Russia). E-mail: petrov2_ea@edu.surgu.ru. ResearcherID GZG-8857-2022, SPIN-код РИНЦ 4847-1445, <https://orcid.org/0000-0002-4151-197X>

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
Information systems. Computer sciences. Issues of information security

УДК 519.95:621.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-28-37>

EDN BUGTUV



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ вероятностных характеристик воздействия вирусных атак на цифровые подстанции

А.С. Леонтьев, Д.В. Жматов ©

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

© Автор для переписки, e-mail: zhmatov@mirea.ru

Резюме

Цели. Цель данного исследования заключается в создании аналитических методов для оценки вероятностных характеристик безопасности информационных и программных элементов цифровых подстанций. Эти методы направлены на обеспечение кибербезопасности в условиях различных сценариев воздействия вирусов.

Методы. Используются методы, базирующиеся на теории надежности, теории случайных процессов и теории восстановления.

Результаты. Выведены интегральные соотношения, которые позволяют оценить вероятностные характеристики безопасности обработки информации при выполнении функциональных задач в различных сценариях атак на цифровые подстанции, а также при использовании различных технологий защиты от подобных угроз. Проведены численные исследования вероятности безопасной обработки информации при различной интенсивности атак и времени их активации с учетом частоты проведения диагностики системы обслуживающим персоналом и требований заказчика к безопасному функционированию системы в определенный период времени. Расчеты выполнены для различных технологий защиты от подобных атак на цифровые подстанции. Показано, что технология защиты с детерминированной частотой диагностики системы может обеспечить требования заказчика к безопасности только при случайных и относительно редких вирусных атаках. Технологии защиты, учитывающие различные режимы работы обслуживающего персонала, могут обеспечить выполнение требований заказчика по вероятности безопасной обработки информации в заданный период времени и при преднамеренных атаках на цифровые подстанции.

Выводы. Рассмотренные технологии защиты информации от атак на цифровые подстанции могут обеспечить необходимый уровень безопасности функционирования информационной системы для всех видов угроз при условии увеличения частоты диагностики системы с 2 раз в 1 ч до не реже 1 раза в 25 мин. Это подчеркивает важность активной мониторинговой политики в условиях постоянно меняющейся среды атак для цифровых подстанций.

Ключевые слова: цифровые подстанции, характеристика потоков, вирусы, вероятность безопасного функционирования, информационно-вычислительные системы

• Поступила: 12.04.2024 • Доработана: 12.09.2024 • Принята к опубликованию: 21.11.2024

Для цитирования: Леонтьев А.С., Жматов Д.В. Анализ вероятностных характеристик воздействия вирусных атак на цифровые подстанции. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):28–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-28-37>, <https://elibrary.ru/BUGTUV>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Probabilistic characteristics analysis of virus attack effect on digital substations

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

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. This study aims to create analytical methods for evaluating the probabilistic safety characteristics of information and software elements in digital substations in order to ensure security in different virus scenarios.

Methods. The methods of reliability theory, random process theory, and recovery theory were used.

Results. The derived integral ratios were further used to estimate the probability characteristics of information processing security when performing functional tasks in various scenarios of attacks on digital substations, as well as multiple technologies used for protection against such threats. Numerical studies of safe information processing probability of different intensities of attacks and times of their activation were conducted, in order to consider the frequency of diagnostics of the system by the service personnel and customer requirements for the safe operation of the system in a certain period. We performed calculations for various protection technologies against similar attacks on digital substations. A protection technology with system diagnostic deterministic frequency can support customer requirements in the event of accidental and relatively rare virus attacks. Security technologies consider different maintenance personnel operation modes to ensure customer fulfillment requirements for safe information processing probability and the case of deliberate attacks on digital substations in each period.

Conclusions. The technologies considered herein for information protection from attacks on digital substations can provide the necessary level of information security system operation for all types of threats. These technologies can be applied when the system diagnostics frequency increases from twice an hour to at least once every 25 minutes. Our findings underline the importance of timely monitoring of ever-changing attack environments for digital substations.

Keywords: digital substations, flow characteristic, viruses, safe operation probability, information, and computer systems

• Submitted: 12.04.2024 • Revised: 12.09.2024 • Accepted: 21.11.2024

For citation: Leontyev A.S., Zhmatov D.V. Probabilistic characteristics analysis of virus attack effect on digital substations. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):28–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-28-37>, <https://elibrary.ru/BUGTUV>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Современные информационно-вычислительные системы (ИВС) входят в состав контура управления социально-экономическими и общественно-политическими процессами и позволяют автоматизировать основные этапы анализа сложившейся обстановки, выявить возникновение и развитие кризисных ситуаций, формировать рекомендации по их устранению и предотвращению и предоставлять аналитически обработанную и обобщенную информацию должностным лицам для выработки и принятия решений [1]. Поэтому к таким системам предъявляются повышенные требования по своевременности и достоверности обрабатываемой информации.

Программно-технические средства ИВС должны обеспечивать поддержку процессов подготовки документов с учетом возможных помех, включая воздействие вирусов, отказы, сбои, искажение информации [2]. Впервые комплексное использование аналитических методов исследования вирусных угроз и моделирование на их основе процессов воздействия вирусов на информационную систему с помощью инструментально-моделирующего комплекса программ «КОК» рассмотрено в базовой работе Костогрызова А.И. и Резникова Г.А. [3]. Для обеспечения возможности совместного использования оригинальных многоуровневых сетевых аналитических моделей исследования ИВС, учитывающих искажения во входной информации [2], и аналитических

моделей, учитывающих искажение информации вирусами, представляется целесообразным расширить класс моделей, рассмотренных в работе [3], с помощью методов теории восстановления, как это было продемонстрировано в работе [4].

Вопросы оценки вероятностно-временных характеристик процессов обработки информации с учетом отказов, сбоев, искажений входной информации при ограничениях на время обслуживания, заданных заказчиком, и оценки характеристик надежности аппаратно-программных средств ИВС и сетей, являющихся источником информации для ситуационных центров, рассмотрены в работах [2, 5, 6]. Отметим, что в настоящее время не уделяется достаточного внимания вопросам оценки воздействия вирусов на вероятностно-временные характеристики обработки информации с учетом требований заказчика к безопасности функционирования системы и с учетом различных технологий защиты информации обслуживающим персоналом. Поэтому задача аналитической оценки вероятностных характеристик безопасности информационных и программных ресурсов при различных сценариях воздействия вирусов и разных технологиях защиты информации является актуальной и обладает новизной.

Исследованию компьютерных вирусов и их влиянию на безопасность данных, основным способом проникновения вирусов в систему, а также сравнительному анализу антивирусных программ посвящены работы [7–11]. В работах [12–15] предложены аналитические модели, позволяющие более точно определить интенсивность вирусных атак. Результаты этих статей являются исходными данными для разработки модели более высокого уровня безопасности функционирования информационных технологий, которая рассматривается в данной работе.

В современном цифровом мире, где информационные технологии играют ключевую роль в управлении различными системами, включая энергетические сети, безопасность данных становится приоритетной задачей. Одним из основных вызовов в этом контексте является защита цифровых подстанций от вредоносных воздействий, таких как вирусы.

Для эффективной защиты цифровых подстанций от вирусов необходимо иметь оценочные модели, которые позволят предсказать вероятностные характеристики возможного воздействия вирусов на систему. Такие модели могут помочь в разработке стратегий защиты и принятии решений о безопасности информационной инфраструктуры.

Одним из ключевых элементов оценочных моделей является учет вероятности воздействия вирусов на цифровые подстанции. Для этого необходимо анализировать различные сценарии атак и оценивать вероятность их возникновения. Кроме того, важно учитывать

вероятность обнаружения и удаления вирусов, а также их потенциальные последствия для работы системы.

Учет временных характеристик атак представляет собой еще один значимый аспект. Возможно, вирусы проявляют активность в определенные временные интервалы или действуют непрерывно. Оценочные модели должны учитывать такие временные параметры для правильной оценки рисков и разработки соответствующих контрмер. Также необходимо учитывать различные технологии защиты, которые могут быть применены для предотвращения и обнаружения вирусных атак на цифровые подстанции. Оценочные модели должны учитывать эффективность этих технологий и их способность обеспечивать безопасность системы.

1. ОСНОВНЫЕ КИБЕРАТАКИ НА ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕКТРОПОДСТАНЦИИ

Цифровые электроподстанции представляют собой критическую часть современной инфраструктуры, обеспечивая надежную передачу и распределение электроэнергии. Однако с развитием технологий цифровые подстанции становятся более уязвимыми к кибератакам.

В табл. 1 представлен список основных вирусных атак на цифровые электроподстанции.

Тип вирусной атаки может влиять на различные аспекты цифровой электроподстанции, включая:

- *Функциональность системы.* Вирусные атаки могут нарушить нормальное функционирование систем управления, мониторинга и защиты, что приведет к выходу системы из строя или неправильной работе.
- *Безопасность данных.* Некоторые типы вирусов могут направляться на кражу или уничтожение данных, хранящихся на цифровой подстанции, что может привести к утечкам конфиденциальной информации или потере важных данных.
- *Целостность системы.* Вирусные атаки могут нанести ущерб физическому оборудованию или программным компонентам подстанции, что приводит к потере или повреждению оборудования и прерыванию работы.
- *Доступность системы.* Некоторые вирусные атаки могут вызвать отказы в обслуживании или перегрузку сетевых ресурсов, что приводит к временной недоступности системы для обработки запросов операторам.
- *Безопасность персонала.* Вирусные атаки могут создавать опасные ситуации для персонала, работающего на подстанции, например, путем изменения параметров системы без их ведома или возможного вызова физического повреждения оборудования.

Таблица 1. Вирусные атаки на цифровую электроподстанцию

Название атаки	Описание	Потенциальные последствия
SQL-инъекция	Внедрение злонамеренного SQL-кода в приложение или базу данных через некорректную обработку пользовательского ввода	Получение несанкционированного доступа к данным, изменение или удаление информации в базе данных
Вредоносное программное обеспечение	Установка вредоносного программного обеспечения на компьютеры или устройства подстанции с целью кражи данных, прерывания работы или управления системой	Нарушение работы подстанции, потеря конфиденциальности данных, прерывание электроснабжения
Фишинг	Отправка поддельных электронных сообщений с целью обмана персонала подстанции для получения доступа к системам или конфиденциальной информации	Несанкционированный доступ к системам, утечка конфиденциальных данных
DDos-атака ¹	Перегрузка сети или серверов подстанции путем отправки большого количества запросов с целью нарушения работы	Отказ в обслуживании, временное или длительное прерывание работы подстанции
Подмена GOOSE-сообщений ²	Получение несанкционированного доступа к системам подстанции путем использования украденных учетных данных	Потенциальное изменение параметров работы системы, нарушение ее работы, угроза безопасности электроснабжения
Ransomware (программа-вымогатель)	Заражение системы вредоносным программным кодом, блокировка доступа к данным, требование выкупа для их восстановления	Потеря данных, прерывание работы подстанции, финансовые убытки
Man-in-the-Middle (атака посредника)	Перехват и изменение коммуникаций между устройствами подстанции, чтобы злоумышленник мог манипулировать данными	Возможность управления и искажения данных, прерывание обмена информацией
Zero-Day Exploit (атака нулевого дня)	Использование уязвимости в программном обеспечении, которая еще не была обнаружена и устранена разработчиками	Несанкционированный доступ, внедрение вредоносного кода, потенциальная угроза безопасности системы
Спуфинг (фальсификация)	Подделка адресов или идентификационных данных, чтобы создать ложное восприятие подлинности или авторизации	Нарушение аутентификации, возможное введение в заблуждение системы управления
Атака на физические устройства	Попытка воздействия на физические компоненты подстанции, такие как силовые трансформаторы или выключатели	Потенциальные повреждения оборудования, прерывание электроснабжения

• *Финансовые потери.* В случае успешной вирусной атаки могут возникнуть значительные финансовые потери, связанные с восстановлением системы, упущенным доходом из-за простоя оборудования и компенсацией ущерба потребителям. Угрозы со стороны внутренних пользователей, таких как сотрудники энергетических компаний, также представляют серьезную опасность для безопасности цифровых подстанций. Несанкционированный доступ к системам, утеря конфиденциальной информации или злонамеренные действия внутри самой компании могут привести к катастрофическим последствиям.

Меры по предотвращению потенциальных последствий вирусных атак:

- регулярное обновление программного обеспечения и систем защиты;
- внедрение многоуровневой аутентификации для доступа к системам управления подстанциями;
- обучение персонала основам кибербезопасности и идентификации фишинговых атак;
- мониторинг сетевой активности для выявления подозрительного поведения;
- реализация четких политик безопасности и контроля доступа к критическим системам.

¹ Distributed denial of service – распределенный отказ в обслуживании. [Distributed denial of service.]

² Generic object-oriented substation event – протокол, который предназначен для связи между устройствами релейной защиты посредством передачи данных в цифровом виде по Ethernet. [Generic object-oriented substation event is a protocol designed for communication between relay protection devices by transmitting data digitally over Ethernet.]

Кибератаки на цифровые электроподстанции представляют серьезную угрозу для энергетической инфраструктуры. Понимание основных видов атак и принятие соответствующих мер по их предотвращению является важной задачей для обеспечения безопасности и надежности работы подстанций в условиях возрастающего числа киберугроз.

2. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Предполагается, что используемые средства про-филактической диагностики позволяют выявить все проникшие вирусы и следы их воздействия, а средства восстановления способны полностью восстано-вить нарушенную целостность информационных и программных ресурсов i -го типа. В результате диагностики вирусы ликвидируются, при обнаруже-нии искажений восстанавливается целостность ин-формационных и программных ресурсов, обработка прерванных запросов повторяется заново после вос-становления целостности системы.

Оценка с использованием аналитических подхо-дов основана на применении методов теории восста-новления случайных процессов [4].

Для проведения необходимых аналитических преобразований необходимо задать:

$V_{\text{возд}}(t)$ – функцию распределения (ФР) времени между воздействиями вирусов на систему;

$V_{\text{акт}}(t)$ – ФР времени активизации вируса после его проникновения в систему;

$F_{\text{диаг}}(t)$ – ФР времени между диагностиками;

$G_i(t)$ – ФР времени обработки информации i -го типа, включающего время ожидания в очереди и не-посредственно время обработки.

Используемые функции распределения в рамках теории второго порядка по математическим ожида-ниям и дисперсии аппроксимируются в аналитиче-ских моделях двухпараметрическими эрланговски-ми или гиперэкспоненциальными ФР [4].

Моменты ФР $G_i(t)$ (математическое ожидание и дисперсия) оцениваются с помощью многоуровневых моделей, описывающих процессы обработки информа-ции в системе цифровых подстанций. Данные модели формализуются в виде многоуровневых аналитических вложенных моделей (сетей массового обслуживания), с помощью которых формализуются технологические операции обработки с учетом возникающих отказов ап-паратных и программных средств [2]. Оригинальность данного подхода связана с тем, что временные харак-теристики обработки заявок во вложенных сетевых моделях аппаратного уровня слабо зависят от вида ФР, характеризующих потоки заявок на этом уровне,

а также от вида потоков в сетевой модели программ-ного уровня. Это позволяет аппроксимировать потоки на аппаратном уровне пуассоновскими потоками и про-вести не только декомпозицию сетевой модели аппа-ратного уровня, но и декомпозировать многоуровневую модель на сетевые модели различных уровней, которые исследуются аналитическими методами. В частности, модель аппаратного уровня анализируется с помощью аналитических методов промежуточной теории мас-сового обслуживания, а сетевая модель программного уровня, используя по двум первым моментам аппрок-симацию реальных распределений эрланговскими и ги-перэкспоненциальными распределениями с помощью метода этапов Эрланга, сводится к эквивалентной мар-ковской, которая анализируется известными аналитиче-скими методами.

Рассмотрим процесс восстановления, в котором точки регенерации соответствуют времени начала очередной антивирусной диагностики цифровых подстанций.

Пусть $\{t_n\}_{n=1}^{\infty}$ – процесс восстановления, момен-ты t_n которого соответствуют времени проведения очередной антивирусной диагностики системы.

Если интервалы между диагностиками τ одина-ковые, то справедлива формула:

$$\xi_i(t) = \int_0^{t_{n+1}-t} V_{\text{возд}}(t-t_n-\theta)V_{\text{акт}}(\theta)dG_i(\theta), \quad (1)$$

где $\xi_i(t)$ – вероятность того, что во время обработки заявки i -го типа произойдет заражение обрабаты-ваемой информации вирусами на интервале времени $t_n \leq t \leq t_{n+1}$, $n \geq 1$.

В соответствии с основными свойствами процес-сов восстановления и предельной теоремой теории восстановления вероятность искажения информа-ции вирусами $P_{\text{vir}(i)}$ определяется соотношением (2), а вероятность того, что информация не искажена, оценивается формулой (3):

$$P_{\text{vir}(i)} = \frac{1}{F_{\text{диаг}}^{(1)}} \int_0^{\infty} \left\{ \left[1 - F_{\text{диаг}}(t) \right] \int_0^{\tau-t} V_{\text{возд}}(t-\theta)V_{\text{акт}}(\theta)dG_i(\theta) \right\} dt, \quad (2)$$

$$P_{\text{возд}(i)} = 1 - P_{\text{vir}(i)}. \quad (3)$$

В течение заданного периода времени $T_{\text{зад}}$ от мо-мента последней профилактики при условии $T_{\text{зад}} < F_{\text{диаг}}^{(1)}$, вероятность отсутствия опасного воз-действия определяется соотношением:

$$P_{\text{возд}(i)}(T_{\text{зад}}) = 1 - \int_0^{T_{\text{зад}}} V_{\text{возд}}(T_{\text{зад}}-\theta)V_{\text{акт}}(\theta)d\theta. \quad (4)$$

Отметим, что формула (4) может использоваться и для оценки вероятности отсутствия опасных воздействий без какой-либо диагностики в предположении, что к началу периода $T_{\text{зад}}$ целостность информационных ресурсов обеспечена.

3. ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТ ОПАСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

При реализации информационных технологий на цифровых электроподстанциях частота проведения регламентных диагностик обслуживающим персоналом существенным образом зависит от частоты воздействия источников опасности, например, вирусов. При проведении расчетов будем рассматривать различные сценарии воздействия угроз (вирусов) на цифровые подстанции и различные сценарии проведения регламентных диагностик обслуживающим персоналом. Из-за недостаточного объема статистики по воздействию вирусов на цифровые подстанции будем считать, что на различных цифровых подстанциях используются одинаковые технологии защиты от вирусных воздействий.

При реализации технологий защиты предполагают, что через определенные промежутки времени осуществляется регламентная диагностика, т.е. системный контроль целостности информационных и программных ресурсов. Полагается, что в случае обнаружения неактивизировавшихся источников опасности (вирусов) или следов их воздействия происходит восстановление целостности системы предусмотренными для этого способами.

Проведем численное исследование вероятности безопасной обработки информации при различной интенсивности воздействия вирусов и времени их активации, разной частоте проведения диагностики системы обслуживающим персоналом и заданных требованиях заказчика по вероятности безопасного функционирования системы.

При расчетах используются следующие обозначения для исходных данных:

j – индекс варианта сценария и метода защиты;

$\sigma_j = \frac{1}{V_{\text{возд}}^{(1)}}$ – частота воздействия на систему для

внедрения вируса;

$\beta_j = F_{\text{акт}}^{(1)}$ – среднее время активации проникшего в систему вируса при j -м сценарии;

$T_{\text{меж},j} = F_{\text{диаг},j}^{(1)}$ – средний интервал времени между окончанием предыдущей диагностики и началом следующей при j -м сценарии;

$T_{\text{диаг},j}$ – длительность диагностики, включая восстановление целостности системы (задано заранее).

Пусть заказчик выдвигает требования по следующим параметрам:

$P_{\text{зад},j}$ – минимально допустимая вероятность безопасного функционирования системы (задано заранее заказчиком).

Оцениваются следующие показатели:

$P_{\text{возд},j}$ – вероятность отсутствия опасного воздействия в течение определенного периода $T_{\text{зад},j}$ при j -м сценарии.

С точки зрения пользователя функционирование системы полагается безопасным в течение заданного времени $T_{\text{зад}} = 1$ суткам, если в течение этого времени не состоится ни одного опасного воздействия или же если все источники опасности выявляются сразу при их проникновении в систему. Более того, реализованные модели предполагают, что после диагностики, а также после восстановления целостности система находится в полностью безопасном состоянии.

Среднее время, требуемое для проведения диагностической процедуры, включая ремонтные работы, оценивается в 60 с. Начальные данные для расчетов представлены в табл. 2.

Учитывая недостаточный объем статистики по воздействию вирусов на цифровые подстанции, сценарии воздействия вирусов, включая интенсивность воздействия вирусов и время их активации, выбирались в соответствии с данными, представленными в работе [3], а оценочные расчеты проводились при экспоненциальных функциях распределения. В этом асимптотическом случае аналитические соотношения, полученные с использованием методов теории восстановления, и аналитические формулы, представленные в работе [3], дают одинаковые результаты. Поэтому, как и в работе [3], при проведении предварительных оценочных расчетов воздействия вирусов на электрические подстанции использовался инструментально-моделирующий комплекс для оценки качества функционирования информационных систем «КОК». В дальнейшем, также как и в работе [4], реальные распределения будут аппроксимироваться по первым двум моментам двухпараметрическими эрланговскими или гиперэкспоненциальными распределениями.

На рис. 1 представлены результаты расчета вероятности безопасного функционирования цифровых подстанций при различных сценариях воздействия угроз и различных сценариях проведения регламентных диагностик целостности информационных и программных ресурсов обслуживающим персоналом ($j = \overline{1,10}$) в соответствии с заданными исходными данными (табл. 2).

На основании приведенного предварительного оценочного расчета и данных, представленных в табл. 2, можно сделать следующие выводы.

Таблица 2. Оценки безопасности функционирования информационной системы на цифровой подстанции

Характеристики угроз			Характеристики обслуживаемого прибора подстанции			Требования заказчика
j	σ_j	β_j	$T_{\text{меж},j}$	$T_{\text{диаг},j}$	$T_{\text{зад},j}$	$P_{\text{зад},j}$
1	1 нед ⁻¹	6 ч	1 нед	1 мин	1 сут	0.95
2	1 нед ⁻¹	6 ч	3 сут	1 мин	1 сут	0.95
3	1 нед ⁻¹	6 ч	1 сут	1 мин	1 сут	0.95
4	1 нед ⁻¹	6 ч	6 ч	1 мин	1 сут	0.95
5	1 нед ⁻¹	6 ч	3 ч	1 мин	1 сут	0.95
6	1 сут ⁻¹	3 ч	1 сут	1 мин	1 сут	0.90
7	1 сут ⁻¹	3 ч	6 ч	1 мин	1 сут	0.90
8	1 сут ⁻¹	3 ч	3 ч	1 мин	1 сут	0.90
9	1 сут ⁻¹	3 ч	1 ч	1 мин	1 сут	0.90
10	1 ч ⁻¹	1 ч	30 мин	1 мин	1 сут	0.90

1. Защищенность цифровых подстанций от преднамеренных угроз с частотой воздействия 1 раз в сутки обеспечивается за счет диагностики информационных и программных ресурсов не реже, чем 1 раз в 6 ч (рис. 4, $j = 7, 8, 9$).
2. Вместе с тем, для угроз, возникающих в среднем 1 раз в 1 ч, вероятность отсутствия опасного воздействия вирусов в течение суток составит 0.88 при частоте диагностики 1 раз в 30 мин, что меньше задаваемых 0.9.

Проведем исследования, позволяющие ответить на вопрос, когда режимы диагностики информационных и программных ресурсов цифровых подстанций способны обеспечить требуемую безопасность цифровых подстанций для наиболее опасного сценария вирусных атак, при котором новые вирусы проникают в систему в среднем 1 раз в 1 ч и время их активации также равно 1 ч.

На рис. 2–5 показаны зависимости вероятности отсутствия опасных воздействий на информационные ресурсы цифровых подстанций для наиболее опасного сценария преднамеренных воздействий вирусов $P_{\text{возд.10}}$ ($j = 10$) при изменении интенсивности воздействия угроз, среднего времени активации вирусов, интервала между диагностиками и вероятностно-временных требований заказчика.

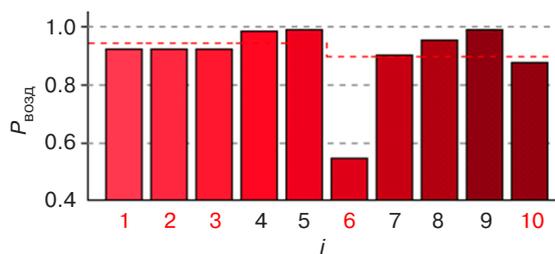


Рис. 1. Вероятность безопасного функционирования информационной системы при различных сценариях воздействия угроз ($j = 1, 10$) для цифровой подстанции

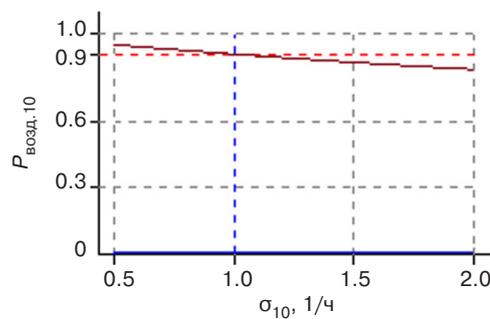


Рис. 2. Зависимость величины $P_{\text{возд.10}}$ от частоты воздействия угроз

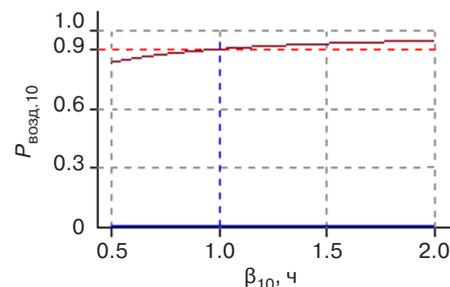


Рис. 3. Зависимость величины $P_{\text{возд.10}}$ от среднего времени активации угрозы

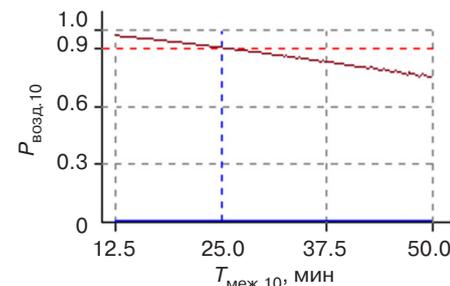


Рис. 4. Зависимость величины $P_{\text{возд.10}}$ от среднего интервала между диагностиками

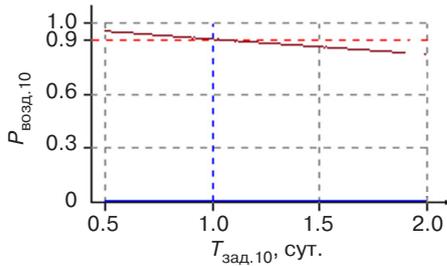


Рис. 5. Зависимость величины $P_{возд.10}$ от заданного заказчиком времени $T_{зад.10}$

Результаты расчетов, представленные на рис. 2–5, показывают, что при увеличении интенсивности вирусных воздействий заметно уменьшается защищенность системы. При увеличении времени активации вирусов увеличивается защищенность системы при всех рассмотренных сценариях. При уменьшении заданного заказчиком времени отсутствия вирусных воздействий $T_{зад}$ увеличивается защищенность системы при всех сценариях угроз и способах защиты.

Как видно из представленных оценочных результатов, защита цифровых подстанций от наиболее опасных сценариев воздействия вирусов при удовлетворении заданных требований заказчика по вероятности безопасного функционирования способна обеспечить требуемую безопасность информационных ресурсов цифровых подстанций, если реализовать диагностику системы не 1 раз в 1 ч, а не реже 1 раза в 25 мин (показано на рис. 4).

Рассмотренные сценарии вирусных угроз и способов борьбы с ними носят общий характер и могут быть применены для исследования защищенности различных цифровых подстанций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведен обзор основных видов кибератак на цифровые электроподстанции, их потенциальных последствий и мер по их предотвращению.

При проведении исследования получены интегральные соотношения, которые позволяют оценить вероятностные характеристики безопасной обработки информации цифровых подстанций в условиях различных сценариев воздействия вирусов, а также при использовании различных технологий защиты информации от опасных воздействий. Эти соотношения предоставляют возможность провести анализ вероятности безопасной обработки информации цифровых подстанций при различных интенсивности воздействия вирусов, времени их активации, частоте проведения диагностики обслуживающим персоналом и заданных требованиях заказчика по вероятности безопасного функционирования системы управления сообщениями на цифровых подстанциях.

Расчеты выполнены для различных технологий защиты информации цифровых подстанций

от опасных воздействий. Особое внимание уделено наиболее опасным сценариям воздействия вирусов и технологии защиты, которая обеспечивает заданную заказчиком безопасность функционирования цифровых подстанций в условиях всех рассмотренных угроз. Важным выводом является то, что при реализации данной технологии и уменьшении интервала проведения диагностики информационных ресурсов цифровых подстанций до 25 мин можно значительно повысить уровень безопасности функционирования системы цифровых подстанций.

Результаты исследования предоставляют практически применимые рекомендации для обеспечения безопасности информационных ресурсов цифровых подстанций при использовании современных технологий защиты от вирусных атак. Сделанные выводы актуальны в контексте растущей сложности угроз и высокой динамики развития цифровых технологий, что подчеркивает необходимость эффективных мер по обеспечению безопасности информационных систем цифровых подстанций.

Вклад авторов

А.С. Леонтьев – разработал интегральные соотношения, позволяющие оценивать вероятностные характеристики безопасности обработки информации; провел численные исследования вероятности безопасной обработки информации при различной интенсивности атак, времени их активации и частоте диагностики системы; проанализировал влияние детерминированной частоты диагностики системы на выполнение требований заказчика по безопасности при случайных и редких атаках.

Д.В. Жматов – исследовал эффективность различных технологий защиты от атак на цифровые подстанции; провел анализ технологий, учитывающих режимы работы обслуживающего персонала, и их влияние на выполнение требований заказчика; сформулировал выводы о необходимости увеличения частоты диагностики системы для обеспечения безопасности при преднамеренных атаках; подчеркнул значение активной мониторинговой политики в условиях изменяющейся среды атак.

Authors' contributions

A.S. Leontyev – developed integral equations to assess the probabilistic characteristics of information processing security; conducted numerical studies on the probability of secure information processing under varying attack intensities, activation times, and system diagnostic frequencies; analyzed the impact of a deterministic diagnostic frequency on meeting customer safety requirements under random and infrequent attacks.

D.V. Zhmatov – investigated the effectiveness of various protection technologies against attacks on digital substations; analyzed protection technologies that consider the operating modes of maintenance personnel and their impact on meeting customer requirements; formulated conclusions about the need to increase system diagnostic frequency to ensure security under deliberate attacks; emphasized the importance of an active monitoring policy in the changing threat landscape for digital substations.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старовойтов А.В., Стариков П.П., Дубицкий К.А., Лукьянов С.Э., Павлов Л.П., Симонов В.М., Съедин Д.Ю. Комплекс автоматизированных государственных информационных систем поддержки управленческих решений в сфере науки и техники. *Информатизация и связь*. 2021;6:7–19. <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2021-12-6-7-19>
2. Леонтьев А.С. Многоуровневые аналитические и аналитико-имитационные модели оценки вероятностно-временных характеристик многомашинных вычислительных комплексов с учетом надежности. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023;5(131). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.8>
3. Костогрызлов А.И., Резников Г.Я. Моделирование процессов опасного воздействия на защищаемую информационную систему. *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2004;2:17–27.
4. Гусев К.В., Леонтьев А.С. Теоретическое развитие моделей для оценки защищенности от несанкционированного доступа и сохранения конфиденциальности используемой информации. *ИТ Стандарт*. 2021;4(29):38–44.
5. Акимова Г.П., Соловьев А.В., Тарханов И.А. Моделирование надежности распределенных вычислительных систем. *Информационные технологии и вычислительные системы (ИТuBC)*. 2019;3:70–86. <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
6. Павский В.А., Павский К.В. Математическая модель для расчета показателей надежности масштабируемых вычислительных систем с учетом времени переключения. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2020;2(212):134–145. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-134-145>
7. Минитаева А.М., Соколов А.В. Основные способы проникновения и воздействия файловых вирусов на систему. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2023;4–3(79):56–60. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-4-3-56-60>
8. Литвинов П.В. Имитационное моделирование вопросов информационной безопасности как инструмент оценки защищенности и оптимизации затрат. *Мир компьютерной автоматизации*. 2016;1:43–53.
9. Блазущка Е.Ю., Шарафутдинов А.Г. Вирусы нового поколения и антивирусы. *NovaInfo.ru*. 2015;1(35):92–94.
10. Попов И.О., Марунько А.С., Петров О.И., Олейник А.А. Вирусы и антивирусные программы в информационной безопасности. *Научные записки молодых исследователей*. 2020;8(4):74–80.
11. Сиденко Г.А., Редько Г.В., Безнос О.С. Сравнительный анализ антивирусных программ. *Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet»*. 2020;9:676–680.
12. Заводцев И.А., Борисов М.А., Бондаренко М.М., Мелешко В.А. Уточненный способ аналитического моделирования процессов распространения вирусного программного обеспечения для оценки защищенности объектов информатизации. *Computational nanotechnology*. 2022;9(1):11–20.
13. Бойко А.А. Способ аналитического моделирования процесса распространения вирусов в компьютерных сетях различной структуры. *Труды СПИИРАН*. 2015;5(42):196–211. <https://doi.org/10.15622/sp.42.4>
14. Магазев А.А., Цырульник В.Ф. Исследование одной марковской модели угроз безопасности компьютерных систем. *Моделирование и анализ информационных систем*. 2017;24(4):445–458. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2017-4-445-458>
15. Котенко И.В., Воронцов В.В. Аналитические модели распространения сетевых червей. *Труды СПИИРАН*. 2007;4:208–224. <https://doi.org/10.15622/sp.4.15>

REFERENCES

1. Starovoitov A.V., Starikov P.P., Dubitsky K.A., Lukyanov S.E., Pavlov L.P., Simonov V.M., Syedin D.Yu. Computerized complex of federal information systems for supporting decision-making in the field of science and technology. *Informatizatsiya i svyaz' = Informatization and Communication*. 2021;6:7–19 (in Russ.). <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2021-12-6-7-19>
2. Leontyev A.S. Multilevel Analytical and Analytical-Simulation Models for Evaluating the Probabilistic and Temporal Characteristics of Multimachine Computing Complexes with Regard to Reliability. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2023;5(131) (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.8>
3. Kostogryzov A.I., Reznikov G.Y. Modeling of Hazardous Impact Processes on Protected Information System. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information Technologies in Design and Production*. 2004;2:17–27 (in Russ.).
4. Gusev K.V., Leontiev A.S. Theoretical Development of Models for the Assessment of Security against Unauthorized Access and Preservation of the Confidentiality of the Information Used. *IT Standard*. 2021;4(29):38–44 (in Russ.).
5. Akimova G.P., Solovyev A.V., Tarkhanov I.A. Modeling the reliability of distributed information systems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2019;3:70–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718632190307>
6. Pavsky V.A., Pavsky K.V. Mathematical Model for Calculating Reliability Indicators of Scalable Computer Systems Considering Switching Time. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2020;2(212):134–145 (in Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-134-145>
7. Minitaeva A.M., Sokolov A.V. Main Ways of Penetration and Impact of File Viruses on the System. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023;4–3(79):56–60 (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-4-3-56-60>

8. Litvinov P.V. Simulation modeling of information security issues as a tool for assessing security and cost optimization. *Mir komp'yuternoi avtomatizatsii = Computer Automation World*. 2016;1:43–53 (in Russ.).
9. Blazutskaya E.Y., Sharafutdinov A.G. Next Generation Viruses and Antiviruses. *NovaInfo.ru*. 2015;1(35):92–94 (in Russ.).
10. Popov I.O., Marunko A.S., Petrov O.I., Oleinik A.A. Viruses and Antivirus Programs in Information Security. *Nauchnye zapiski molodykh issledovatelei = Scientific Notes of Young Scientists*. 2020;8(4):74–80 (in Russ.).
11. Sidenko G.A., Redko G.V., Beznos O.S. Comparative Analysis of Antivirus Programs. *StudNet*. 2020;9:676–680 (in Russ.).
12. Zavodtsev I.A., Borisov M.A., Bondarenko M.M., Meleshko V.A. Refined Method of Analytical Modeling of Viral Software Propagation Processes for Assessing Security of Informatization Objects. *Computational Nanotechnology*. 2022;9(1):11–20 (in Russ.).
13. Boyko A.A. Method of Analytical Modeling of Viruses Propagation Process in Computer Networks with Different Topology. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2015;5(42):196–211 (in Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.42.4>
14. Magazev A.A., Tsyrunik V.F. Investigation of a Markov Model for Computer System Security Threats. *Aut. Control Comp. Sci.* 2018;52(7):615–624. <https://doi.org/10.3103/S0146411618070180>
[Original Russian Text: Magazev A.A., Tsyrunik V.F. Investigation of a Markov Model for Computer System Security Threats. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem*. 2017;24(4):445–458 (in Russ.). <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2017-4-445-458>]
15. Kotenko I.V., Vorontsov V.V. Analytical Models of Network Worms Propagation. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2007;4:208–224 (in Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.4.15>

Об авторах

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

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

About the authors

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

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

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
Information systems. Computer sciences. Issues of information security

УДК 004.855.5:004.622

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-38-48>

EDN HJHQTR



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Тематическое моделирование в потоке коротких сообщений на русском языке

Е.С. Мозайдзе[@]

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород,
308012 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: mozaidze95@mail.ru

Резюме

Цели. Работа посвящена тематическому моделированию коротких сообщений, поступающих посредством социальных сетей или другим способом в виде серии. Такая задача возникает в системах работы с населением в государственных и муниципальных структурах, в центрах опроса общественного мнения, а также в системах обслуживания клиентов и маркетинговых подразделениях. Цель работы – разработка и экспериментальная проверка набора алгоритмов тематической модели для автоматического определения основных тем обмена информацией и типичных сообщений, иллюстрирующих эти темы.

Методы. Используются методы переменных статистических распределений, примененных к статистике коллокаций, и подходы, характерные для решения задач тематического моделирования коротких текстов, но в применении к следующим друг за другом сообщениям. Таким образом, задачи онлайн-обучения и тематического моделирования рассматриваются в совокупности.

Результаты. Рассмотрено построение тематической модели, в которой найденные кластеры с предъявлением их типичных представителей и текущего веса могут помочь человеку в принятии решений в соответствии с тематикой этих наиболее важных сообщений. Предложенный метод был экспериментально протестирован на корпусе реальных сообщений. Результаты тематического моделирования (построенные тематические модели) согласуются с результатами, полученными вручную: выбранные сообщения, иллюстрирующие проблемные темы с наибольшим весом, являются таковыми и с точки зрения экспертов.

Выводы. Предлагаемый алгоритм тематического моделирования позволяет автоматически выявлять наиболее важные темы в текущем общении, показывает посты, служащие индикаторами этих тем, что позволяет существенно упростить решение задачи.

Ключевые слова: тематическое моделирование, EM-алгоритм, скрытое размещение, метод поточной перенормировки

• Поступила: 25.03.2024 • Доработана: 30.09.2024 • Принята к опубликованию: 17.11.2024

Для цитирования: Мозайдзе Е.С. Тематическое моделирование в потоке коротких сообщений на русском языке. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):38–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-38-48>, <https://elibrary.ru/HJHQTR>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Topic modeling in the stream of short messages in Russian

Elena S. Mozaidze @

V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, 308012 Russia

@ Corresponding author, e-mail: mozaidze95@mail.ru

Abstract

Objectives. This work is devoted to the topic modeling of short messages received through social networks or in another way in the form of a series of short messages. This need arises in public relations systems in state and municipal structures, in public opinion polling centers, as well as in customer service systems and marketing departments. The aim of the work is to develop and experimentally test a set of algorithms for a thematic model for automatically determining the main topics of information exchange and typical messages illustrating these topics.

Methods. The work uses methods of variable statistical distributions applied to collocation statistics and approaches typical for resolving problems of topic modeling of short texts, but applied to successive messages. In this way, online machine learning and topic modeling are considered jointly.

Results. The work considered the construction of a thematic model in which clusters found with the presentation of their typical representatives and current weight can help decision-making in accordance with the subject of these most important messages. The proposed method was experimentally tested on a corpus of real messages. The results of topic modeling (the constructed thematic models) are consistent with the results obtained manually. The messages selected illustrate that the topics with the highest weight are seen as such from the point of view of human experts.

Conclusions. The proposed algorithm of topic modeling allows the most important topics in current communication to be automatically identified. It shows posts that serve as indicators of these topics, and thereby significantly simplifies the solution of the problem.

Keywords: topic modeling, EM-algorithm, hidden placement, streaming renormalization method

• Submitted: 25.03.2024 • Revised: 30.09.2024 • Accepted: 17.11.2024

For citation: Mozaidze E.S. Topic modeling in the stream of short messages in Russian. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):38–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-38-48>, <https://elibrary.ru/HJHQTR>

Financial disclosure: The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

При работе с социальными сетями и мессенджерами почти всегда возникает задача автоматизированного поиска наиболее важной темы в обмене сообщениями. Это связано с многими причинами, среди которых необходимость модерации чата, выявление моментов, когда требуется вмешаться ответственному лицу, поиск наиболее важных на текущий момент тем общения людей в контексте тематики чата.

Исследуемый в работе случай относится к информационному обмену в социальных сетях города Белгород по той причине, что у авторов имеется возможность получить эти данные, однако, предлагаемая методика применима к любому предмету

исследований подобного рода, для которого имеется достаточное количество данных.

Тематическое моделирование (topic modeling) – это способ научить машину (компьютер) выделять в текстах содержательные темы. Например, проанализировав массив новостных и публицистических текстов, можно выделить определенные темы. Конечно, компьютеры не могут понять смысл статей буквально, но если есть большая коллекция текстов с разными темами, то вероятности совместного употребления слов позволяют выделить отдельные тематические пласты.

Тематический пласт, «отфильтрованный» из множества текстов – это просто набор слов, характерных для темы. Слова в таком наборе отсортированы

по важности для данной темы [1–3]. В терминах кластерного анализа тема – это результат бикластеризации, т.е. одновременной кластеризации и слов, и документов по их семантической близости.

В 1998 г. одними из первых интерес к теме вероятностной тематической модели проявили ученые К. Пападимитриу, Х. Томаки, С. Вемпала и П. Рагаван [4]. Их работа была посвящена скрытому семантическому индексированию (latent semantic indexing, LSI) – методу поиска информации, основанному на спектральном анализе базы документов.

Дальнейшее развитие этой темы отражено в работах зарубежных ученых.

Томас Хофман [5] изучал вероятностное скрытое семантическое индексирование. В отличие от стандартного скрытого семантического индексирования с помощью разложения по сингулярным значениям, вероятностный вариант имеет прочную статистическую основу и определяет надлежащую генеративную модель данных. Поиск эксперименты на ряде тестовых коллекций показывают существенный прирост производительности по сравнению с методами прямого сопоставления терминов, а также с LSI.

Дэвид Блей [6–8] рассматривал контролируемое скрытое распределение Дирихле (spatial latent Dirichlet allocation, sLDA) или статистическую модель помеченных документов. В своих работах он иллюстрирует преимущества sLDA по сравнению с современной упорядоченной регрессией, а также по сравнению с неконтролируемым анализом (latent Dirichlet allocation, LDA), за которым следует отдельная регрессия.

Американский ученый в области информатики, доцент Стэнфордского университета, исследователь робототехники и машинного обучения, один из основателей платформы онлайн-обучения «Coursera»¹ Эндрю Ын давно предсказал² [3], что распознавание естественного языка станет основным способом взаимодействия человека с компьютером. В своей работе он обратил внимание на обучение с подкреплением, как на один из способов машинного обучения.

Также свой вклад в развитие этой темы внесли и российские ученые.

Воронцов К.В. [9] предложил в своей работе аддитивную регуляризацию тематических моделей (additive regularization of topic models, ARTM), которая основана на максимизации взвешенной суммы логарифма правдоподобия и дополнительных критериев – регуляризаторов. Это упрощает

комбинирование тематических моделей и построение сколь угодно сложных многоцелевых моделей.

Потапенко А.А. [10] рассмотрен обобщенный EM-алгоритм³ с эвристиками сглаживания, сэмплирования и разреживания, позволяющий при различных сочетаниях этих эвристик получать как известные тематические модели, так и новые.

Лукашевич Н.В. [11], Нокель М.А.⁴ представили результаты экспериментов по добавлению биграмм в тематические модели и учету сходства между ними и униграммами. Они предложили новый алгоритм PLSA-SIM, являющийся модификацией алгоритма построения тематических моделей PLSA (probabilistic latent semantic analysis).

В статье Коршунова А.В., Гомзина А.Г. представлен сравнительный обзор различных моделей, описаны способы оценивания их параметров и качества результатов, а также приведены примеры открытых программных реализаций [12].

Разработаны программные библиотеки для тематического моделирования, такие как *Mallet*⁵, *Gensim*⁶ и *BigArtm*⁷, позволяющие создавать вероятностное тематическое моделирование.

Несколько лет назад началось активное использование инструментов больших языковых моделей (large language model, LLM), в т.ч. для решения задач тематического моделирования. Появилось довольно большое число работ в этом направлении, из которых, применительно к целям настоящей работы, можно указать следующие. В работе [13] авторы исследуют ключевые события в новостных лентах. Рассматривается проблема их идентификации и связей. Исследование построено на использовании LLM для поиска и резюмирования, а собственно тематическое моделирование делается выбором топовой темы алгоритмом скользящего

³ Expectation–maximization – алгоритм, используемый в математической статистике для нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей, в случае, когда модель зависит от некоторых скрытых переменных. [An expectation–maximization (EM) algorithm is an iterative method used in mathematical statistics to find maximum likelihood estimates of the parameters of probabilistic models when the model depends on some hidden variables.]

⁴ Нокель М.А. *Методы улучшения вероятностных тематических моделей текстовых коллекций на основе лексико-терминологической информации*: автореферат дис. ... канд. ф.-м. наук. М., 2015. 20 с. [Nokel M.A. *Methods for improving probabilistic topic models of the text collections based on lexicoterminological information*: Cand. Sci. Thesis (phys.-math.). Moscow, 2015. 20 p. (in Russ.).]

⁵ <http://mallet.cs.umass.edu/topics.php>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

⁶ <https://radimrehurek.com/gensim>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

⁷ <http://bigartm.org>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

¹ <https://www.coursera.org>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

² Ng A.Y. *Shaping and Policy Search in Reinforcement Learning*. Ph.D. Thesis, UC Berkley, 2003.

окна. Несмотря на хорошие результаты в заявленной области, динамика распределения тем в работе явно не учитывается и, кроме того, не происходит дообучение модели. В статье [14] рассматривается интерпретация результатов тематических моделей с использованием большой языковой модели ChatGPT⁸. Любопытно, что результат работы показал, что данная LLM почти в половине случаев расходится в интерпретации с человеком. Целью работы было просто продемонстрировать способность ChatGPT описывать темы и предоставлять полезную информацию, но в самом тематическом моделировании LLM не помогала^{9, 10}. Работы посвящены, соответственно, тематическому моделированию суммаризованных текстов и оценке контекстуализированной тематической согласованности. В первой работе показано, что LLM успешно транслирует смысл в суммаризованные тексты, но тематическое моделирование на них получается не всегда верным – качество зависит от контекста. Предложенная авторами второй работы автоматическая оценка согласованности тем хорошо работает с короткими документами и не подвержена влиянию бессмысленных, но высоко оцененных тем. Этот результат, безусловно, заслуживает рассмотрения и использования для дальнейших исследований.

Постановка задачи и концепция исследования текстов, поступающих в адрес государственных структур, для распределения их по структурным единицам управления, соответствующим тематикам текстов, были целью работы [1], результаты которой используются в настоящем исследовании.

Целями данной работы являются разработка и экспериментальная проверка набора алгоритмов тематического моделирования, который приведет к построению набора кластеров с предъявлением их типичных представителей и текущего веса, при соблюдении обычных для тематического моделирования условий нормировки и распределения.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Постановка задачи

Пусть имеется постоянно действующая система, принимающая сообщения короткой и средней длины (ремарки, обращения). Это может быть персональная страница в социальной сети, веб-сервис

по приему обращений, электронный почтовый ящик с автоматизированной выгрузкой текстов, система управления отношениями с клиентами и т.д.

Чаще всего для собранной таким образом информации возникает одна из двух задач: 1) распределить сообщения по заранее заданным группам (классам), или 2) сгруппировать сообщения в заранее неопределенные группы (кластеры) с близкой семантикой. Будем рассматривать вторую задачу на потоке сообщений, а именно: каждому вновь пришедшему сообщению сопоставим вектор, координаты которого представляют собой вероятности принадлежности данного сообщения к сформированным к этому моменту кластерам.

Указанная задача является задачей тематического моделирования или, иначе говоря, мягкой бикластеризации. В данной формулировке задача усложняется тем, что множество сообщений не является ограниченным, и необходимо либо каждый раз определять число кластеров, либо зафиксировать его и расформировывать лишние кластеры.

В случае удовлетворительного решения описанная задача может применяться в системах работы с населением для государственных и муниципальных структур, в центрах опроса общественного мнения, а также в системах CRM (customer relationship management – управление взаимоотношениями с клиентами) и маркетинговых службах корпораций.

1.2. Метод решения

Методы тематического моделирования основаны, как правило, на вычислениях частотностей слов в документах, а также слов и документов в темах. Чаще всего для тематического моделирования используются EM-алгоритм^{11, 12} или скрытое размещение Дирихле¹³. Отличительными чертами и того, и другого является необходимость взвешивания всех слов в сообщениях без принятия во внимание смысловых связей. Смыслы восстанавливаются по известным смыслам в больших массивах текста. По сути, тематическое моделирование только осуществляет бенчмаркинг смысла.

В поставленной задаче работа со смыслом описанным способом (похожим на бенчмаркинг) не представляется возможной, т.к. сообщения, как правило, короткие и часто содержат грамматические ошибки. В таком случае крайне тяжело

⁸ <https://chat-gpt.org/>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

⁹ <https://arxiv.org/abs/2403.15112>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

¹⁰ <https://arxiv.org/abs/2305.14587>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

¹¹ <https://pythobyte.com/python-for-nlp-topic-modeling-8fb3d689/?ysclid=lgdpq14ef3963911399> (in Russ.). Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

¹² <https://mathprofi.com/userinfo/14285/> (in Russ.). Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

¹³ <https://digitrain.ru/articles/252142/> (in Russ.). Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

ориентировать их на какую-то тему бенчмаркингом – для этого требуется большой блок текста.

В работе [1] предложена методика работы с сообщениями на основе пар «существительное – глагол», набор которых ставится в соответствие каждому сообщению, имеющему хоть одну такую пару. В данной работе будем считать, что такое отображение уже произведено и каждое сообщение имеет идентификатор и набор соответствующих ему пар «существительное – глагол».

Далее предполагается, что:

- сообщения следуют друг за другом и каждое имеет идентификатор;
- если в сообщении нет глаголов или существительных, оно считается несущественным, не принимается в расчет, но идентификатор ему присваивается;
- для скользящего окна сообщений имеется журнал пар «существительное – глагол» с соответствующим идентификатором сообщения;
- темы идентифицируются существительными, входящими в сообщения;
- каждая пара «существительное – глагол» имеет вероятность (число от 0 до 1) вхождения в тему таким образом, что сумма вероятностей для пары по всем темам равна 1;
- каждое сообщение имеет вероятность вхождения в тему, и сумма вероятностей сообщения по всем темам равна 1;
- максимальное количество тем фиксировано, удаление тем производится на основе показателя веса темы, рассчитываемого как произведение средней вероятности пары в теме на число сообщений, имеющих отношение к теме.

Такие предположения позволяют воспользоваться методом поточной перенормировки – регулярного отбрасывания элементов с малым весом.

Далее рассмотрим поочередно шаги процесса анализа сообщений в движущемся окне.

1.2.1. Препроцессинг

На вход анализатора поступают сообщения, представляющие собой текст на русском языке из одного или нескольких предложений. Для подготовки к моделированию над текстом сообщения производятся следующие операции:

- токенизация предложений (разделение на предложения) средствами *nltk*¹⁴;
- токенизация слов в предложении средствами *nltk*;
- определение частей речи токенов средствами *nltk*;

- лемматизация существительных и глаголов средствами *pymorphy2*¹⁵;
- составление пар «существительное – глагол» по правилу «ближайшие соседи».

Все это реализовано в программном модуле *appeals_processing.ipynb*¹⁶ и может работать в реальном времени в потоке сообщений.

1.2.2. Тематическое моделирование

На выходе препроцессора *appeals_processing.ipynb* получаем множества лемматизированных существительных (nouns) и глаголов (verbs), содержащихся в окне сообщений, длиной *A* строк, а также .csv или .json файл (в настоящее время реализовано получение .csv, но перенастройка в .json не представляет труда), в каждой строке которого представлен список из трех элементов:

- строка вида «[(сущ1, глаг1), ..., (сущN, глагN)]»;
- номер файла;
- номер сообщения в файле.

Таким образом, набор пар «существительное – глагол» с одной стороны может быть вложен в числовое множество, а с другой стороны – однозначно связан с сообщением, по которому он построен.

Далее для каждой пары в каждом сообщении реализуется следующий алгоритм, шаги которого рассматриваются подробнее в разделе «Результаты»:

1. Если существительное содержится в темах, то пара включается в эти темы, а также во вновь созданные для данного сообщения темы с равными вероятностями.
2. Если существительное не содержится в темах, но глагол содержится в темах, то пара включается в эти темы с вероятностями, уменьшенными множителем μ (задаваемый постоянный параметр), а также создается новая тема по существительному, и пара включается в нее и во вновь созданные для данного сообщения темы с равными вероятностями.
3. Если ни существительное, ни глагол не содержатся в темах, то формируется новая тема по существительному, и пара включается в нее, а также во вновь созданные для данного сообщения темы с равными вероятностями.

После того, как все пары всех сообщений обработаны этим алгоритмом, создается .json файл тематической модели: каждому ключу темы (существительному) ставится в соответствие .json объект с ключами – парами «существительное – глагол», а значениями – вероятностями вхождения пары в тему.

¹⁵ <https://github.com/pymorphy2/pymorphy2>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

¹⁶ <https://disk.yandex.ru/d/8LPWy3ZP-7V30Q> (in Russ.). Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

¹⁴ <https://www.nltk.org/>. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

Итогом тематического моделирования является свернутый по значениям вероятностей пар .json объект тематической модели: в нем каждому ключу темы соответствует числовое значение веса этой темы. Отсортированный по убыванию значений этот объект даст искомые кластеры с их весами.

1.3. Материалы

Данные для настоящего исследования были подготовлены из входящих сообщений, пришедших в администрацию города Белгород, путем удаления собственных имен и других признаков, демаскирующих персональные данные. Обработанный таким образом датасет представлял собой .csv файл с заголовком вида «Дата; Время; Вопрос», любое сообщение можно восстановить по дате и времени получения. Вопросы и являлись теми самыми сообщениями (обращениями), которые были подвергнуты обработке со следующими целями: построить облако тегов (которое в данном случае являлось облаком тем) и выявить наиболее важные вопросы.

В датасет входило 3621 сообщение, часть из которых повторялись (люди копировали вопрос и отправляли снова), а некоторые не содержали пар «существительное – глагол» или были написаны с нарушением орфографии так, что слова не находились в базовых словарях.

Просмотр датасета был организован скользящим окном по 300 сообщений. Это средний объем сообщений за месяц. Таким образом, система анализировала контент обращений за прошедший месяц и выдавала темы и наиболее важные вопросы в сообщениях за этот период. Так как окно скользящее, то результат работы мог меняться каждый день и даже с каждым новым сообщением.

В настоящее время специалисты администрации определяют приоритет рассмотрения обращений вручную. Предлагаемая программная система сможет делать это автоматически. В работе предлагается метрика для измерения качества сортировки обращений машиной в сравнении с сортировкой людьми.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Вычисление вероятностей в тематической модели

На входе в алгоритм тематического моделирования имеются:

- .csv-файл или другой источник обращений, содержащий дату и время получения обращения и его текст;
- словари существительных и глаголов русского языка;

- построенный к этому моменту (по сообщению номер m) словарь T_m тематической модели: по ключу-существительному находится словарь с ключом – парой «существительное – глагол» и значением в виде вероятности принадлежности пары к теме; в начале работы этого словаря еще нет, он иницируется по первому существенно (содержащему существительное и глагол) обращению.

В словаре тематической модели сумма значений вероятностей (далее – просто значений) по всем темам для данной пары должна равняться 1. То есть,

$$T_m = \{t : \{s : p_{st}\}\}, \sum_t p_{st} = 1 \quad \forall s \in S_m,$$

где t – существительное (тема), s – пары «существительное – глагол», построенные из набора S_m , содержащего m обращений, p_{st} – вероятность того, что пара s принадлежит теме t .

Выход алгоритма представляет собой новый словарь T_{m+1} тематической модели, удовлетворяющий тому же требованию.

Возможные случаи для каждой пары s из обращения $m+1$:

1. Если в T_m уже имеется пара s , то все ее значения заменяются на величины $\hat{p}(1 - p_0 n_0)$, где \hat{p} – текущее значение, а p_0, n_0 – значение для пары s в новых темах и их количество, соответственно;
2. Если в T_m нет пары s , но имеется тема, совпадающая с существительным из пары s , то s вписывается в словарь этой темы со значением, равным p_1 ; кроме того, пара s записывается во все вновь созданные темы с вероятностями p_4 ;
3. Если в T_m нет темы, совпадающей с существительным из s , но в каких-то темах есть пара с глаголом из s , то s вписывается в словари этих тем со значением, равным p_2 ; кроме того, пара s записывается во все вновь созданные темы с вероятностями p_5 ;
4. Если ни существительное, ни глагол из пары s не присутствуют в T_m , то в T_{m+1} создается новая тема (по существительному из s), и s записывается в нее с вероятностью p_3 ; во все остальные вновь созданные темы s записывается с вероятностью p_6 .

Таким образом, имеем непересекающиеся возможности для пары s и в итоге должны выполняться следующие соотношения:

Случай 1. Сумма по всем темам, содержащим s , ее новых значений, должна равняться 1:

$$p_0 n_0 + \sum_s \hat{p}_s (1 - p_0 n_0) = 1,$$

что выполняется тождественно. Но поскольку p_0 имеет смысл вероятности, то

$$p_0 \leq \frac{1}{n_0},$$

Случай 2. Сумма по всем старым и новым темам равна 1:

$$p_1 n_{\text{noun}} + n_0 p_4 = 1,$$

где n_{noun} – количество имеющихся (старых) тем с существительным из пары s . Отсюда получаем

$$p_1 = \frac{1 - n_0 p_4}{n_{\text{noun}}}, \quad p_4 \leq \frac{1}{n_0}.$$

Случай 3. Сумма по всем старым и новым темам равна 1:

$$p_2 n_{\text{verb}} + n_0 p_5 = 1,$$

где n_{verb} – количество старых тем с глаголом из пары s . Отсюда получаем

$$p_2 = \frac{1 - n_0 p_5}{n_{\text{verb}}}, \quad p_5 \leq \frac{1}{n_0}.$$

Случай 4. Сумма по всем новым темам равна 1:

$$p_3 n_{\text{new}} + (n_0 - n_{\text{new}}) p_6 = 1,$$

где n_{new} – количество новых тем с существительным из пары s . Отсюда получаем

$$p_3 = \frac{1 - (n_0 - n_{\text{new}}) p_6}{n_{\text{new}}}, \quad p_6 \leq \frac{1}{n_0 - n_{\text{new}}}.$$

Так как все вероятности p_4, p_5, p_6 соответствуют включению пары в тему только по признаку присутствия в одном обращении, будем считать, что они равны:

$$p_4 = p_5 = p_6 \equiv q \leq \frac{1}{n_0}.$$

Вероятности p_1 и p_2 будем считать равными, т.к. они соответствуют включению в тему по существительному.

Вероятность включения в тему по существительному свяжем с вероятностью включения в тему по глаголу:

$$p_2 = k p_1.$$

Обозначим $p_1 = p_3 = p$, и теперь единичные суммы переписуются в виде:

$$p n_{\text{noun}} + n_0 q = 1,$$

$$k p n_{\text{verb}} + n_0 q = 1,$$

$$p n_{\text{new}} + (n_0 - n_{\text{new}}) q = 1.$$

Решим эту систему уравнений и определим p, q, k :

$$p = \frac{n_{\text{new}}}{n_{\text{new}} n_0 - n_{\text{noun}} n_0 + n_{\text{noun}} n_{\text{new}}},$$

$$q = \frac{n_{\text{new}} - n_{\text{noun}}}{n_{\text{new}} n_0 - n_{\text{noun}} n_0 + n_{\text{noun}} n_{\text{new}}},$$

$$k = \frac{n_{\text{noun}}}{n_{\text{verb}}},$$

если все n_{verb} и $n_{\text{new}} \cdot n_0 - n_{\text{noun}} \cdot n_0 + n_{\text{noun}} \cdot n_{\text{new}}$ отличны от 0.

Рассмотрим теперь случаи, когда одно или оба эти значения равны 0.

Если $n_{\text{verb}} = 0$, то в сообщении нет пар, соответствующих Случаю 3, а значит, имеется только два уравнения и неизвестные – только p и q . Решения для них уже найдены выше.

Если

$$n_{\text{new}} \cdot n_0 - n_{\text{noun}} \cdot n_0 + n_{\text{noun}} \cdot n_{\text{new}} = 0,$$

то из уравнений следует $n_{\text{new}} = n_{\text{noun}} = 0$, т.е. этот случай соответствует описанному Случаю 1, когда пара s уже содержится в T_m , а величина p_0 может принимать любое значение.

Так как в новых темах в этом случае точно нет существительного из s , то вероятность пары в них должна быть меньше или равна вероятности любой пары из данного обращения в старом словаре:

$$\hat{p}_s (1 - p_0 n_0) \leq \min_s \hat{p}_s \Big|_{\hat{p}_s \neq 0}.$$

В итоге, для нахождения нового словаря T_{m+1} для каждой пары из обращения требуется найти числа

$$n_{\text{noun}}, n_0, n_{\text{new}}, n_{\text{verb}}, p_0,$$

причем n_0 одинаково для всех пар s из данного обращения.

При построении нового словаря T_{m+1} следует использовать значения вероятностей

$$p_0 = \frac{1}{n_0} \left(1 - \frac{1}{\hat{p}_1} \min_s \hat{p}_s \Big|_{\hat{p}_s \neq 0} \right),$$

$$p_1 = p_3 = \frac{n_{\text{new}}}{n_{\text{new}} n_0 - n_{\text{noun}} n_0 + n_{\text{noun}} n_{\text{new}}},$$

$$p_2 = \frac{1}{n_{\text{verb}}} \cdot \frac{n_{\text{new}} n_s}{n_{\text{new}} n_0 - n_{\text{noun}} n_0 + n_{\text{noun}} n_{\text{new}}},$$

$$p_4 = p_5 = p_6 = \frac{n_{\text{new}} - n_{\text{noun}}}{n_{\text{new}} n_0 - n_{\text{noun}} n_0 + n_{\text{noun}} n_{\text{new}}}.$$

2.2. Алгоритм тематического моделирования обращений, представленных наборами пар «существительное – глагол»

Вход: словарь T_m тематической модели (может быть пустым), содержащий не более w различных пар «существительное – глагол» (w – размер «окна»); обращение, представленное в виде списка упорядоченных пар «существительное – глагол» (существительное на первом месте, токены лемматизированы).

Выход: словарь T_{m+1} , содержащий не более w различных пар, в котором все пары из обращения $m+1$ получили вероятности принадлежности к темам, выраженным существительными.

Процедура:

1. Устанавливаем $n_0 = n_{\text{new}} = 0$.
2. Для всех пар s в обращении:
3. Просматриваем словарь T_m и находим:
 - а) значения \hat{p}_s , которые s имеет в T_m , и соответствующие темы $t_{sp}^1, \dots, t_{sp}^n$;
 - б) темы $t_s^1, \dots, t_s^{n_{\text{noun}}}$, совпадающие с существительным из s , но не содержащие s целиком;
 - в) темы $t_{\text{verb}}^1, \dots, t_{\text{verb}}^{n_{\text{verb}}}$, не совпадающие с указанными в пп. а) и б), в которых имеется хотя бы один глагол из s ;
4. Если шаг 3 не дал ни одного совпадения, увеличиваем n_0 на 1; если, кроме того, среди уже созданных новых тем нет существительного из s (или пока нет новых тем), то увеличиваем n_{new} на 1 и создаем новую тему $t_{\text{new}}^{n_{\text{new}}}$;
5. По завершению просмотра словаря T_m создаем из него копированием словарь T_{m+1} и далее работаем с ним.
6. Находим

$$p_0 = \frac{1}{n_0} \left(1 - \frac{1}{\hat{p}} \min_l \hat{p}_l \Big|_{\hat{p}_l \neq 0} \right);$$

7. В темы $t_{sp}^1, \dots, t_{sp}^n$ вписываем с вероятностями p_0 пары s , найденные на шаге 3а).
8. В темы $t_s^1, \dots, t_s^{n_{\text{noun}}}$ вписываем с вероятностями $p = \frac{n_{\text{new}}}{n_{\text{new}} n_0 - n_{\text{noun}} n_0 + n_{\text{noun}} n_{\text{new}}}$ пары s , найденные на шаге 3б).

9. В темы $t_{\text{verb}}^1, \dots, t_{\text{verb}}^{n_{\text{verb}}}$ вписываем с вероятностями $p_2 = \frac{1}{n_{\text{verb}}} p$ пары s , найденные на шаге 3в).

10. В темы $t_{\text{new}}^1, \dots, t_{\text{new}}^{n_{\text{new}}}$ вписываем:
 - а) с вероятностями p пары, существительные которых совпадают с темой;
 - б) с вероятностями

$$q = \frac{n_{\text{new}} - n_{\text{noun}}}{n_{\text{new}} n_0 - n_{\text{noun}} n_0 + n_{\text{noun}} n_{\text{new}}}$$

все остальные пары обращения.

11. Если число пар W в словаре больше, чем w , то находим тему с наименьшим весом и удаляем из нее все или $(W - w)$ пар (что меньше); делаем это, пока все $(W - w)$ лишние пары не будут удалены из словаря.

12. Вычисляем веса оставшихся тем и проводим их сортировку.

Следуя этому алгоритму, будем получать в каждой итерации наиболее весомые темы, отсортированные по весу.

2.3. Результаты тематического моделирования

Для тестирования алгоритма был выбран упомянутый ранее датасет, из которого были удалены повторяющиеся сообщения и сообщения, не содержащие существительных вместе с глаголами. Рабочий датасет содержал около 2700 сообщений, направленных в адрес мэра Белгорода и городских департаментов за год. Данные анонимизированы. Размер окна (в парах, одновременно находящихся в словаре) принят равным $w = 300$.

На рисунке представлен график изменения веса топовых тем словаря на протяжении всего года.

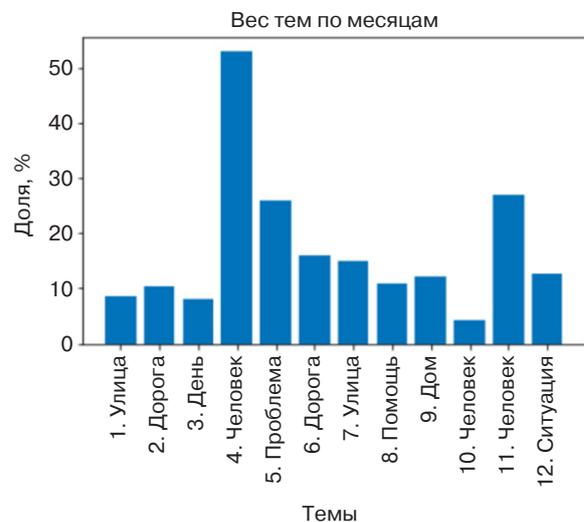


Рисунок. Темы, наиболее популярные в обращениях в мэрию г. Белгорода

В целом, выбранные моделью темы соответствуют наиболее важным вопросам, волнующим горожан в определенный период времени. Непосредственно по темам этого не видно, т.к. тема в контексте настоящей работы – это одно слово (существительное), по которому трудно оценить важность сообщений. Но тема является ключом к множеству сообщений и, если это множество таково, и изменяется так, что вес темы увеличивается, то сообщения в множестве заслуживают внимания. По сгруппированным вокруг тем-лидеров сообщениям администрация работала и далее в топ вышли другие темы. Это означает, что люди (администрация) и машина (предлагаемая система) верно отреагировали на настроения в городе, иначе нашлись бы темы, которые оставались в топе продолжительное время. По оценке специалистов администрации города, тематическое моделирование проведено верно.

Для количественной оценки качества тематического моделирования можно использовать метрики, например, VCubed-метрику¹⁷ [15], применение которой оправдано по построению алгоритма. Если обозначить через $p_{ts.mon}$ вероятность того, что сообщение s , относящееся к месяцу mon , принадлежит теме t $\left(\sum_t p_{ts.mon} = 1 \right)$, то VC-точность (VC precision, BCP) и VC-полнота (VC recall, BCR) для темы t в месяце mon будут определяться, соответственно, формулами:

$$BCP(t, mon) = \frac{\sum_s p_{ts.mon}}{\sum_{s,k} p_{tsk}}$$

$$BCR(t, mon) = \frac{\sum_s p_{ts.mon}}{\sum_{r,k} p_{rsk}}$$

Для датасета из эксперимента первый показатель топовых тем всегда превышал 55%, а второй варьировался от 27% до 83% (соответственно весу тем, показанному на рисунке). С учетом того, что число тем в месяце никогда не было меньше 70, качество кластеризации можно признать высоким и по метрике: случайный выбор приведет к показателю около 1.5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложены метод и алгоритм тематического моделирования для коротких сообщений. Кластеризация коротких сообщений является сложной задачей, поскольку такие сообщения очень трудно сопоставить какому-либо контексту, т.е., большие корпуса текста, на которых можно обучить модель, не дают, как правило, удовлетворительных описаний тем.

Работа основана на предложенной ранее методике выделения контура смысла сообщения в текстах на русском языке на основе пар «существительное – глагол».

По предложенной методике построена тематическая модель и проведено моделирование на реальных данных. Построенная кластеризация показала относительно высокое качество по метрике VCubed. В то же время результат виден и при качественной оценке: если тема вычисляется как топовая в конкретном периоде, то вопросы, поднятые в ней, заслуживают первоочередной оценки и принятия мер. На примере датасета, используемого в эксперименте, такая корреляция (между предлагаемым набором сообщения для первоочередного реагирования и выбранными людьми сообщениями) была больше 70%. Однако даже без количественной оценки сотрудники организации – владельца датасета высказали мнение о готовности использовать программное обеспечение, построенное на предлагаемом алгоритме, как систему поддержки принятия решений (точнее, советующую систему для первоочередного реагирования на сообщения). По их мнению, это намного сократит время обработки сообщений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was realized in the framework of the Priority 2030 Program using the equipment of High Technology Center at the V.G. Shukhov Belgorod State Technological University.

¹⁷ Семейство метрик VCubed реализовано в библиотеке <https://pypi.org/project/bcubed-metrics/>. Дата обращения 02.12.2024. [The VCubed family of metrics is implemented in the library <https://pypi.org/project/bcubed-metrics/>. Accessed December 02, 2024.]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брусенцев А.Г., Зуева Е.С. Тематические модели и инструменты обработки естественного языка в применении к задачам муниципальных структур. В сб.: *Актуальные теоретические и прикладные вопросы управления социально-экономическими системами: материалы II Международной научно-практической конференции*. М.: Институт развития дополнительного профессионального образования; 2020. Т. 2. С. 262–269. <https://elibrary.ru/fkgyxn>
2. Зуева Е.С. Вероятностная классификация входящих обращений на основе алгоритма управляемых рекуррентных нейронов. В сб.: *Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова; 2021. С. 3564–3575. <https://www.elibrary.ru/nhlzpv>
3. Поляков В.М., Мозаидзе Е.С. Алгоритм коллаборативной фильтрации как возможный инструмент выявления опасного твита (короткого сообщения) в социальных сетях представительства органа государственной власти Белгородской области. В сб.: *Современные вопросы устойчивого развития общества в эпоху трансформационных процессов: материалы IV международной научно-практической конференции*. М.: ООО «ИРОК»; 2022. С. 136–148. <https://doi.org/10.34755/IROK.2022.14.90.027>, <https://www.elibrary.ru/mzrsgm>
4. Papadimitriou C.H., Tamaki H., Raghavan P., Vempala S. Latent semantic indexing: A probabilistic analysis. In: *Proceedings of the Seventeenth ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems*. ACM; 1998. P. 159–168. <https://doi.org/10.1145/275487.275505>
5. Hofmann T. Probabilistic latent semantic indexing. In: *Proceedings of the 22nd annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*. ACM; 1999. P. 50–57. <https://doi.org/10.1145/312624.312649>
6. Blei D., McAuliffe J. Supervised topic models. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 20 (NIPS 2007)*. 2008. P. 121–128.
7. Blei D.M., Lafferty J.D. Dynamic topic models. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning (ICML '06)*. ACM; 2006. P. 113–120. <https://doi.org/10.1145/1143844.1143859>
8. Blei D.M. Probabilistic topic models. *Communications of the ACM*. 2012;55(4):77–84. <https://doi.org/10.1145/2133806.2133826>
9. Воронцов К.В. Аддитивная регуляризация тематических моделей коллекций текстовых документов. *Доклады академии наук*. 2014;456(3):268–271. <https://doi.org/10.7868/S0869565214090096>
10. Воронцов К.В., Потапенко А.А. Модификации EM-алгоритма для вероятностного тематического моделирования. *Машинное обучение и анализ данных*. 2013;1(6):657–686.
11. Нокель М.А., Лукашевич Н.В. Тематические модели: добавление биграмм и учет сходства между униграммами и биграммami. *Вычислительные методы и программирование*. 2015;16(2):215–234. <https://doi.org/10.26089/NumMet.v16r222>
12. Коршунов А., Гомзин А. Тематическое моделирование текстов на естественном языке. *Труды Института системного программирования РАН (Труды ИСП РАН)*. 2012;23:215–242. <https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2012-23-13>
13. Nakshatri N., Liu S., Chen S., Roth D., Goldwasser D., Hopkins D. Using LLM for Improving Key Event Discovery: Temporal-Guided News Stream Clustering with Event Summaries. *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP*. 2023:4162–4173. <https://doi.org/10.18653/v1/2023.findings-emnlp.274>
14. Rijcken E., Scheepers F., Zervanou K., Spruit M., Mosteiro P., Kaymak U. Towards Interpreting Topic Models with ChatGPT. 2023. *Paper presented at The 20th World Congress of the International Fuzzy Systems Association*, Daegu, Republic of Korea. 2023. V. 5. URL: https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/300364784/IFSA_InterpretingTopicModelsWithChatGPT.pdf
15. Amigo E., Gonzalo J., Artiles J., Verdejo F. A comparison of extrinsic clustering evaluation metrics based on formal constraints. *Information Retrieval*. 2009;12(4):461486.

REFERENCES

1. Brusentsev A.G., Zueva E.S. Thematic models and tools for processing the natural language in application to the problems of municipal structures. In: *Actual Theoretical and Applied Issues of the Socio-Economic Systems Management: Proc. Second International Scientific and Practical Conference*. Moscow; 2020. V. 2. P. 262–269 (in Russ.). <https://elibrary.ru/fkgyxn>
2. Zueva E.S. Probabilistic classification of incoming calls based on a controlled recurrent neurons algorithm. In: *Proc. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of V.G. Shukhov BSTU*. Belgorod: V.G. Shukhov BSTU; 2021. P. 3564–3575 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/nhlzpv>
3. Polyakov V.M., Mozaidze E.S. Collaborative filtering algorithm as a possible tool for detecting a dangerous tweet (short message) in social networks of a representative office of the government of the Belgorod region. In: *Modern Issues of Sustainable Development of Society in the Era of Transformation Processes: Collection of Materials of the 4th International Scientific and Practical conference*. Moscow; 2022. P. 136–148 (in Russ.). <https://doi.org/10.34755/IROK.2022.14.90.027>, <https://www.elibrary.ru/mzrsgm>
4. Papadimitriou C.H., Tamaki H., Raghavan P., Vempala S. Latent semantic indexing: A probabilistic analysis. In: *Proceedings of the Seventeenth ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems*. ACM; 1998. P. 159–168. <https://doi.org/10.1145/275487.275505>
5. Hofmann T. Probabilistic latent semantic indexing. In: *Proceedings of the 22nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. ACM; 1999. P. 50–57. <https://doi.org/10.1145/312624.312649>

6. Blei D., McAuliffe J. Supervised topic models. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 20 (NIPS 2007)*. 2008. P. 121–128.
7. Blei D.M., Lafferty J.D. Dynamic topic models. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine learning (ICML '06)*. ACM; 2006. P. 113–120. <https://doi.org/10.1145/1143844.1143859>
8. Blei D.M. Probabilistic topic models. *Communications of the ACM*. 2012;55(4):77–84. <https://doi.org/10.1145/2133806.2133826>
9. Vorontsov K.V. Additive regularization for topic models of text collections. *Dokl. Math.* 2014;89(3):301–304. <https://doi.org/10.1134/S1064562414020185>
[Original Russian Text: Additive regularization for topic models of text collections. *Doklady Akademii Nauk*. 2014;456(3): 268–271 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565214090096>]
10. Vorontsov K.V., Potapenko A.A. EM-like algorithms for probabilistic topic modeling. *Mashinnoe obuchenie i analiz dannykh = Machine Learning and Data Analysis*. 20131(6):657–686 (in Russ).
11. Nokel M.A., Lukashevich N.V. Topic Models: Adding Bigrams and Taking Account of the Similarity between Unigrams and Bigrams. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye = Numerical Methods and Programming*. 2015;16(2):215–234 (in Russ.). <https://doi.org/10.26089/NumMet.v16r222>
12. Korshunov A., Gomzin A. Topic modeling in natural language texts. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN (Trudy ISP RAN) = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*. 2012;23: 215–240 (in Russ.). <https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2012-23-13>
13. Nakshatri N., Liu S., Chen S., Roth D., Goldwasser D., Hopkins D. Using LLM for Improving Key Event Discovery: Temporal-Guided News Stream Clustering with Event Summaries. *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP*. 2023:4162–4173. <https://doi.org/10.18653/v1/2023.findings-emnlp.274>
14. Rijcken E., Scheepers F., Zervanou K., Spruit M., Mosteiro P., Kaymak U. Towards Interpreting Topic Models with ChatGPT. 2023. Paper presented at *The 20th World Congress of the International Fuzzy Systems Association*, Daegu, Republic of Korea. 2023. V. 5. Available from URL: https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/300364784/IFSA_InterpretingTopicModelsWithChatGPT.pdf
15. Amigo E., Gonzalo J., Artiles J., Verdejo F. A comparison of extrinsic clustering evaluation metrics based on formal constraints. *Information Retrieval*. 2009;12(4):461486.

Об авторе

Мозайдзе Елена Сергеевна, аспирант, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (308012, Россия, Белгород, ул. Костюкова, д. 46). E-mail: mozaidze95@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7919-7963>

About the author

Elena S. Mozaidze, Postgraduate Student, Department of Computer Software and Automated Systems, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostyukova ul., Belgorod, 308012 Russia). E-mail: mozaidze95@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7919-7963>

УДК 681.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-49-58>

EDN JQICRJ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Технико-экономический анализ серверов как вычислительных модулей вычислительных систем класса WSC

Г.В. Петушков[@],
А.С. Сигов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Целью работы является технико-экономический анализ серверов как вычислительных модулей вычислительных систем (ВС) класса WSC (warehouse scale computer).

Методы. Основные результаты работы получены с использованием методов математического анализа и моделирования.

Результаты. Проведен технико-экономический анализ вычислительных модулей или серверов на базе микропроцессоров класса Xeon (Intel, США) и им подобных. Приведен обзор подклассов микропроцессоров с указанием основных областей их использования, а также вариантов организации серверов и их основных составляющих. Надежность – комплексное свойство, которое, в зависимости от назначения объекта и условий его применения, может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств. Для обеспечения максимальной надежности сервера используют как резервирующие элементы – массивы дисков и блоков питания, так и резервные серверы, и специальные решения: использование горячей замены и подключения, методы повышения надежности оперативной памяти Error Checking and Correction для коррекции ошибок модулей оперативной памяти, контроль температурных режимов отсеков сервера.

Выводы. Проведенный обзор вариантов организации серверов и их основных составляющих позволяет сделать вывод о достаточно высокой надежности их функционирования. От серверов, объединенных в ВС класса WSC, как от системы, требуется непрерывность функционирования в режиме 24/7 в течение длительного времени. Это требует разработки методик оценки надежности таких высоконадежных систем, включающих резервные элементы, по отношению к отказам аппаратуры и программного обеспечения, а также методик прогнозирования отказов и мер борьбы с их последствиями.

Ключевые слова: надежность, резервирующие элементы, подклассы микропроцессоров, error checking and correction, коррекция ошибок, массив дисков, класс WSC

• Поступила: 18.10.2024 • Доработана: 22.11.2024 • Принята к опубликованию: 09.12.2024

Для цитирования: Петушков Г.В., Сигов А.С. Технико-экономический анализ серверов как вычислительных модулей вычислительных систем класса WSC. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):49–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-49-58>, <https://www.elibrary.ru/JQICRJ>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Technical and economic analysis of servers as computing system modules of the warehouse scale computer class

Grigory V. Petushkov [®],
Alexander S. Sigov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[®] Corresponding author, e-mail: petushkov@mirea.ru

Abstract

Objectives. The work set out to technically and economically analyze servers as computing modules of computing systems of the warehouse scale computer (WSC) class.

Methods. The research was carried out using the methods of mathematical analysis and modeling.

Results. The article provides a technical and economic analysis of computing modules or servers. Servers are created on the basis of Xeon (Intel) class microprocessors and the like. An overview of the microprocessor subclasses is given along with an indication of server organization options, as well as their main components and primary areas of use. Server reliability is a complex property that may include durability, maintainability and persistence, or certain combinations of these properties depending on the purpose of the object and the conditions of its use. To ensure maximum reliability, backup elements, including arrays of disks and power supplies, as well as backup servers, are used alongside special solutions, including the use of hot swapping and connection, checking and correction of random access memory errors, and temperature control of server compartments.

Conclusions. The review of options for organizing servers and their main components allows permits the conclusion that their operation is sufficiently reliable. However, servers integrated into the WSC class have special requirements, namely, continuity of operation in 24/7 mode for long periods of time. This requires the development of methods for assessing the reliability of such highly reliable systems, including backup elements, in relation to hardware and software failures, as well as methods for predicting failures and measures to combat their consequences.

Keywords: reliability, backup elements, MP subclasses, error checking and correction, error correction, disk array, WSC class

• Submitted: 18.10.2024 • Revised: 22.11.2024 • Accepted: 09.12.2024

For citation: Petushkov G.V., Sigov A.S. Technical and economic analysis of servers as computing system modules of the warehouse scale computer class. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):49–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-49-58>, <https://www.elibrary.ru/JQICRJ>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Сервер обладает множеством характеристик, таких как надежность, производительность, фактор, энергопотребление и др. Эти характеристики часто складываются из набора свойств отдельных узлов, из которых состоит сервер [1].

Производительность, наряду с надежностью, является одной из ключевых характеристик сервера. Она определяется, в основном, объемом и скоростью вычислений и зависит от типа выполняемых задач. С увеличением объема вычислений должна расти и производительность компонентов, особенно процессора.

Основные преимущества блейд-серверов включают значительное снижение энергопотребления, повышение энергоэффективности и гибкость инфраструктуры благодаря модульной конструкции [2].

На энергопотребление сервера в первую очередь влияют его доступные ресурсы, такие как количество процессоров (и количество используемых ядер), их тактовая частота, объем оперативной памяти, производительность и емкость подсистемы хранения данных, а также производительность сетевых интерфейсов.

В зависимости от задачи цель подбора оборудования может заключаться как в увеличении доступных ресурсов, так и в их уменьшении. До определенного предела ресурсы наращиваются путем увеличения емкости и производительности памяти, а также числа процессоров. Однако дальнейшее наращивание таким способом становится неэффективным и экономически невыгодным. В таких случаях ресурсы увеличивают другими методами, например, распараллеливанием задач между несколькими серверами и оптимизацией приложения. Уменьшение ресурсов сервера обычно направлено на сокращение его размеров и потребляемой энергии [3].

ПРОЦЕССОР

Ключевые характеристики процессора [4] включают производительность, потребляемую мощность и энергетическую эффективность (среднее количество энергии, потребляемое на одну выполненную инструкцию).

Производительность процессора определяется как скорость выполнения инструкций программного

кода, т.е. количество инструкций, обработанных за единицу времени (instructions per second, IPS). Это можно выразить математически следующим образом:

$$\text{Performance} = \frac{\text{Количество инструкций}}{\text{Время выполнения}} = \text{IPS}. \quad (1)$$

Вместо количества инструкций за единицу времени более удобно учитывать количество инструкций программного кода, выполняемых за один такт работы процессора (instructions per cycle, IPC).

$$\begin{aligned} \text{Performance} &= \frac{\text{Количество инструкций}}{\text{Количество тактов}} \times \\ &\times \frac{\text{Количество тактов}}{\text{Время выполнения}} = \text{IPC}. \end{aligned} \quad (2)$$

Производительность процессора напрямую зависит как от тактовой частоты F , так и от количества инструкций, выполняемых за один такт IPC.

Из этого следует, что существует два основных подхода к повышению производительности процессора [5]: первый – увеличение тактовой частоты, второй – увеличение числа инструкций, выполняемых за один такт. На практике обычно применяются оба подхода одновременно, т.к. параметры тактовой частоты и количество инструкций, выполняемых за такт, взаимосвязаны.

Зависимость потребляемой процессором мощности от его тактовой частоты выглядит следующим образом:

$$\text{Power} = CU^2F, \quad (3)$$

где C – динамическая емкость процессора, U – напряжение питания процессора, F – рабочая частота процессора.

Иными словами, мощность, потребляемая процессором, пропорциональна тактовой частоте, квадрату напряжения питания процессора и его динамической емкости. Тактовая частота напрямую зависит от напряжения питания, поэтому потребляемая мощность изменяется с частотой процессора нелинейно. Следовательно, производительность и потребляемая мощность процессора также взаимосвязаны нелинейным образом.

Увеличение тактовой частоты дает лишь незначительный прирост производительности и при этом сопровождается значительно большим увеличением потребляемой мощности процессора [6].

В настоящее время акцент в повышении производительности процессоров сместился от увеличения тактовой частоты к достижению высокого уровня производительности при минимальном потреблении энергии. Ключевым показателем [7] в этом контексте является энергетическая эффективность процессора (energy per instruction, EPI), которая измеряется как среднее количество энергии, потребляемое на одну выполненную инструкцию:

$$EPI = \frac{\text{Энергия (Дж)}}{\text{Количество инструкций}}. \quad (4)$$

Производительность процессора в расчете на 1 ватт потребляемой мощности будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Performance}}{\text{Power}} &= \frac{\left(\frac{\text{Количество инструкций}}{\text{Время}} \right)}{\left(\frac{\text{Энергия}}{\text{Время}} \right)} = \\ &= \frac{\text{Количество инструкций}}{\text{Энергия}} = \frac{1}{EPI}. \end{aligned} \quad (5)$$

Соответственно:

$$EPI = \frac{\text{Power}}{\text{Performance}}. \quad (6)$$

Один из подходов к созданию энергоэффективного процессора заключается в использовании многоядерной архитектуры [8]. Это позволяет повысить производительность за счет увеличения числа инструкций, исполняемых за такт, без увеличения, а иногда и с уменьшением тактовой частоты. Теоретически, при увеличении числа ядер с 1 до 2 можно сохранить ту же производительность, снизив тактовую частоту каждого ядра в 2 раза.

Прирост производительности в данном случае можно оценивать как сокращение времени выполнения программы при использовании многоядерного процессора tn по сравнению с временем ее выполнения на одноядерном процессоре $t1$. Таким образом, прирост производительности будет равен [9]:

$$\frac{t1}{tn} = 1 - p \left(1 - \frac{1}{n} \right), \quad (7)$$

где p – доля инструкций программного кода, способных выполняться параллельно; n – количество процессоров.

Графическая зависимость прироста производительности от числа ядер процессора показана на рис. 1.

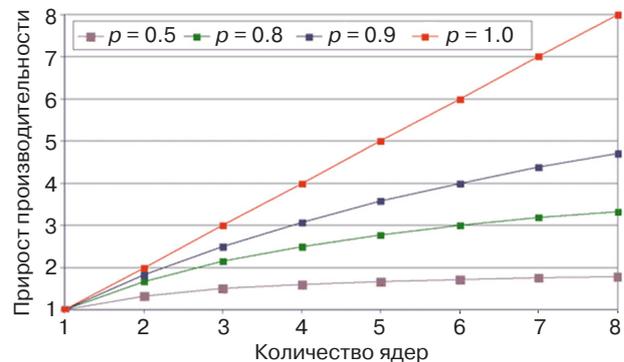


Рис. 1. Зависимость прироста производительности от числа ядер процессора

Многоядерная архитектура значительно повышает производительность, особенно при одновременной работе нескольких приложений. В идеальных условиях каждое приложение может выполняться на отдельном ядре процессора.

Микропроцессоры IntelXeon

Микропроцессоры класса IntelXeon (Intel, США) [10] строятся на тех же микроархитектурах, что и процессоры (x86) для настольных систем, однако с добавлением специфических серверных черт.

Разработка процессоров для серверов отличается значительной сложностью по сравнению с настольными системами, поскольку серверные процессоры требуют внедрения множества специфических особенностей. Это делает процесс их разработки и внедрения более длительным и сложным. Несмотря на это, разница в техпроцессах между различными семействами процессоров, таких как Xeon, Opteron (AMD, США) и Baikal-T1 (Baikal Electronics, Россия), постепенно уменьшается. Это связано с увеличением сложности и времени разработки новых архитектур, использующих 10-нм технологический процесс.

Технология Crystalwell позволяет процессору преодолеть ограничения низкой пропускной способности системной памяти и продемонстрировать улучшенные результаты в обработке HD-видео и математических операциях. С использованием процессоров Broadwell возможно одновременное выполнение 4368 HD-видеопотоков, что на 40% больше по сравнению с 3120 потоками на процессорах Haswell.

Процессоры Intel Xeon E3 v6 представлены в 8 моделях, и ни одна из них не обладает пониженным энергопотреблением. В этой линейке также

отказались от использования eDRAM¹. Процессоры с индексом 1xx5 v6, как и ранее, оснащены собственными графическими ядрами.

Основные изменения включают переход на архитектуру Kabu Lake при сохранении технологического процесса 14-нм. Кроме того, увеличена максимальная пропускная способность памяти до 37.5 ГБ/с, а также повышены частоты до DDR4-2400 и DDR3L-1866.

Прирост производительности при переходе от процессоров E3 к E5 и использовании двух процессоров E5 отображен на рис. 2.

По тестам Intel наблюдается следующий результат: производительность увеличивается в 1.5 раза при переходе от процессоров E3 к E5 и еще в 2 раза при удвоении количества процессоров. Переход на 4-процессорную систему обеспечивает аналогичный линейный прирост производительности. Аналогично улучшается производительность и в новых поколениях процессоров, например, при переходе с E3 v5 или v6 на E5 v4.

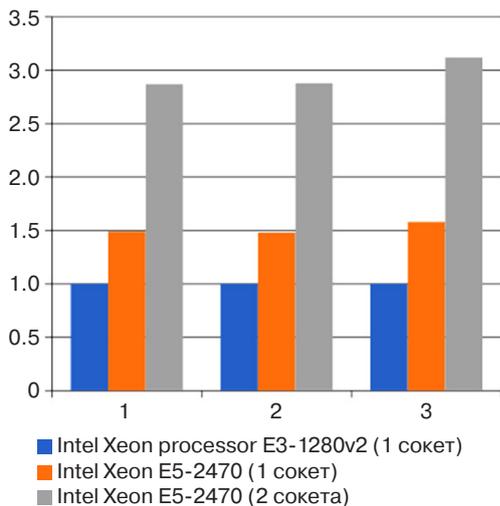


Рис. 2. Изменение производительности при переходе от E3 к E5: 1 – SPECint_ratebase 2006, 2 – SPECfp*ratebase 2006, 3 – SPECjbb*2005

В будущем процессоры Broadwell-EX будут заменены на Skylake Purley. Эти новые процессоры будут оснащены 6-канальными контроллерами оперативной памяти DDR4 (вместо 4-канальных у нынешнего поколения), набором инструкций AVX-512, шиной Omni-Path, поддержкой графики Cannonlake и встроенными FPGA². Встроенные FPGA позволяют оптимизировать конфигурацию процессора под конкретные задачи, что не предусмотрено в архитектуре Skylake.

¹ Embedded dynamic random access memory – встраиваемая динамическая память с произвольным доступом.

² Field-programmable gate array – программируемые пользователем вентильные матрицы.

Процессоры Intel Xeon D

Процессоры Intel Xeon D [11] являются преемниками линейки Atom, но предназначены для легких серверных решений. Эти процессоры представляют собой системы на кристалле (SoC³) и включают вычислительные ядра x86, сетевую карту 10G, порты ввода-вывода (включая PCIe⁴), контроллер DDR4 и интерфейсы SATA. Они изготавливаются с использованием 14-нм технологического процесса.

Intel Xeon D-15xx предлагают новые возможности оптимизации разнообразных рабочих нагрузок и инфраструктур.

Сейчас их основная область применения – это сетевые системы, облачные хранилища и корпоративные системы хранения данных.

Серверные процессоры AMD Opteron

Серверные процессоры от AMD представлены пятью сериями: Opteron 3000, 4000 и 6000, A-серией на основе ARM-архитектуры, а также гибридными процессорами X-серии [12]. Эти процессоры предназначены для веб-хостинга и характеризуются доступной ценой. Они поддерживают память DDR3-1866 МГц.

В целом, линейка процессоров Opteron обеспечивает хорошую производительность, большое количество ядер и конкурентоспособную цену. Процессоры Opteron не используют аналоги технологии Hyperthreading; их производительность увеличивается за счет добавления большего числа физических ядер.

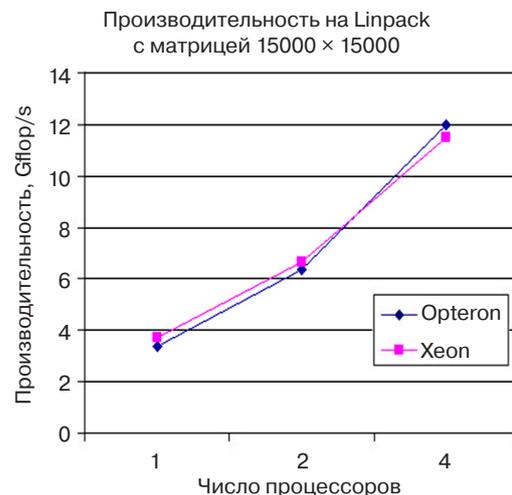


Рис. 3. Сравнение производительности процессоров Intel Xeon и AMD Opteron

³ System-on-a-chip.

⁴ Peripheral component interconnect express – компьютерная шина, обеспечивающая соединение «точка-точка» при помощи высокопроизводительного протокола последовательной передачи данных. [Peripheral component interconnect express is a computer bus that provides point-to-point connectivity using a high-performance serial communications protocol.]

Созданный на основе процессора X2150 гибридный процессор X2170 представляет собой полностью интегрированный блок с архитектурой x86, который включает центральный процессор, графический процессор и контроллер ввода/вывода. Он отличается низким энергопотреблением, что позволяет снизить общую стоимость владения центрами обработки данных и адаптироваться к требованиям высокопроизводительных серверных платформ.

Основные задачи, для которых предназначены эти серверные процессоры, включают организацию сетей доставки и дистрибуции, предварительную обработку видео, консольные десктоп-клиенты, рендеринг, перекодировку и потоковую передачу видео.

Объединение технологий центрального и графического процессоров в сверхплотном форм-факторе может привести к большому выигрышу в расчете производительности на 1 ватт по сравнению с традиционными решениями.

Процессор Baikal-T1

Процессор Baikal-T1 [13] основан на 2 вычислительных ядрах с тактовой частотой 1.2 ГГц, выполненных по 28-нм технологическому процессу и относящихся к семейству MIPS Warrior P5600 r5 компании Imagination Technologies (Великобритания). Он использует архитектуру MIPS32 с поддержкой парадигмы внеочередного исполнения команд и возможностью объединения до 6 ядер в единый кластер. Ядра P5600 r5 поддерживают технологию аппаратной зональной защиты данных OmniShield и 128-разрядные SIMD-команды⁵ для высокоскоростной обработки параллельных вычислений, особенно в мультимедийных приложениях.

Процессор оснащен 1 Мб высокопроизводительной когерентной кэш-памяти и встроенным контроллером оперативной памяти с поддержкой DDR3-1600. Он включает в себя интегрированные интерфейсы: 1 × 10 Гбит Ethernet, 2 × 1 Гбит Ethernet, PCIe Gen.3 x4, SATA 3.0 и USB 2.0. Энергопотребление процессора не превышает 5 Вт, что позволяет создавать бесшумные системы, не требующие активного охлаждения.

Основные ожидаемые области применения данного процессора – промышленная автоматика, встроенные системы, коммуникации.

ОПЕРАТИВНАЯ ПАМЯТЬ

Серверная память отличается от настольной тем, что она обычно включает модули с контролем

⁵ Single instruction, multiple data – принцип компьютерных вычислений, позволяющий обеспечить параллелизм на уровне данных. [Single instruction, multiple data – a principle of computer computing that enables parallelism at the data level.]

четности и коррекцией ошибок (error correction code, ECC). Такая память часто обладает дополнительной функциональностью, направленной на обеспечение большей стабильности, например, использование регистровой буферизированной памяти. Серверная память создается по стандартам, отличным от тех, что применяются в настольных системах.

Ключевой характеристикой серверной оперативной памяти является отказоустойчивость. Многие серверы предназначены для работы критически важных приложений, которые предъявляют повышенные требования к памяти. Уровень отказоустойчивости обеспечивается как за счет усовершенствования процесса производства микросхем, так и за счет использования технологий защиты памяти от ошибок, таких как ECC [14].

Существует два основных способа защиты от ошибок памяти:

1. Тестирование модулей – регулярная проверка состояния памяти для выявления и устранения проблем.
2. Использование технологий обнаружения и исправления ошибок – внедрение технологий, которые автоматически обнаруживают и исправляют ошибки памяти.

Технология ECC значительно снижает вероятность ошибок памяти. Она обеспечивает обнаружение и исправление однобитовых ошибок и обнаружение многобитовых ошибок. Это важная функция для серверной оперативной памяти, где надежность и устойчивость к ошибкам критически важны. Механизм работы продемонстрирован на рис. 4.

Ошибки памяти могут также приводить к значительным простоям в приложениях серверов баз данных. В случае возникновения ошибки восстановление базы данных может занять несколько часов, т.к. серверу потребуется восстановить данные на основании записей журнала транзакций, которые еще не были занесены в базу данных.

Технология Advanced ECC предназначена для исправления многобитовых ошибок в одной микросхеме DRAM. Она обеспечивает возможность восстановления данных даже в случае отказа всей микросхемы, что значительно повышает надежность системы.

Четыре разряда от каждой микросхемы распределяются по четырем устройствам ECC (по одному разряду для каждого устройства ECC), поэтому при ошибке в одной микросхеме возможно исправление до четырех однобитовых ошибок (рис. 5).

Для борьбы с многобитовыми ошибками на отдельных микросхемах, включая сбой всех разрядов данных, используется механизм Chipkill. Этот механизм обеспечивает более высокую защиту

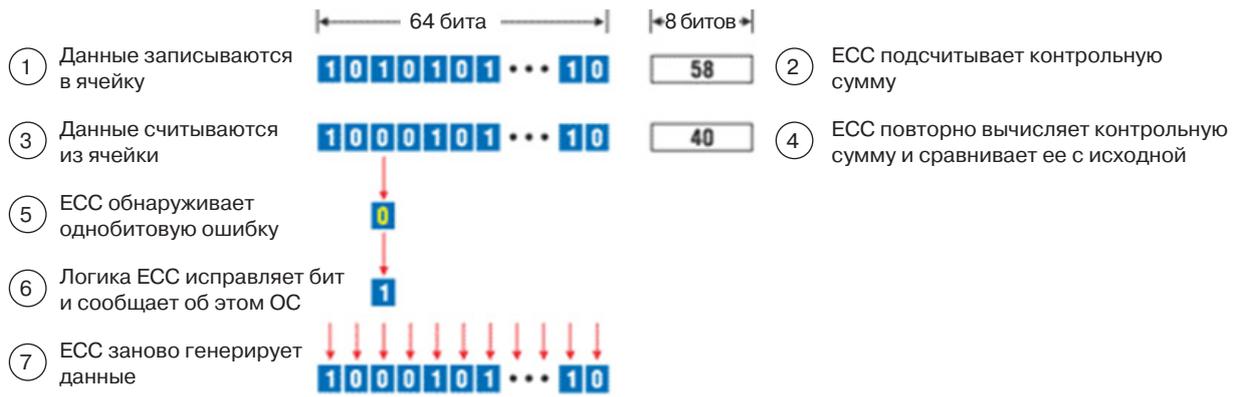


Рис. 4. Схема обнаружения и исправления однобитовой ошибки. ОС – операционная система

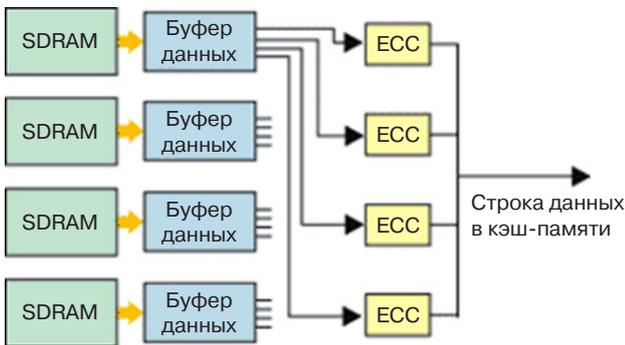


Рис. 5. Схема работа AdvancedECC

и надежность по сравнению с традиционными методами.

На данный момент DDR4 DRAM является наиболее передовой и широко используемой технологией оперативной памяти. Однако DDR5 DRAM уже находится в стадии разработки. Ожидается, что DDR5 обеспечит вдвое большую емкость модулей по сравнению с DDR4, а также увеличит пропускную способность. Память DDR5 будет производиться по 10-нм технологическому процессу и первоначально будет иметь объем от 1 до 4 Гб.

ПОДСИСТЕМА ХРАНЕНИЯ

Важным аспектом является доступность накопителей: серверные накопители должны оставаться функциональными и активными в любое время, тогда как накопители настольных персональных компьютеров могут быть переведены в режим «ожидания», если доступ к ним не требуется [15].

Для обеспечения надежности и производительности часто применяются RAID-массивы⁶, которые объединяют несколько дисковых накопителей для повышения отказоустойчивости и производительности. Важными факторами, влияющими на выбор накопителей, являются интерфейс подключения, ем-

кость и структура накопителя. Также значительную роль играют предполагаемые данные, которые будут храниться, их важность и требования установленных приложений.

Жесткие диски (hard disk drive, HDD) являются классическим решением для хранения данных. Они предоставляют приемлемый уровень надежности, а их производительность зависит от таких факторов, как скорость вращения, интерфейс и размер кэша. Скорость вращения жестких дисков варьируется от 7200 до 15000 оборотов в минуту в зависимости от требований к производительности. Однако увеличение скорости вращения приводит к большему энергопотреблению и более высоким требованиям к системе охлаждения. Дополнительной проблемой могут стать вибрации, возникающие из-за вращения дисков с различной скоростью, что может нарушить их работу, если диски находятся в разных циклах записи. Для предотвращения подобных проблем рекомендуется использовать диски с одинаковой скоростью вращения в рамках одного сервера. Также стоит отметить, что срок службы жестких дисков ограничен их механическим износом.

Твердотельные накопители (solid state drive, SSD) не имеют подвижных частей, что исключает механический износ и вибрации. Они используют флеш-память для хранения данных, что позволяет им достигать производительности ввода/вывода, которая может в сотни раз превосходить производительность жестких дисков. Кроме того, SSD потребляют примерно пятую часть энергии по сравнению с HDD, т.к. им не требуется питание для электродвигателя.

При выборе накопителей важно учитывать, что твердотельные накопители имеют ограниченный срок хранения данных в выключенном состоянии. В случае использования таких накопителей для резервного хранения данных информация будет доступна не более 10 лет. Этот срок может быть сокращен из-за интенсивного использования накопителя и воздействия окружающей температуры.

⁶ Redundant array of independent disks.

Перспективным направлением в развитии систем хранения данных является переход на энерго-независимую память типа NAND⁷. Такая память устраняет основные причины задержек в канале обмена данными между системой и полупроводниковым накопителем. Использование шины PCIe непосредственно, без дополнительных адаптеров (SATA, SAS и др.), позволяет уменьшить латентность на уровне контроллера. Выбор NVMe⁸ помогает устранить задержки на уровне программного обеспечения (как в микропрограмме контроллера, так и в системных драйверах) и значительно увеличивает уровень параллелизма при обмене потоками данных по шине.

Интерфейс NVMe является ключевым преимуществом для серверных приложений, особенно при обработке большого количества запросов одновременно. Переход к NVMe позволяет значительно повысить эффективность работы с дисковыми массивами за счет масштабирования числа очередей и команд.

Разработка новых технологий хранения данных, таких как PCM⁹ и другие перспективные решения, обещает продолжить эволюцию систем хранения и может в будущем привести к значительным улучшениям в скорости доступа и общей производительности.

По оценкам компании Crossbar, модули RRAM¹⁰ обеспечат скорость записи, в 20 раз превосходящую скорость флеш-памяти NAND, достигая 140 Мб/с по сравнению с 7 Мб/с у NAND. Скорость чтения для RRAM составит около 17 Мб/с. Дополнительным преимуществом RRAM является долговечность хранения данных, которая может составлять до 20 лет,

в то время как у NAND этот срок составляет всего 1–3 года.

В качестве альтернативы флеш-памяти NAND также рассматривается магниторезистивная память (magnetoresistive random-access memory, MRAM). Она выделяется высокой скоростью доступа к данным и надежностью при неблагоприятных внешних условиях. Магниторезистивная память способна функционировать при очень высоких температурах, что делает ее особенно подходящей для использования в экстремальных условиях, таких как военные и космические приложения.

ВЫВОДЫ

Проведенный обзор вариантов организации серверов и их основных составляющих позволяет сделать вывод о достаточно высокой надежности их функционирования. Однако от серверов, объединенных в ВС класса WSC (warehouse scale computer), как от системы, требуется нечто большее, а именно, непрерывность функционирования в режиме 24/7 в течение длительного времени. Это, в свою очередь, требует разработки методик оценки надежности таких высоконадежных систем, включающих резервные элементы, по отношению к отказам аппаратуры и программного обеспечения, а также методик прогнозирования отказов и мер борьбы с их последствиями.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хенесси Д.Л., Паттерсон Д.А. *Компьютерная архитектура. Количественный подход*. 5-е изд. М.: Техносфера; 2016. 936 с.
2. Сугак Е.В. *Прикладная теория надежности. Практикум*. М.: Лань; 2023. 312 с. ISBN 978-5-507-47014-3
3. Тенгайкин Е.И. *Организация сетевого администрирования. Сетевые операционные системы, серверы, службы и протоколы. Практические работы*. СПб.: Лань; 2022. 100 с. ISBN 978-5-8114-9783-6
4. Коваленко С.М., Платонова О.В. Анализ задачи эффективной эксплуатации комплексов систем автоматизации и расчеты надежности на основе непрерывных моделей. *Известия вузов. Машиностроение*. 2014;8(653):75–89. <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-8-75-79>
5. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. *Параллельные вычисления*. СПб.: БХВ-Петербург; 2002. 608 с.
6. Орлов С.А., Цилькер Б.Я. *Организация ЭВМ и систем*. СПб.: Питер; 2016. 688 с.

⁷ Not AND – универсальный двухвходовый логический элемент, штрих Шеффера. [Not AND is a universal two-input logic element, Schaeffer stroke.]

⁸ NVM Express – от англ. non-volatile memory host controller interface specification – интерфейс доступа к твердотельным накопителям, подключенным по шине PCI Express. [NVM Express is non-volatile memory host controller interface specification—access interface to solid state drives connected via PCI Express bus.]

⁹ Pulse code modulation – импульсно-кодовая модуляция.

¹⁰ Resistive random-access memory – резистивная память с произвольным доступом.

7. Половко А.М., Гуров С.В. *Основы теории надежности*. СПб.: БХВ-Петербург; 2006. 702 с. ISBN 5-94157-541-6
8. Черкесов Г.Н. *Надежность аппаратно-программных комплексов*. СПб.: Питер; 2005. 479 с. ISBN 5-469-00102-4
9. Сапожников В.В., Сапожников В.В., Ефанов Д.В. *Основы теории надежности и технической диагностики*. СПб.: Лань; 2019. 588 с. ISBN 978-5-8114-3453-4
10. Podgorny Y.V., Antonovich A.N., Petrushin A.A., Sigov A.S., Vorotilov K.A. Effect of metal electrodes on the steady-state leakage current in PZT thin film capacitors. *J. Electroceram.* 2022;49:15–21. <https://doi.org/10.1007/s10832-022-00288-5>
11. Абдуллаев Д.А., Милованов Р.А., Волков Р.Л., Боргардт Н.И., Ланцев А.Н., Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрическая память: современное производство и исследования. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):44–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>
12. Конюхова О.В., Кравцова Э.А., Лукьянов П.В. *Техническое и программное обеспечение вычислительных машин и систем*. М., Вологда: Инфра-Инженерия; 2023. 200 с. ISBN 978-5-9729-1186-8
13. Журавлев А.А. *Организация и архитектура ЭВМ. Вычислительные системы*. СПб.: Лань; 2022. 144 с. ISBN 978-5-507-48089-0
14. Гельбух С.А. *Сети ЭВМ и телекоммуникации. Архитектура и организация*. СПб.: Лань; 2019. 208 с. ISBN 978-5-8114-3474-9
15. Андреев А.М., Можаров Г.П., Сюзев В.В. *Многопроцессорные вычислительные системы. Теоретический анализ, математические модели и применение*. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2011. 336 с. ISBN 978-5-7038-3439-6

REFERENCES

1. Henessey J.L., Patterson D.A. *Komp'yuternaya arkhitektura. Kolichestvennyi podkhod (Computer Architecture. A Quantitative Approach)*: transl. from Engl. 5th ed. Moscow: Tekhnosfera; 2016. 936 p. (in Russ.). [Henessey J.L., Patterson D.A. *Computer Architecture. A Quantitative Approach*. 5th ed. Morgan Kaufmann; 2011. 856 p.]
2. Sugak E.V. *Prikladnaya teoriya nadezhnosti. Praktikum (Applied Reliability Theory. The Workshop. Textbook)*. Moscow: Lan; 2023. 312 p. (in Russ.). ISBN 978-5-507-47014-3
3. Tengaikin E.I. *Organizatsiya setevogo administrirovaniya. Setevye operatsionnye sistemy, servery, sluzhby i protokoly. Prakticheskie raboty (Organization of Network Administration. Network Operating Systems, Servers, Services and Protocols. Practical Work)*. St. Petersburg: Lan; 2022. 100 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8114-9783-6
4. Kovalenko S.M., Platonova O.V. Analysis of the operational efficiency of complex automation systems and the calculation of their reliability on the basis of continuous models. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU J. Mechanical Engineering*. 2014;8(653):75–89 (in Russ.). <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-8-75-79>
5. Voevodin V.V., Voevodin V.I. *Parallel'nye vychisleniya (Parallel Computing)*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2002. 608 p. (in Russ.).
6. Orlov S.A., Tsil'ker B.Ya. *Organizatsiya EVM i system (Organization of Computers and Systems)*. St. Petersburg: Piter; 2016. 688 p. (in Russ.).
7. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti (Fundamentals of Reliability Theory)*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2006. 702 p. (in Russ.). ISBN 5-94157-541-6
8. Cherkesov G.N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov (Reliability of Hardware and Software Complexes)*. St. Petersburg: Piter; 2005. 479 p. (in Russ.). ISBN 5-469-00102-4
9. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.V., Efanov D.V. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoi diagnostiki (Fundamentals of Reliability Theory and Technical Diagnostics)*. St. Petersburg: Lan; 2019. 588 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8114-3453-4
10. Podgorny Y.V., Antonovich A.N., Petrushin A.A., Sigov A.S., Vorotilov K.A. Effect of metal electrodes on the steady-state leakage current in PZT thin film capacitors. *J. Electroceram.* 2022;49:15–21. <https://doi.org/10.1007/s10832-022-00288-5>
11. Abdullaev D.A., Milovanov R.A., Volkov R.L., Borgardt N.I., Lantsev A.N., Vorotilov K.A., Sigov A.S. Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*. 2020;8(5):44–67 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>
12. Konyukhova O.V., Kravtsova E.A., Lukyanov P.V. *Tekhnicheskoe i programmnoe obespechenie vychislitel'nykh mashin i system (Technical and Software Support of Computers and Systems)*. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya; 2023. 200 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-1186-8
13. Zhuravlev A.A. *Organizatsiya i arkhitektura EVM. Vychislitel'nye sistemy (Organization and Architecture of Computers. Computer Systems)*. St. Petersburg: Lan; 2022. 144 p. (in Russ.). ISBN 978-5-507-48089-0
14. Gelbukh S.A. *Seti EVM i telekommunikatsii. Arkhitektura i organizatsiya (Computer Networks and Telecommunications. Architecture and Organization)*. St. Petersburg: Lan; 2019. 208 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8114-3474-9
15. Andreev A.M., Mozharov G.P., Syuzev V.V. *Mnogoprotessornye vychislitel'nye sistemy. Teoreticheskii analiz, matematicheskie modeli i primeneniye (Multiprocessor Computing Systems. Theoretical Analysis, Mathematical Models and Applications)*. Moscow: Bauman Press; 2011. 336 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7038-3439-6

Об авторах

Петушков Григорий Валерьевич, проректор, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: petushkov@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0006-0801-429X>

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

About the authors

Grigory V. Petushkov, Vice-Rector, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: petushkov@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0006-0801-429X>

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

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.314.1+681.586.7
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-59-67>
EDN APNAQO



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии

В.К. Битюков,
А.И. Лавренов[@]

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

Резюме

Цели. Цели работы – разработка нового метода проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по топологии Zeta с возможным учетом магнитной связи дросселей, проведение расчетов по предложенной методике номиналов дросселей и конденсаторов Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями и проверка достоверности предельной непрерывной математической модели и метода проектирования, основанного на ней, с помощью SPICE-моделирования в системе автоматизированного проектирования *Multisim*.

Методы. Поставленные задачи решены при помощи аналитического анализа предельной непрерывной математической модели. Предложенным методом выполнен расчет номиналов связанных дросселей и конденсаторов преобразователя.

Результаты. С помощью системы автоматизированного проектирования *Multisim* проведено моделирование Zeta-преобразователя со связанными дросселями, в ходе которого получены нагрузочные и передаточные характеристики преобразователя, показывающие зависимости токов, протекающих в связанных дросселях, и напряжений на конденсаторах от входного напряжения, а также зависимость выходного напряжения от тока нагрузки. Показано, что представленный метод проектирования достоверен и полностью соответствует результатам моделирования. Установлена корреляция передаточных и нагрузочных характеристик токов и напряжений, полученных моделированием и расчетным путем. Отличия рассчитанных с помощью предельной непрерывной математической модели значений от результатов моделирования в системе автоматизированного проектирования *Multisim* сопоставимы с погрешностью измерений.

Выводы. Предложенный метод проектирования позволяет рассчитать номиналы элементов Zeta-топологии как с учетом индуктивной связи дросселей, так и без него. Кроме того, с помощью данного метода возможно рассчитать постоянные значения и пульсации токов дросселей и напряжений на конденсаторах. Приведенный в статье метод проектирования DC/DC-преобразователей можно использовать как для предварительного оценочного расчета, так и для более детального расчета с анализом работы устройства при различных входных напряжениях и сопротивлениях нагрузки.

Ключевые слова: DC/DC-преобразователь, понижающе-повышающий преобразователь, топология Zeta, предельная непрерывная математическая модель, метод проектирования, моделирование

• Поступила: 24.04.2024 • Доработана: 28.08.2024 • Принята к опубликованию: 03.12.2024

Для цитирования: Битюков В.К., Лавренов А.И. Метод проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):59–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-59-67>, <https://elibrary.ru/APNAQO>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Method for designing DC/DC converters based on Zeta topology

Vladimir K. Bityukov,
Aleksey I. Lavrenov[@]

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

Abstract

Objectives. The work set out to develop a new design method for DC/DC converters based on the Zeta topology to calculate the ratings of inductors and capacitors of the Zeta converter with magnetically coupled inductors and verify the accuracy of the ultimate continuous mathematical model and design method based on it using SPICE simulation in the *Multisim* computer-aided design (CAD) system.

Methods. The proposed method analyzes an ultimate continuous mathematical model to calculate the ratings of coupled inductors and capacitors of the converter.

Results. The simulation of the Zeta converter with coupled inductors was carried out using the *Multisim* CAD system, during which the load and transfer characteristics of the converter were obtained. These characteristics show the dependencies of the currents flowing through the coupled inductors and voltages across the capacitors on the input voltage, as well as the dependence of the output voltage on the load current. The presented design method is shown to be accurate and in full agreement with the simulation results. A correlation between the transfer and load characteristics of currents and voltages obtained by simulation and calculation is established. The differences between the values calculated using the ultimate continuous mathematical model and the results of simulation in the *Multisim* CAD system are comparable to measurement errors.

Conclusions. The proposed design method is used calculate element ratings for the Zeta topology both with and without taking the inductive coupling into account. The method can also be used to calculate the steady-state values and ripple currents of the inductors and voltages across the capacitors. The design method for DC/DC converters presented in the paper can be used for both preliminary evaluation calculations and more detailed calculations, including analysis of the device operation under various input voltages and load resistances.

Keywords: DC/DC converter, buck-boost converter, Zeta topology, ultimate continuous mathematical model, design method, simulation

• Submitted: 24.04.2024 • Revised: 28.08.2024 • Accepted: 03.12.2024

For citation: Bityukov V.K., Lavrenov A.I. Method for designing DC/DC converters based on Zeta topology. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):59–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-59-67>, <https://elibrary.ru/APNAQO>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

DC/DC-преобразователи различных топологий [1–3] применяются в космической [4], авиационной [5], медицинской [6] технике и большом количестве мобильных устройств [7, 8], что иллюстрирует практическую значимость настоящего исследования. Потребность в новых методах проектирования DC/DC-преобразователей определяется общей тенденцией к их миниатюризации и переходу к автономному исполнению радиоэлектронных средств. Основная сложность при проектировании DC/DC-преобразователей для подобных устройств связана с использованием низковольтных напряжений и относительно малых токов потребления. При токах менее 0.5 А коэффициент полезного действия DC/DC-преобразователя начинает резко уменьшаться¹, что требует строгой оценки работы устройства в различных режимах и более продвинутых методов расчета [6, 7, 9–11].

Создание DC/DC-преобразователей, как и других радиоэлектронных средств, базируется на соответствующих математических моделях [11]. Они являются основой для единого методического подхода к разработке, проектированию и исследованию устройств. Метод проектирования униполярных DC/DC-преобразователей, построенных по топологии Zeta, с учетом индуктивной связи дросселей основан на одной из таких моделей [12, 13].

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛОВ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ ZETA-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УЧЕТОМ МАГНИТНОЙ СВЯЗИ ДРОССЕЛЕЙ

Схема DC/DC-преобразователя, построенного по Zeta-топологии, показана на рис. 1. Она имеет два дросселя, два конденсатора, электронный ключ, обычно выполненный в виде полевого транзистора, и блок управления (БУ), определяющий режим транзистора [2]. Дроссели L1 и L2 выполняют функцию накопления и передачи энергии посредством электромагнитной индукции, а разделительный конденсатор C1 присутствует в схеме для развязки входа и выхода преобразователя. Разделительный конденсатор C1 также иногда называют «летающим», т.к. он выполняет функции не только разделения, но и накопления и передачи энергии. Конденсатор C2 является сглаживающим выходным конденсатором.

Метод расчета Zeta-преобразователя с учетом магнитной связи дросселей основан на соответствующей математической модели [11–13]. Построение

Zeta-преобразователя на связанных дросселях значительно уменьшает пульсации токов [14]. С помощью математической модели получены выражения для постоянных и переменных значений токов и напряжения преобразователя. В процессе анализа полученных выражений были выведены формулы для определения номиналов электрорадиоэлементов (ЭРЭ). Для расчета номиналов ЭРЭ DC/DC-преобразователя необходимо знать следующие параметры:

- постоянное выходное напряжение U_{C2} ,
- диапазон изменения постоянного входного напряжения от $U_{вх\ min}$ и до $U_{вх\ max}$,
- период коммутации силового ключа T ,
- максимальные размахи пульсаций напряжений u_{C1} , u_{C2} и токов i_{L1} , $i_{L2} - \Delta u_{C1}$, Δu_{C2} , Δi_{L1} , Δi_{L2} соответственно,
- диапазон изменения сопротивления нагрузки от $R_{н\ min}$ до $R_{н\ max}$ (или токов нагрузки от $I_{н\ min}$ до $I_{н\ max}$),
- коэффициент связи дросселей k_c .

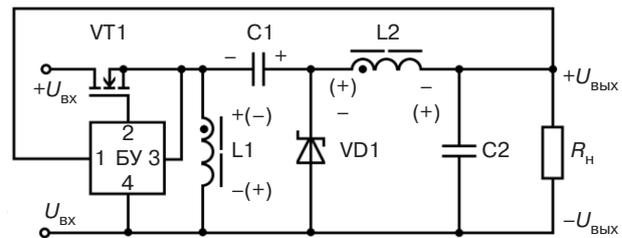


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема преобразователя понижающе-повышающего типа, выполненного по топологии Zeta. Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81². R_n – сопротивление нагрузки, $U_{вх}$ – входное напряжение, $U_{вых}$ – выходное напряжение

Опциональными параметрами являются r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток связанных дросселей L1 и L2. Сопротивления r_1 и r_2 учтены при построении математической модели для уточнения расчета, а также для упрощенного вывода формул токов дросселей в связи со спецификой построения предельных непрерывных математических моделей.

Для расчета понадобится определить входное напряжение $U_{вх\ 0.5}$ при коэффициенте заполнения $D_{0.5}$, равном 0.5 и минимальном сопротивлении нагрузки $R_{н\ min}$ по формуле:

² 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.).]

¹ Datasheet TPS40200 Wide Input Range Non-Synchronous Voltage Mode Controller datasheet (Rev. G). Texas Instruments. SLUS659G – FEBRUARY 2006–REVISED NOVEMBER 2014.

$$U_{\text{вх } 0.5} = \frac{(-U_{C2}D_{0.5}^2 + 2U_{C2}D_{0.5} - U_{C2})r_2 - U_{C2}D_{0.5}^2r_2 - R_{\text{нсп}}U_{C2}D_{0.5}^2 + 2R_{\text{нсп}}U_{C2}D_{0.5} - R_{\text{нсп}}U_{C2}}{R_{\text{нсп}}D_{0.5}^2 - R_{\text{нсп}}D_{0.5}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{нсп}} = \frac{R_{\text{нmin}} + R_{\text{нmax}}}{2}$ – среднее сопротивление нагрузки.

Кроме этого, необходимо рассчитать минимальный и максимальный коэффициенты заполнения D_{min} и D_{max} по формулам:

$$D_{\text{min}} = \frac{\sqrt{-(4U_{C2}^2r_1r_2) + (R_{\text{нmin}}^2U_{\text{вх max}}^2 - 4R_{\text{нmin}}U_{C2}^2r_1)} - 2U_{C2}r_2 - (2R_{\text{нmin}}U_{C2} + R_{\text{нmin}}U_{\text{вх max}})}{-2U_{C2}r_2 - 2U_{C2}r_1 - (2R_{\text{нmin}}U_{C2} + 2R_{\text{нmin}}U_{\text{вх max}})}, \quad (2)$$

$$D_{\text{max}} = \frac{\sqrt{-(4U_{C2}^2r_1r_2) + (R_{\text{нmin}}^2U_{\text{вх min}}^2 - 4R_{\text{нmin}}U_{C2}^2r_1)} - 2U_{C2}r_2 - (2R_{\text{нmin}}U_{C2} + R_{\text{нmin}}U_{\text{вх min}})}{-2U_{C2}r_2 - 2U_{C2}r_1 - (2R_{\text{нmin}}U_{C2} + 2R_{\text{нmin}}U_{\text{вх min}})}. \quad (3)$$

Так как метод расчета основан на предельной непрерывной математической модели Zeta-преобразователя, то в соответствии с [15] на границах диапазона коэффициента заполнения D_{min} и D_{max} наблюдается наибольшее несоответствие расчетных значений размахов пульсаций с результатом моделирования. При этом самое высокое соответствие наблюдается в окрестности коэффициента заполнения D , равного 0.5. Поэтому целесообразно проводить расчет номиналов преобразователя именно при $D = 0.5$. Для этого необходимо получить аналитическую зависимость между максимальными пульсациями токов и напряжений преобразователя и их пульсациями при $D = 0.5$. Таким образом, при учете (1)–(3) можно получить формулы для коэффициентов перерасчета k_{L1} , k_{L2} , k_{C1} и k_{C2} . При этом можно заметить, что формулы расчета пульсаций Δi_{L1} и Δi_{L2} совпадают [13], поэтому и коэффициенты k_{L1} и k_{L2} также будут совпадать. В связи с этим далее принято, что $k_{L1} = k_{L2} = k_L$.

$$k_L = \frac{U_{\text{вх max}}D_{\text{min}}T(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_2)}{L_2L_1(k_c - 1)(k_c + 1)} + \frac{U_{\text{вх max}}D_{\text{min}}^3Tr_1(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_2)}{L_2L_1(k_c - 1)(k_c + 1)((D_{\text{min}}^2 - 2D_{\text{min}} + 1)r_2 + D_{\text{min}}^2r_1 + R_{\text{нmax}}D_{\text{min}}^2 - 2R_{\text{нmax}}D_{\text{min}} + R_{\text{нmax}})}, \quad (4)$$

$$= \frac{U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}T(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_2)}{L_2L_1(k_c - 1)(k_c + 1)} + \frac{U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}^3Tr_1(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_2)}{L_2L_1(k_c - 1)(k_c + 1)((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2r_1 + R_{\text{нmax}}D_{0.5}^2 - 2R_{\text{нmax}}D_{0.5} + R_{\text{нmax}})}$$

$$k_{C1} = \frac{-U_{\text{вх min}}D_{\text{max}}^2T(D_{\text{max}} - 1)}{C_1((D_{\text{max}}^2 - 2D_{\text{max}} + 1)r_2 + D_{\text{max}}^2r_1 + R_{\text{нmin}}D_{\text{max}}^2 - 2R_{\text{нmin}}D_{\text{max}} + R_{\text{нmin}})}, \quad (5)$$

$$= \frac{-U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}^2T(D_{0.5} - 1)}{C_1((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2r_1 + R_{\text{нmin}}D_{0.5}^2 - 2R_{\text{нmin}}D_{0.5} + R_{\text{нmin}})}$$

$$k_{C2} = \frac{U_{\text{вх max}}D_{\text{min}}T^2(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_1)}{8C_2L_1L_2(k_c - 1)(k_c + 1)} + \frac{U_{\text{вх max}}D_{\text{min}}^3T^2r_1(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_1)}{8C_2L_1L_2(k_c - 1)(k_c + 1)((D_{\text{min}}^2 - 2D_{\text{min}} + 1)r_2 + D_{\text{min}}^2r_1 + R_{\text{нmax}}D_{\text{min}}^2 - 2R_{\text{нmax}}D_{\text{min}} + R_{\text{нmax}})}, \quad (6)$$

$$= \frac{U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}T^2(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_1)}{8C_2L_1L_2(k_c - 1)(k_c + 1)} + \frac{U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}^3T^2r_1(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_1)}{8C_2L_1L_2(k_c - 1)(k_c + 1)((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2r_1 + R_{\text{нmax}}D_{0.5}^2 - 2R_{\text{нmax}}D_{0.5} + R_{\text{нmax}})}$$

Приведенные уравнения содержат в себе номиналы ЭРЭ L_1 , L_2 , C_1 и C_2 . При помощи функции `simplify` *Mathcad*³ выражения (4)–(6) можно упростить, что позволяет исключить переменные L_1 , L_2 , C_1 и C_2 , тем самым получить уравнения, не зависящие от номиналов дросселей и конденсаторов. Однако итоговые формулы определения коэффициентов k_L , k_{C1} и k_{C2} слишком объемные, поэтому приводить их в статье нецелесообразно.

³ <https://www.mathcad.com/en>. Дата обращения 24.04.2024. / Accessed April 24, 2024.

Используя соотношения (4)–(6), формулы для размахов пульсаций токов и напряжений при коэффициенте заполнения $D = 0.5$ можно записать следующим образом:

$$\Delta i_{L1\ 0.5} = \frac{\Delta u_{L1}}{k_L}, \Delta i_{L2\ 0.5} = \frac{\Delta u_{L2}}{k_L}, \Delta u_{C1\ 0.5} = \frac{\Delta u_{C1}}{k_{C1}}, \Delta u_{C2\ 0.5} = \frac{\Delta u_{C2}}{k_{C2}}. \quad (7)$$

Формулы для расчета номиналов дросселей L_1 , L_2 и конденсаторов C_1 , C_2 , имеют вид:

$$L_1 = \frac{\left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)k_c r_2 + D_{0.5}^2 k_c r_1 + (R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max})k_c \right) \Delta i_{L2\ 0.5} \sqrt{L_1 L_2}}{\Delta i_{L1\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)} + \frac{\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) T r_2 + \left(R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) T}{\Delta i_{L1\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)}, \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{\left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)k_c r_2 + D_{0.5}^2 k_c r_1 + (R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max})k_c \right) \Delta i_{L1\ 0.5} \sqrt{L_1 L_2}}{\Delta i_{L2\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)} + \frac{\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) T r_2 + \left(R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) T}{\Delta i_{L2\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)}, \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{-\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 T (D_{0.5} - 1) \right)}{\Delta u_{C1\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\min} D_{0.5}^2 - 2R_{H\min} D_{0.5} + R_{H\min} \right)}, \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{-\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} T^2 (D_{0.5} - 1)^2 (r_2 + R_{H\max}) (k_c \sqrt{L_1 L_2} + L_1) \right)}{8 \Delta u_{C2\ 0.5} L_1 L_2 (k_c - 1)(k_c + 1) \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)}. \quad (11)$$

Как видно из формул (8) и (9), при связанных дросселях номиналы ЭРЭ тоже зависят друг от друга. Решение этой системы уравнений в аналитическом виде затруднительно. Поэтому можно принять во внимание, что связанные дроссели обычно имеют равные номиналы, а значит и одинаковые пульсации. Учитывая это, можно записать формулы для определения L_1 и L_2 в виде:

$$L_1 = \frac{\left(-\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 \right) + 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 - U_{Bx\max} D_{0.5} \right) T r_2}{(1 - k_c) \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1) \Delta i_{L1\ 0.5} r_2 + D_{0.5}^2 \Delta i_{L1\ 0.5} r_1 + (R_{H\min} D_{0.5}^2 - 2R_{H\min} D_{0.5} + R_{H\min}) \Delta i_{L1\ 0.5} \right)} + \frac{\left((2R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 - R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}) T - 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 T r_1 \right)}{(1 - k_c) \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1) \Delta i_{L1\ 0.5} r_2 + D_{0.5}^2 \Delta i_{L1\ 0.5} r_1 + (R_{H\min} D_{0.5}^2 - 2R_{H\min} D_{0.5} + R_{H\min}) \Delta i_{L1\ 0.5} \right)}, \quad (12)$$

$$L_2 = \frac{\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + U_{Bx\max} D_{0.5} \right) T r_2 + \left(R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) T r_1}{(1 - k_c) \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1) \Delta i_{L2\ 0.5} r_2 + D_{0.5}^2 \Delta i_{L2\ 0.5} r_1 + (R_{H\min} D_{0.5}^2 - 2R_{H\min} D_{0.5} + R_{H\min}) \Delta i_{L2\ 0.5} \right)}. \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) отличаются только одним слагаемым $-2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 T r_1$ в числителе (12), которое зависит от эквивалентного сопротивления дросселя L_1 , поэтому номиналы L_1 и L_2 будут примерно равны.

2. ПРИМЕР РАСЧЕТА НОМИНАЛОВ ЭРЭ ЗЕТА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Исходные параметры для расчета преобразователя: $k_c = -0.99$, $U_{C2} = 12$ В, $U_{Bx\ max} = 17.5$ В, $U_{Bx\ min} = 6.5$ В, $\Delta i_{L1} = 330$ мА, $\Delta i_{L2} = 330$ мА, $\Delta u_{C1} = 7$ мВ, $\Delta u_{C2} = 1.9$ мВ, $R_{H\ min} = 50$ Ом, $R_{H\ max} = 100$ Ом.

Рассчитывая по формулам (1)–(3) входное напряжение $U_{Bx\ 0.5}$, минимальный и максимальный коэффициенты заполнения D_{min} и D_{max} , можно получить $U_{Bx\ 0.5} = 12.005$ В, $D_{min} = 0.407$ и $D_{max} = 0.649$.

При помощи приведенных выше параметров и с учетом формулы (7) можно получить $k_L = 1.185$, $k_{C1} = 1.298$, $k_{C2} = 1.186$.

Соответственно, размахи пульсаций при коэффициенте заполнения $D = 0.5$ равны: $\Delta i_{L1\ 0.5} = 278$ мА, $\Delta i_{L2\ 0.5} = 278$ мА, $\Delta u_{C1\ 0.5} = 5$ мВ, $\Delta u_{C2\ 0.5} = 1.6$ мВ.

Рассчитав номиналы элементов по формулам (10)–(13), получаем $L_1 \approx 22$ мкГн, $L_2 \approx 22$ мкГн, $C_1 \approx 44$ мкФ, $C_2 \approx 44$ мкФ.

3. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ MULTISIM⁴

На рис. 2 представлена схема SPICE-моделирования Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями. Здесь T1 – блок связанных дросселей, каждый из которых имеет номинал 22 мкГн. Коэффициент связи дросселей равен -0.99 ,

т.е. дроссели включены встречно друг другу для подавления пульсаций тока. Резисторы r_1 и r_2 имитируют активные сопротивления обмоток связанных дросселей, C1 – «летающий» конденсатор, C2 – сглаживающий выходной конденсатор, VT1 – силовой ключ, обеспечивающий коммутацию силовой части с заданной частотой, V1 и V2 – источники постоянного напряжения и напряжения широтно-импульсной модуляции, VD1 – идеальный диод. Кроме элементов на схеме также присутствуют пробники токов и напряжений, отвечающие за индикацию параметров токов и напряжений.

На рис. 3 представлены результаты моделирования в режиме анализа переходных процессов спустя более 4 мс после начала. Здесь показаны формы токов через обмотки дросселей L1 и L2, а также напряжений C1 и C2 на конденсаторах в установившемся режиме работы после завершения переходных процессов. Надо отметить, что максимум и минимум напряжения U_{C2} приходятся на середину каждой из фаз накопления и передачи энергии, как и отмечалось в [13].

Для подтверждения правильности проведенных расчетов на рис. 4–7 показаны расчетные и полученные при моделировании передаточные характеристики токов и напряжений преобразователя.

Передаточная характеристика – это зависимость соответствующей физической величины от входного напряжения преобразователя. Расчетные значения были получены при использовании математической модели преобразователя.

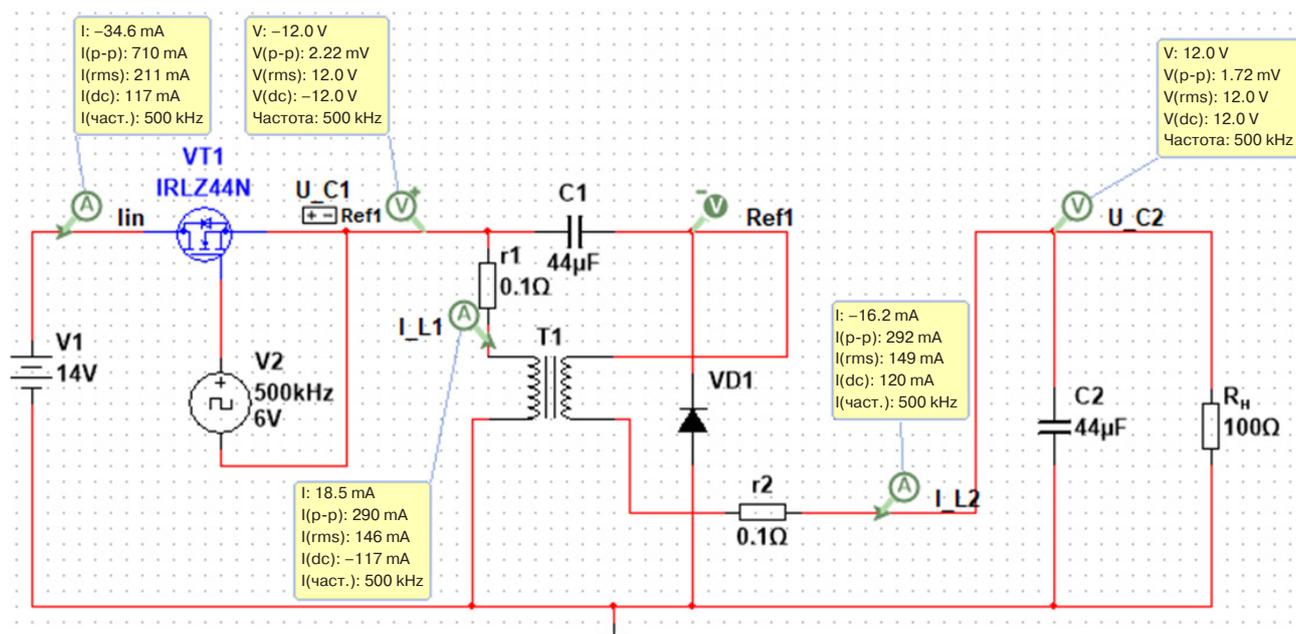


Рис. 2. Схема моделирования Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями

⁴ <https://www.ni.com/en.html>. Дата обращения 24.04.2024. / Accessed April 24, 2024.

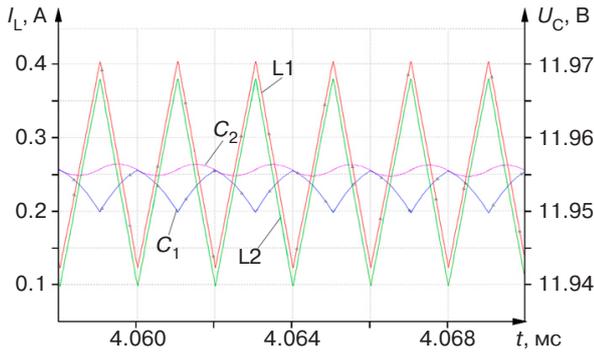


Рис. 3. Графики токов и напряжений Zeta-преобразователя в установившемся режиме

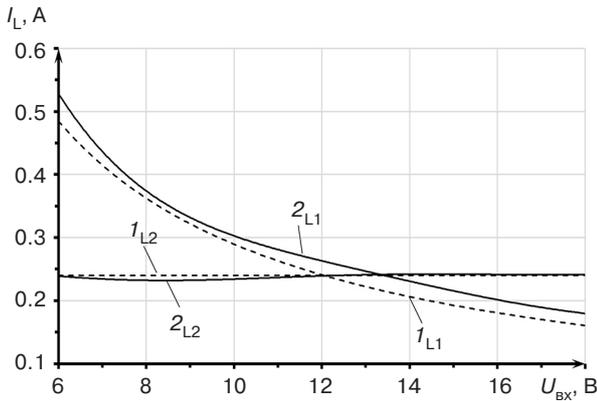


Рис. 4. Передаточные характеристики токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2 при сопротивлении нагрузки 50 Ом: 1 – расчетное значение; 2 – результат моделирования

На графиках передаточных характеристик видно совпадение расчетных значений и результатов, полученных при моделировании, что подтверждает достоверность методики расчета. Отклонения графиков моделирования относительно расчетных достаточно малы, так, например, отклонение тока I_{L1} при моделировании относительно расчетного составило от 3.5% до 12%, аналогично для I_{L2} – от 0% до 3.4%, U_{C1} – от 0% до 0.05%, U_{C2} – от 0.003% до 0.03%, что иллюстрирует достоверность расчетов.

На рис. 8 представлены нагрузочные характеристики преобразователя при входном напряжении равном 6.5, 12 и 17.5 В. В связи с тем, что различие выходных напряжений при расчете и моделировании не превышает сотые доли процента, то графики нагрузочных характеристик преобразователя, полученные расчетом и моделированием, практически полностью совпадают. Нагрузочные характеристики для входного напряжения – 12 и 17.5 В построены в декартовых координатах снизу и слева, а нагрузочная характеристика при входном напряжении – в координатах сверху и справа. Информация, приведенная на рис. 8, иллюстрирует тот факт, что результаты расчетов, выполненных с помощью предложенного

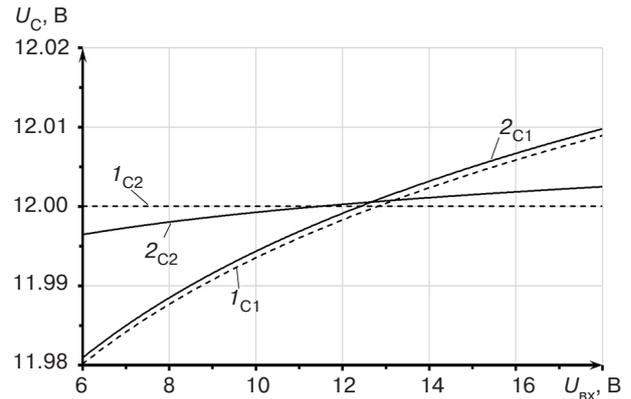


Рис. 5. Передаточные характеристики напряжений на конденсаторах C1 и C2 при сопротивлении нагрузки 50 Ом: 1 – расчетное значение; 2 – результат моделирования

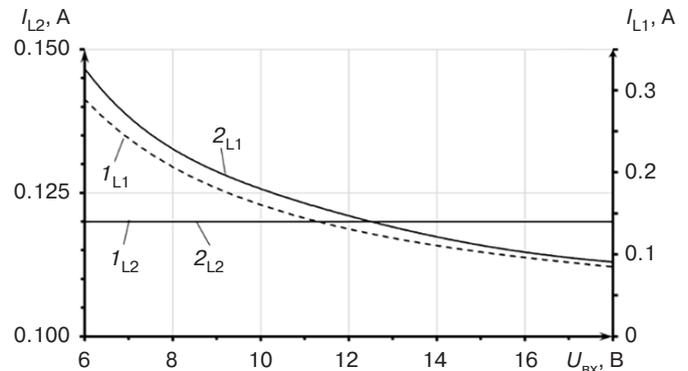


Рис. 6. Передаточные характеристики токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2 при сопротивлении нагрузки 100 Ом: 1 – расчетное значение; 2 – результат моделирования

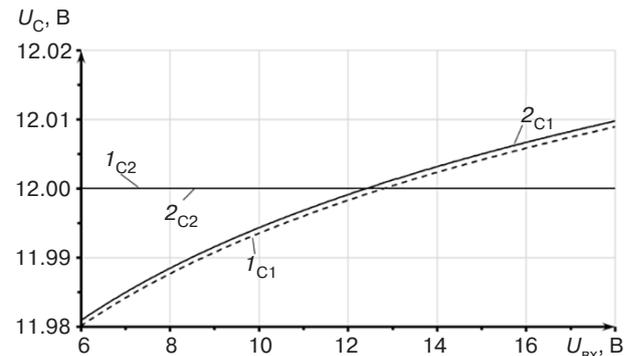


Рис. 7. Передаточные характеристики напряжений на конденсаторах C1 и C2 при сопротивлении нагрузки 100 Ом: 1 – расчетное значение; 2 – результат моделирования

метода проектирования DC/DC-преобразователей и математической модели, полностью повторяют зависимость тока нагрузки от изменения напряжения стабилизации. Это доказывает достоверность описания работы DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии с учетом магнитной связи связанными дросселями, рассмотренными методами.

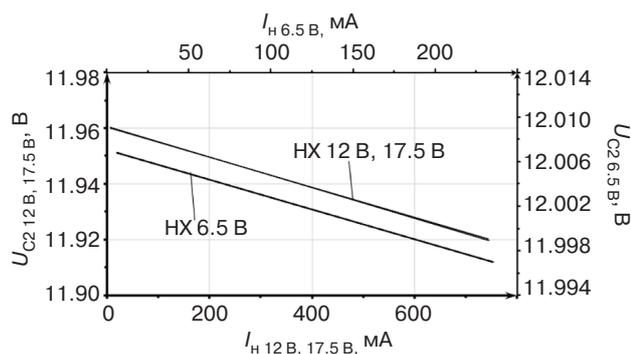


Рис. 8. Нагрузочные характеристики (НХ) при 12 В и 17.5 В, а также НХ при 6.5 В. I_n – ток нагрузки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый метод проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии, учитывающий магнитную связь связанных дросселей. Метод позволяет рассчитать

номиналы конденсаторов и дросселей силовой части преобразователя, а также учитывать переменные составляющие токов, протекающих через обмотки дросселей, и напряжений на конденсаторах.

С помощью полученных в ходе проектирования номиналов ЭРЭ проведено моделирование в системе автоматизированного проектирования *Multisim* и выполнены расчеты при использовании предельной непрерывной математической модели преобразователя, на которой и основан вышеописанный метод. Полученные передаточные и нагрузочные характеристики показывают высокое совпадение между математическими расчетами и результатами моделирования в *Multisim*.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Одинокоев А.О., Кремзуков Ю.А. Выбор топологии преобразователя постоянного напряжения. SEPIC или Zeta. *Практическая силовая электроника*. 2022;4(88):44–47. <https://www.elibrary.ru/fayaac>
- Битюков В.К., Симачов Д.С., Бабенко В.П. *Схемотехника электропреобразовательных устройств*. Вологда: Инфра-Инженерия; 2023. 384 с. ISBN 978-5-9729-1439-5
- Erickson R.W., Maksimović D. *Fundamentals of Power Electronics*. NY: Springer; 2020. 1084 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>
- Гутер Л.Р. Перспективы разработки многофункциональных модулей DC/DC для космической техники. *Практическая силовая электроника*. 2023;1(89):37–39. <https://www.elibrary.ru/vcxjlf>
- Васюков И.В., Павленко А.В., Батищев Д.В. Обзор и анализ топологий преобразователей систем электропитания на водородных топливных элементах для беспилотных летательных аппаратов киловаттного класса мощности. *Известия вузов. Электромеханика*. 2022;65(2):19–26.
- Крамм М.Н., Бодин О.Н., Бодин А.Ю., Чыонг Т.Л.Н., Жихарева Г.В. Особенности построения многоэлектродной системы электрокардиологического скрининга. *Медицинская техника*. 2022;5(335):37–41. <https://www.elibrary.ru/camqob>
- Лукин А.В., Шайхутдинов М.В. Ускоренные испытания на надежность импульсных источников питания DC/DC серии СМВ6А. *Практическая силовая электроника*. 2022;3(87):26–33. <https://www.elibrary.ru/lbnuprb>
- Белов Г.А., Петров К.И. Исследование динамической модели резонансного преобразователя постоянного напряжения. *Практическая силовая электроника*. 2022;2(86):8–13. <https://www.elibrary.ru/efnqkz>
- Третьяков Н.К., Кузьменко В.П., Соленая О.Я. Проектирование источников переменного напряжения с использованием современных решений. *Практическая силовая электроника*. 2024;1(93):40–45. <https://www.elibrary.ru/wqmtyd>
- Белов Г.А. Временной анализ резонансного преобразователя постоянного напряжения типа LLC в режиме прерывистого тока. *Практическая силовая электроника*. 2022;1(85):2–13. <https://www.elibrary.ru/vwnrci>
- Коршунов А.И. Предельная непрерывная модель системы с периодическим высокочастотным изменением структуры. *Силовая электроника*. 2021;5(92):48–51.
- Битюков В.К., Лавренов А.И., Петров Д.Р. Пульсации токов и напряжений Zeta преобразователя с индуктивно связанными дросселями (Часть 1). *Проектирование и технология электронных средств*. 2023;3:36–41. <https://www.elibrary.ru/doawcp>
- Битюков В.К., Лавренов А.И., Петров Д.Р. Пульсации токов и напряжений Zeta преобразователя с индуктивно связанными дросселями (Часть 2). *Проектирование и технология электронных средств*. 2023;4:27–31. <https://www.elibrary.ru/dspqrq>
- Zhu F., Li Q. Coupled Inductors with an Adaptive Coupling Coefficient for Multiphase Voltage Regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2023;38(1):739–749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3203855>
- Битюков В.К., Лавренов А.И., Малицкий Д.А. Анализ пульсаций DC/DC преобразователя, построенного по Zeta топологии, с использованием его предельной непрерывной математической модели. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):36–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-36-48>

REFERENCES

1. Odinokov A.O., Kremzukov Yu.A. Selecting DC converter topology. SEPIC or Zeta. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2022;4(88):44–47 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/fayaac>
2. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Skhemitekhnika elektropreobrazovatel'nykh ustroystv (Circuitry of Electrical Converter Devices)*. Vologda: Infra-Inzheneriya; 2023. 384 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-1439-5
3. Erickson R.W., Maksimović D. *Fundamentals of Power Electronics*. NY: Springer; 2020. 1084 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>
4. Guter R.L. Prospects of multi-functional DC/DC modules development for Space engineering. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2023;1(89):37–39 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vcxjlf>
5. Vasyukov I.V., Pavlenko A.V., Batishchev D.V. Review and Analysis of Topologies of Converters of Power Supply Systems on Hydrogen Fuel Cells for Unmanned Aerial Vehicles of Kilowatt Power Class. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*. 2022;65(2):19–26 (in Russ.).
6. Kramm M.N., Bodin O.N., Bodin A.Y., et al. Constructional Features of a Multielectrode Electrocardiology Screening System. *Biomed. Eng.* 2023;56(5):345–352. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10233-7>
[Original Russian Text: Kramm M.N., Bodin O.N., Bodin A.Y., Truong T.L.N., Zhikhareva G.V. Constructional Features of a Multielectrode Electrocardiology Screening System. *Meditsinskaya Tekhnika*. 2022;5(335):37–41 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/camqob>]
7. Lukin A.V., Shaikhutdinov M.V. Accelerated reliability tests of DC/DC switched mode power supplies of the CMB6A series. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2022;3(87):26–33 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/lbnupb>
8. Belov G.A., Petrov K.I. Studying dynamic model of resonant DC-DC voltage converter. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2022;2(86):8–13 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/efnqkz>
9. Tretiakov N.K., Kuzmenko V.P., Solenaya O.Ya. AC voltage sources design employing state-of-the-art solutions. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2024;1(93):40–45 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/wqmytd>
10. Belov G.A. Time domain analysis of an LLC type DC-DC voltage converter in discontinuous conduction mode. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2022;1(85):2–13 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vwnrci>
11. Korshunov A.I. Limiting continuous model of a system with periodic high-frequency structure variation. *Silovaya elektronika = Power Electronics*. 2021;5(92):48–51 (in Russ.).
12. Bityukov V.K., Lavrenov A.I., Petrov D.R. Current and voltage pulsations of Zeta converter with inductively coupled inductors (Part 1). *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*. 2023;3:36–41 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/doawcn>
13. Bityukov V.K., Lavrenov A.I., Petrov D.R. Current and voltage pulsations of Zeta converter with inductively coupled inductors (Part 2). *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*. 2023;4:27–31 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/dspqrt>
14. Zhu F., Li Q. Coupled Inductors with an Adaptive Coupling Coefficient for Multiphase Voltage Regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2023;38(1):739–749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3203855>
15. Bityukov V.K., Lavrenov A.I., Malitskiy D.A. Analysis of the DC/DC Zeta topology converter ripples by applying its limiting continuous mathematical model. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):36–48 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-36-48>

Об авторах

Битюков Владимир Ксенофонтович, д.т.н., профессор, 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: bitukov@mirea.ru. Scopus Author ID 6603797260, ResearcherID Y-8325-2018, SPIN-код РИНЦ 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Лавренов Алексей Игоревич, аспирант, 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: lavrenov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 6048-5027, <https://orcid.org/0000-0001-5722-541X>

About the authors

Vladimir K. Bityukov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Wave Processes and Technology, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, RSCI SPIN-code 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Aleksey I. Lavrenov, Postgraduate Student, Assistant, Department of Radio Wave Processes and Technology, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lavrenov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 6048-5027, <https://orcid.org/0000-0001-5722-541X>

УДК 527.62

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-68-75>

EDN LSCIAO



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разбиение множества базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы

М.Н. Крижановский[®],
О.В. Тихонова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: mihakri007@mail.ru

Резюме

Цели. Актуальной проблемой систем локального позиционирования при отсутствии доступа к глобальным навигационным спутниковым системам является низкая точность позиционирования, связанная, как правило, с неравномерным покрытием рабочей зоны в связи с ее геометрическими особенностями или наличием в ее пределах массивных препятствий и стен. Обычно эта проблема решается путем размещения в рабочей зоне избыточного числа базовых станций системы позиционирования. Подобный подход порождает высокую стоимость таких систем, что в свою очередь препятствует их распространению. Поэтому исследования и разработки, направленные на повышение точности локальных систем позиционирования при использовании минимального числа станций, имеют большую актуальность. Ранее автором был предложен метод повышения точности локального позиционирования путем учета препятствий, известных на этапе проектирования системы. Учет таких препятствий при расчете местоположения реализуется за счет механизма предварительного разбиения радиомаяков на группы и выделения опорных станций этих групп среди базовых станций. Целью работы является усовершенствование этого алгоритма за счет автоматизации этапа подготовки информации о группировке станций.

Методы. Использован метод компьютерного моделирования для подтверждения работоспособности алгоритма разбиения станций системы позиционирования на пересекающиеся группы.

Результаты. Разработаны критерии автогруппировки станций и универсальный алгоритм разбиения станций на группы, позволяющий в автоматизированном режиме подготовить минимально необходимые начальные данные для программы, реализующей алгоритм позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности.

Выводы. Моделирование предложенного алгоритма подтвердило его работоспособность. Полученные результаты могут использоваться как существенное дополнение к предложенному ранее алгоритму учета препятствий при расчете расстояний до базовых станций.

Ключевые слова: локальные системы позиционирования, алгоритм группировки станций, RSSI, трилатерация

• Поступила: 22.12.2023 • Доработана: 15.07.2024 • Принята к опубликованию: 20.11.2024

Для цитирования: Крижановский М.Н., Тихонова О.В. Разбиение множества базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):68–75. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-68-75>, <https://elibrary.ru/LSCIAO>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Formation of a database of auxiliary information for positioning in an environment with heterogeneous radio transparency

Mikhail N. Krizhanovsky[@],
Olga V. Tikhonova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: mihakri007@mail.ru

Abstract

Objectives. A pressing problem for indoor positioning systems in the absence of access to global navigation satellite systems is low positioning accuracy. This is usually associated with uneven coverage of the work area due to its geometric features or the presence of massive obstacles and walls within its boundaries. This problem is frequently resolved by placing an excessive number of positioning system base stations in the work area. This approach generates a high cost for such systems, which in turn prevents their deployment. Therefore, research and development aimed at improving the accuracy of indoor positioning systems using a minimum number of stations is of great relevance. The author previously proposed a method of increasing the accuracy of indoor positioning by taking into account obstacles known at the design stage of the system. Consideration of such obstacles in calculating the location is achieved through the mechanism of preliminary splitting of radio beacons into groups, and the allocation of reference stations of these groups among the base stations. The aim of the work is to improve this algorithm by automating the stage of preparing information about the grouping of stations.

Methods. A computer simulation method was used, in order to confirm the operability of the algorithm to divide the stations of the positioning system into overlapping groups.

Results. The criteria for automatic station grouping and a universal algorithm for dividing stations into groups were developed, enabling the automated preparation of the minimum necessary initial data for a program implementing an algorithm for positioning in a zone of heterogeneous radio transparency.

Conclusions. Modeling of the proposed algorithm has confirmed its operability. The results obtained can be used as a significant addition to the previously proposed algorithm for taking into account obstacles when calculating distances to base stations.

Keywords: indoor positioning systems, station grouping algorithm, RSSI, trilateration

• Submitted: 22.12.2023 • Revised: 15.07.2024 • Accepted: 20.11.2024

For citation: Krizhanovsky M.N., Tikhonova O.V. Formation of a database of auxiliary information for positioning in an environment with heterogeneous radio transparency. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):68–75. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-68-75>, <https://elibrary.ru/LSCIAO>

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 позиционирования объектов в замкнутых пространствах стала очень распространенной в связи с набирающей популярность роботизацией различных сфер жизни. Ее решают различными способами, используя разнообразные комбинации комплектующих и алгоритмических решений определения координат. Как правило, такие системы реализуются на базе одного из распространенных интерфейсов беспроводной передачи данных, таких как Wi-Fi [1–3], BLE¹ [4–6], ZigBee [7–9], UWB² [10–14] и других.

В локальном позиционировании проблема повышения точности является наиболее актуальной, подтверждением чему служит тот факт, что именно ей посвящено наибольшее количество публикаций по данной теме. Например, в [15] предлагается увеличение точности за счет приобретения более дорогих компонентов, что часто не является экономически целесообразным для потребителя, а в [16] повышение точности обеспечивается за счет использования сразу двух протоколов (Wi-Fi и BLE) и двух алгоритмов вычисления координат (трилатерация [17] и сопоставление [18]).

Еще одно решение было предложено в работе [19], где рассматривается возможность уменьшения среднего значения погрешности позиционирования за счет учета потерь мощности сигнала при пересечении препятствий, информация о расположении в рабочей зоне которых заранее известна. Предлагается на стадии разработки системы индивидуально подходить к каждому частному случаю рабочей зоны, в которой планируется осуществлять позиционирование каких-либо объектов. Для учета препятствий предлагается заранее, исходя из известных данных о координатах препятствий, все базовые

станции системы, используемые для позиционирования, условно разделить на группы и выделить среди них опорные. Деление на группы проводится по принципу нахождения группы по одну сторону от препятствий. Опорная станция выделяется исходя из непосредственной ее близости к геометрическому центру области, занимаемой конкретной группой станций, ограниченной не обязательно замкнутым контуром препятствий. Позиционируемое устройство, согласно предлагаемому в статье алгоритму, вначале сравнивает уровни сигналов от опорных станций различных групп. После определения наиболее сильного сигнала при расчете дистанций на основании измерения показателя уровня принимаемого сигнала (англ. RSSI – received signal strength indicator) позиционируемое устройство сможет принять решение о том, что все станции, принадлежащие к группе, от опорной станции которой исходит самый сильный сигнал, находятся по одну сторону от препятствий с объектом. Таким образом, расчет расстояния до этих станций осуществляется как до находящихся в прямой видимости.

Дистанция до находящихся в прямой видимости станций по измеренному значению RSSI рассчитывается согласно соотношению:

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \frac{d^n}{d_0^n},$$

где d_0 – калибровочное расстояние, составляющее, как правило, 1 м; $P_r(d_0)$ – величина RSSI, определяемая приемником на калибровочном расстоянии; $P_r(d)$ – величина RSSI, определяемая приемником при измерении; d – измеряемое расстояние; n – коэффициент потери мощности сигнала, составляющий для воздуха от 2 до 4 в зависимости от наличия препятствий

Из этого равенства можно получить ожидаемое значение RSSI на расстоянии d :

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \text{ дБм,}$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\frac{P_r(d_0) - P_r(d)}{10n}} \text{ м.}$$

¹ Bluetooth low energy – технология Bluetooth с низким энергопотреблением. [Bluetooth low energy – Bluetooth technology with low power consumption.]

² Ultra-wide band – беспроводная технология связи на малых расстояниях при низких затратах энергии, использующая в качестве несущей сверхширокополосные сигналы с крайне низкой спектральной плотностью мощности. [Ultra-wide band – a short-range, low-power wireless communication technology that uses ultra-wideband signals with extremely low power spectral density as a carrier.]

Для станций, относящихся к другим группам, дистанцию от объекта необходимо рассчитывать в соответствии с математической моделью Мотли – Кинана [20]. Тогда принимаемая мощность и дистанция до источника сигнала будут вычисляться по следующим формулам:

$$P_r(d) = P_r(d_0) - k_W P_W - 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \text{ дБм,}$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\frac{P_r(d_0) - k_W P_W - P_r(d)}{10n}} \text{ м,}$$

где k_W – количество пройденных одностипных препятствий (стен), P_W – потеря мощности сигнала при прохождении через одностипное препятствие (стену).

Моделирование, проведенное в [19], подтвердило значительное улучшение точности позиционирования методом трилатерации. Стоит отметить, что разбиение на группы и выделение опорных станций проводилось «вручную» по усмотрению разработчика.

Целью данной статьи является усовершенствование предложенного в [19] алгоритма позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности за счет автоматизации процесса разбиения базовых станций на группы, выделения опорных станций и введения дополнительных параметров для реализации этих действий. Также ставится задача разрешить возможные неоднозначности при вынесении решения о прямой видимости со станциями, возникающие при нахождении объекта на границе двух групп станций.

КРИТЕРИИ ГРУППИРОВКИ СТАНЦИЙ

Критерии для вынесения решения об объединении нескольких станций в одну группу должны обеспечивать формирование групп, состоящих из станций, находящихся в области, образующей выпуклый многоугольник, не содержащий внутри себя препятствий, таким образом, чтобы находящийся в области, занимаемой конкретной группой станций, позиционируемый объект имел взаимную прямую видимость со всеми станциями этой группы. Если разбить пространство на непересекающиеся секторы, занимаемые группами, как на рис. 1, то при использовании описанного в [19] способа определения прямой видимости исходя из принадлежности станций к группе, от опорной станции которой принимается сигнал наибольшей амплитуды, возможны случаи некорректного определения прямой видимости при нахождении объекта на границах таких областей.

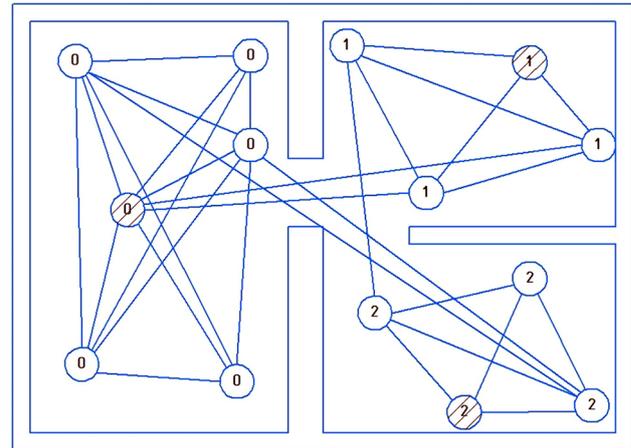


Рис. 1. Пример карты рабочей зоны со станциями, разбитыми на группы: заштрихованные станции являются опорными; станции, соединенные линиями, находятся в прямой видимости

Причиной этого является то, что среди станций, от которых на объект поступают самые сильные сигналы и которые участвуют в расчете координат, могут оказаться станции из группы, относительно которых будет принято некорректное решение об отсутствии прямой видимости. Пример такой ситуации приведен на рис. 2, где позиционируемый объект, находящийся между двумя группами станций, обозначен как ПО.

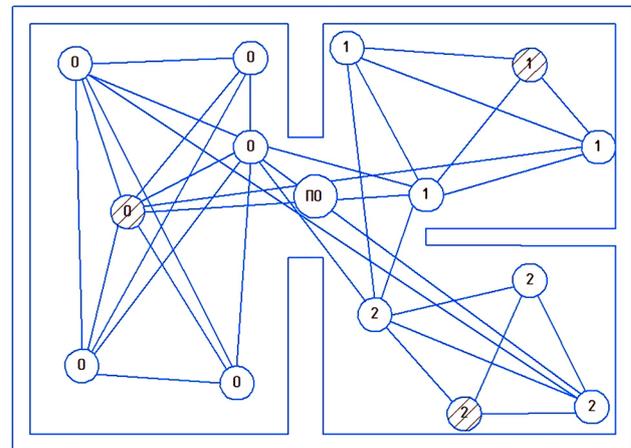


Рис. 2. Пример неоднозначности в определении прямой видимости со станциями

На рис. 2 видно, что ближайшей опорной станцией является станция группы 0, но при этом тремя ближайшими являются станции из трех разных групп.

В такой ситуации дальность от некоторых учитываемых в расчете станций будет рассчитываться неверно, что приведет к существенным ошибкам в позиционировании. Реализация пересекающихся групп позволит устранить эту проблему, т.к. исключит саму возможность пограничного состояния.

Например, в ситуации, представленной на рис. 3, данной ошибки в позиционировании не будет. На схеме появляется дополнительная группа «3» (обозначение «3» отмечено рядом со станциями, входящими в эту группу). Данная группа включает в себя граничные станции из трех других групп, за счет чего и устраняется неоднозначность определения станций, с которыми есть прямая видимость.

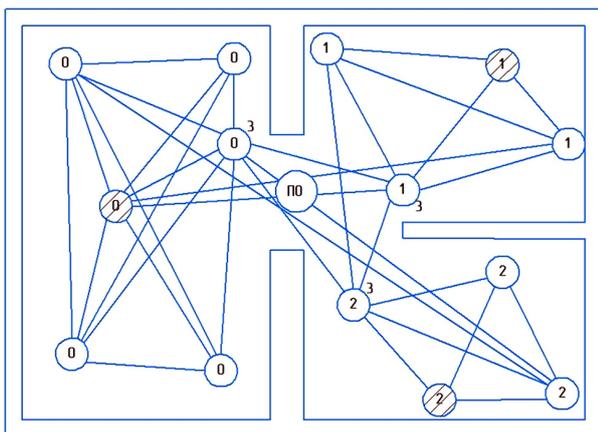


Рис. 3. Пример устранения неоднозначности в определении прямой видимости со станциями

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что соблюдение условия нахождения групп станций внутри областей, не имеющих внутри своих границ препятствий, обеспечивается при взаимной прямой видимости станций. Также, чтобы каждая группа была в состоянии самостоятельно обеспечивать позиционирование объекта, в ней должно быть не менее трех станций (для случая двумерного позиционирования). Две станции, находящиеся в прямой видимости, считаться группой не могут, т.к. по сигналам от двух станций не всегда возможно определить однозначно местоположение объекта.

Что касается создания условий для формирования проектируемым алгоритмом пересекающихся групп, было экспериментально выяснено, что, если заложить в алгоритм ограничение на максимальную дальность друг от друга входящих в группы станций, то при варьировании этого ограничения можно подобрать его оптимальное значение, которое будет соответствовать условиям для автогруппировки станций с созданием пересекающихся групп. Это ограничение обеспечит отсутствие условий для формирования излишне протяженных групп, например, как на рис. 4. Группа 3 в данном случае имеет большую протяженность, что повышает риск неверного определения диапазона станций, находящихся в прямой видимости от объекта позиционирования.

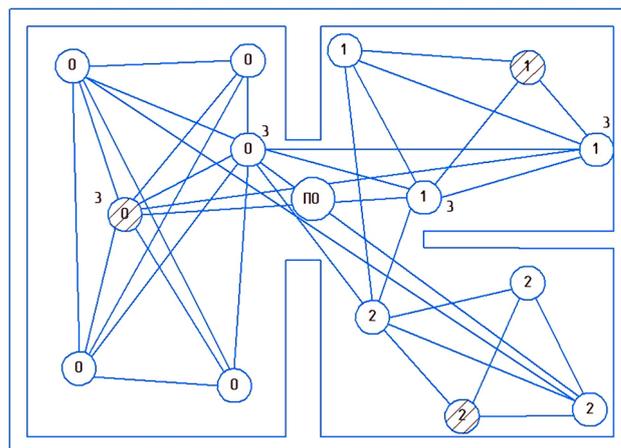


Рис. 4. Пример возможной излишне протяженной группы – группа 3

Таким образом, можно выделить три принципа, которые должны быть заложены в алгоритм автоматической группировки станций:

- 1) взаимная прямая видимость всех станций, входящих в группу;
- 2) группа не может содержать меньше трех станций;
- 3) станции в группе не должны находиться друг от друга на расстоянии, превышающем заданную максимальную дальность.

АЛГОРИТМ АВТОГРУППИРОВКИ СТАНЦИЙ ПО ПРЕДЛОЖЕННЫМ ПРИНЦИПАМ

На базе предложенных принципов был разработан алгоритм автогруппировки базовых станций локальной системы позиционирования на пересекающиеся группы. Разработанный алгоритм формирует набор групп станций, а также выделяет в каждой группе опорную станцию. Отдельно стоит отметить, что данный алгоритм подразумевает наличие картографической информации о расположении препятствий в потенциальной рабочей зоне позиционирования.

Алгоритм автогруппировки станций разбит на следующие этапы:

1. Расчет таблицы наличия и отсутствия прямой видимости между станциями.
2. Формирование двумерного массива, каждая строка которого является списком, ранжированным по дальности от станций с идентификатором, соответствующим номеру столбца, до станции, чей идентификатор соответствует номеру строки двумерного массива.
3. Исключение из каждой строки двумерного массива станций с отсутствующей прямой видимостью относительно станции, чей идентификатор равен номеру строки.

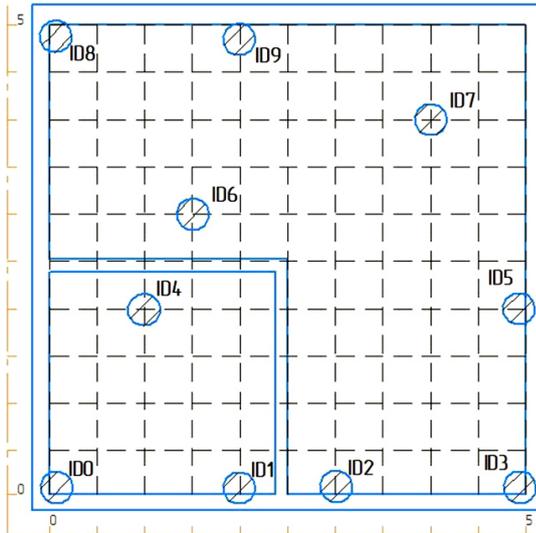
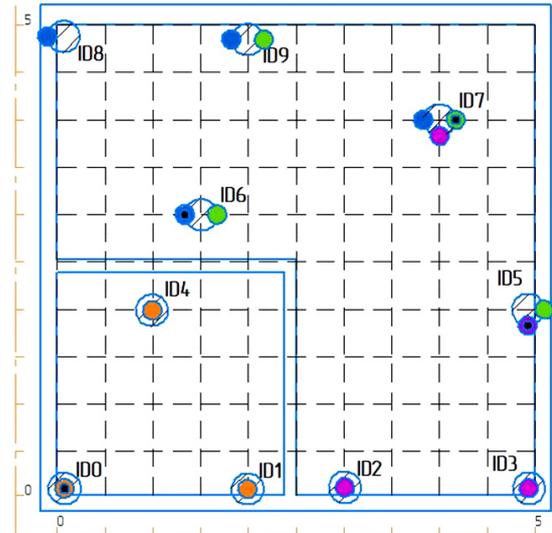


Рис. 5. Карта рабочей зоны для иллюстрации принципов работы программы



● – группа 0; ● – группа 1; ● – группа 2; ● – группа 3;
● – опорная станция

Рис. 6. Карта рабочей зоны с результатами проведенной группировки

4. Исключение из каждой строки двумерного массива станций с дистанцией, превышающей заданное разработчиком ограничение по дальности до станции, чей идентификатор равен номеру строки.
5. Исключение строк, содержащих менее трех станций.
6. Исключение повторяющихся строк.
7. Определение совпадений между строками, удаление строк с наборами станций, имеющимися в составах других строк и формирование групп.

Для иллюстрации работы алгоритма была взята карта помещения $5 \times 5 \text{ м}^2$, имеющего внутри две дополнительные перегородки, отделяющие часть комнаты. Карта с расставленными станциями и отмеченными идентификаторами станций приведена на рис. 5.

В результате работы программы, реализующей предложенный алгоритм, была проведена автоматическая группировка. На рис. 6 приведена карта рабочей зоны с отметками на станциях о принадлежности группе, полученными в результате выполнения алгоритма. Помимо этого, в каждой группе была выделена опорная станция (на рис. 6 такие станции обозначены черной точкой).

Как видно, на рис. 6 исключена возможность неоднозначности определения станций прямой видимости на границе групп 1 и 2 за счет пересечения групп, а также за счет создания промежуточной группы 3.

Таким образом, алгоритм автоматической группировки станций в условиях рабочей зоны

с препятствиями, логически дополняет и совершенствует алгоритм, приведенный в [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложены принципы автогруппировки станций и универсальный алгоритм разбиения станций на группы, позволяющий в автоматизированном режиме подготовить минимально необходимые начальные данные для работы приведенной в статье программы для реализации алгоритма позиционирования в зоне неоднородной радиопрозрачности. В ходе разработки программы автогруппировки путем внедрения метода взаимного перекрытия групп по станциям был дополнен предложенный ранее алгоритм, что позволило решить проблему неоднозначного определения прямой видимости между станциями на границах групп. В дальнейших работах планируется дополнить данный комплекс программных решений интеллектуальным алгоритмом оптимальной расстановки станций системы локального позиционирования в помещениях. Это даст возможность создать полный программный комплекс, позволяющий производить предварительную расстановку и группировку станций в проектируемой системе локального позиционирования.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All the authors have equally contributed to the research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ninh D.B., He J., Trung V.T., Huy D.P. An effective random statistical method for Indoor Positioning System using WiFi fingerprinting. *Future Gener. Comput. Syst.* 2020;109:238–248. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.043>
2. Qin F., Zuo T., Wang X. Ccpas: Wifi fingerprint indoor positioning system based on CDAE-CNN. *Sensors.* 2021;21(4):1114. <https://doi.org/10.3390/s21041114>
3. Bellavista-Parent V., Torres-Sospedra J., Perez-Navarro A. New trends in indoor positioning based on WiFi and machine learning: A systematic review. In: *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. IEEE; 2021. <https://doi.org/10.1109/IPIN51156.2021.9662521>
4. Bai L., Ciravegna F., Bond R., Mulvenna M. A low cost indoor positioning system using bluetooth low energy. *IEEE Access.* 2020;8:136858–136871. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012342>
5. Essa E., Abdullah B.A., Wahba A. Improve performance of indoor positioning system using BLE. In: *2019 14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. IEEE; 2019. P. 234–237. <https://doi.org/10.1109/ICCES48960.2019.9068142>
6. Spachos P., Plataniotis K.N. BLE beacons for indoor positioning at an interactive IoT-based smart museum. *IEEE Syst. J.* 2020;14(3):3483–3493. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2969088>
7. Dong Z.Y., Xu W.M., Zhuang H. Research on ZigBee indoor technology positioning based on RSSI. *Procedia Comput. Sci.* 2019;154:424–429. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.06.060>
8. Ainul R.D. An enhanced trilateration algorithm for indoor RSSI based positioning system using ZigBee protocol. *J. INFOTEL (Informatics, Telecommunication, and Electronics)*. 2022;14(4):301–306. <https://doi.org/10.20895/infotel.v14i4.822>
9. Cheng C.H., Syu S.J. Improving area positioning in ZigBee sensor networks using neural network algorithm. *Microsyst. Technol.* 2021;27(1):1419–1428. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04309-2>
10. Tian D., Xiang Q. Research on indoor positioning system based on UWB technology. In: *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. IEEE; 2020. P. 662–665. <https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141707>
11. Li B., Zhao K., Sandoval E.B. A UWB-based indoor positioning system employing neural networks. *J. Geovis. Spat. Anal.* 2020;4(2):18. <https://doi.org/10.1007/s41651-020-00059-2>
12. Che F., Ahmed Q.Z., Fontaine J., et al. Feature-based generalized Gaussian distribution method for NLoS detection in ultra-wideband (UWB) indoor positioning system. *IEEE Sensors J.* 2022;22(19):18726–18739. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3198680>
13. Lopes S.I., Vieira J.M.N., Reis J., Albuquerque D., Carvalho N.B. Accurate smartphone indoor positioning using a WSN infrastructure and non-invasive audio for TDoA estimation. *Pervasive and Mobile Computing.* 2015;20:29–46. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.09.003>
14. Zourmand A., Sheng N.W., Hing A.L.K., AbdulRehman M. Human Counting and Indoor Positioning System Using WiFi Technology. In: *2018 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*. IEEE; 2018. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2018.8603690>
15. Zhao M., Chang T., Arun A., Ayyalasomayajula R., Zhang C., Bharadia D. ULoc: Low-Power, Scalable and cm-Accurate UWB-Tag Localization and Tracking for Indoor Applications. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies.* 2021;5(3):1–31. <https://doi.org/10.1145/3478124>
16. Renault S., Akbar Sheikh-Akbari, Ofoegbu E. Low Cost and Energy Efficient Hybrid Wireless Positioning System Using Wi-Fi and Bluetooth Technologies for Wearable Devices. *Preprints.* 2023. 2023092061. <http://doi.org/10.20944/preprints202309.2061.v1>
17. Астафьев А.В., Титов Д.В., Жизняков А.Л., Демидов А.А. Метод позиционирования мобильного устройства с использованием сенсорной сети BLE-маяков, аппроксимации значений уровней сигналов RSSI и искусственных нейронных сетей. *Компьютерная оптика.* 2021;45(2):277–285. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-826>
[Astafiev A.V., Titov D.V., Zhiznyakov A.L., Demidov A.A. A method for mobile device positioning using a sensor network of BLE beacons, approximation of the RSSI value and artificial neural networks. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics.* 2021;45(2):277–285 (in Russ.). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-826>]
18. Subedi S., Pyun J.-Y. Practical fingerprinting localization for indoor positioning system by using beacons. *J. Sensors.* 2017;2017:9742170. <https://doi.org/10.1155/2017/9742170>
19. Крижановский М.Н. Моделирование алгоритма учета препятствий при расчете локации в системах ближнего позиционирования. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.* 2023;192(1):14–20. <https://www.elibrary.ru/evdpoc>, URL: <https://jurnal.vniiem.ru/text/192/14-20.pdf>
[Krizhanovskiy M. Modeling of the algorithm for taking into account obstacles in the calculation of location in short-range positioning systems. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ = Electromechanical Matters. VNIIEМ Studies.* 2023;192(1):14–20 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/evdpoc>, URL: <https://jurnal.vniiem.ru/text/192/14-20.pdf>]
20. Obeidat H.A., Khan R., Obeidat O.A., et al. An indoor path loss prediction model using wall correction factors for WLAN and 5G indoor networks. *Radio Science J.* 2018;53(4):544–564. <https://doi.org/10.1002/2018RS006536>

Об авторах

Крижановский Михаил Николаевич, ассистент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: krizhanovskij@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3063-6513, <https://orcid.org/0009-0009-2710-0128>

Тихонова Ольга Вадимовна, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, SPIN-код РИНЦ 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>

About the authors

Mikhail N. Krizhanovsky, Assistant, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: krizhanovskij@mirea.ru. RSCI SPIN-code 3063-6513, <https://orcid.org/0009-0009-2710-0128>

Olga V. Tikhonova, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, RSCI SPIN-code 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391.072

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-76-88>

EDN OQHKMM



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оптимизация созвездий сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в каналах связи с нефлуктуационными помехами

Г.В. Куликов^{1, ©}, Данг Суан Ханг¹, А.А. Лелюх²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² АО «Московский научно-исследовательский институт радиосвязи», Москва, 109029 Россия

© Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Резюме

Цели. Многопозиционная амплитудно-фазовая манипуляция (АФМ) с кольцевой формой сигнальных созвездий является одним из наиболее эффективных способов передачи дискретной информации в спутниковых системах. Применение АФМ регламентируется несколькими стандартами, основными из которых являются DVB-S2 и VSAT. Они определяют параметры модуляции, а также параметры сигнальных созвездий. Цель статьи – определение наилучших созвездий 16-АФМ и 32-АФМ, обеспечивающих минимум вероятности битовой ошибки для случаев, когда в канале связи наряду с шумовой присутствуют помехи нефлуктуационного вида.

Методы. Используются методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерного моделирования.

Результаты. Рассмотрены способы и проведена оптимизация созвездий кольцевой формы сигналов 16-АФМ и 32-АФМ изменением распределения точек по радиусу и фазе для случая, когда в канале связи наряду с шумовой присутствуют помехи нефлуктуационного вида: частотно-манипулированная, ретранслированная, фазоманипулированная, гармоническая. Определены наилучшие созвездия 16-АФМ и 32-АФМ, обеспечивающие минимум вероятности битовой ошибки.

Выводы. Для улучшения качества связи в системах передачи информации при наличии нефлуктуационных помех можно использовать существующие созвездия 16-АФМ (4, 12) и 32-АФМ (4, 12, 16) с изменением соотношений между радиусами окружностей 2.5 для 16-АФМ и 2.5/3.9 для 32-АФМ. За счет более эффективного использования мощности сигнала применение созвездий с точкой с нулевой амплитудой для 16-АФМ позволяет добиться увеличения помехоустойчивости приема. Например, в случае применения созвездия (1, 5, 10) энергетический выигрыш по сравнению со стандартным созвездием (4, 12) может достигать 1 дБ.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая манипуляция, сигнальное созвездие, нефлуктуационные помехи, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 25.12.2023 • Доработана: 11.07.2024 • Принята к опубликованию: 11.11.2024

Для цитирования: Куликов Г.В., Данг С.Х., Лелюх А.А. Оптимизация созвездий сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в каналах связи с нефлуктуационными помехами. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):76–88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-76-88>, <https://elibrary.ru/OQHKMM>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Optimization of signal constellations with amplitude-phase shift keying in communication channels with non-fluctuating interference

Gennady V. Kulikov ^{1, @}, Dang Xuan Khang ¹, Andrey A. Lelyukh ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Moscow Scientific Research Institute of Radio Communications, Moscow, 109029 Russia

@ Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

Abstract

Objectives. Multi-position amplitude-phase shift keying (APSK) with a ring-shaped signal constellation is one of the most effective ways for transmitting discrete information in satellite systems. The use of APSK is regulated by several standards. The main are DVB-S2 and VSAT which define both the modulation parameters, and the parameters of the signal constellations. The aim of the paper is to determine the best constellations of 16-APSK and 32-APSK, and provide a minimum BER for cases when the communication channel, along with noise, contains non-fluctuating interference.

Methods. Methods of statistical radio engineering, the theory of optimal signal reception, and computer modeling were used.

Results. The optimization of ring-shaped constellations of 16-APSK and 32-APSK signals is attained by changing the distribution of points along the radius and phase for a case in which the communication channel, along with noise, contains non-fluctuating interference: frequency-shift keyed, retransmitted, phase-shift keyed, and harmonic ones. The best constellations of 16-APSK and 32-APSK are determined, and a minimum bit error rate is provided.

Conclusions. In order to improve the quality of communication in information transmission systems in the presence of non-fluctuating interference, the existing constellations 16-APSK (4, 12) and 32-APSK (4, 12, 16) can be used by changing the ratios between the radii of circles 2.5 for 16-APSK and 2.5/3.9 for 32-APSK. Due to the more efficient use of signal power, the use of constellations with a zero-amplitude point for 16-APSK allows reception noise immunity to be increased. For example, when using constellation (1, 5, 10), the energy gain compared to the standard constellation (4, 12) can reach 1 dB.

Keywords: amplitude-phase shift keying, signal constellation, non-fluctuation interference, noise immunity, bit error rate

• Submitted: 25.12.2023 • Revised: 11.07.2024 • Accepted: 11.11.2024

For citation: Kulikov G.V., Dang X.Kh., Lelyukh A.A. Optimization of signal constellations with amplitude-phase shift keying in communication channels with non-fluctuating interference. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):76–88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-76-88>, <https://elibrary.ru/OQHKKMM>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Многопозиционная амплитудно-фазовая манипуляция (АФМ) является одним из наиболее эффективных способов передачи данных в спутниковых системах, где доступ к каналу связи ограничен и дорог [1–3]. Она позволяет повысить пропускную способность радиоканала по сравнению с бинарными видами манипуляции и обеспечивает хорошую помехоустойчивость, а, следовательно, высокую эффективность использования частотного ресурса.

Существует несколько стандартов, использующих модуляцию АФМ для спутниковой связи, включая DVB-S2¹ (Digital Video Broadcasting – Satellite Second Generation: второе поколение цифрового спутникового телевидения) [3, 4] и VSAT (Very Small Aperture Terminal: терминал с очень малой апертурой) [3, 5]. Эти стандарты определяют параметры модуляции, такие как вид сигнальных созвездий, отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR), скорость передачи данных и т.д.

С учетом растущих потребностей в высокоскоростной передаче данных и повышенной помехозащищенности систем связи оптимизация форматов созвездий сигналов АФМ является важной задачей, т.к. такой оптимальный формат позволяет увеличить эффективность использования радиочастотного спектра и повысить качество передачи данных, что особенно важно в спутниковой связи и в системах связи, работающих на больших расстояниях.

Исследованию помехоустойчивости систем связи с АФМ посвящено много работ, где рассмотрены вопросы приема сигналов на фоне различных помех [6–11] и в каналах с нелинейностью [12–15].

В настоящей статье рассмотрены способы оптимизации созвездий кольцевой формы сигналов 16-АФМ и 32-АФМ изменением распределения точек по радиусу и фазе для случая, когда в канале связи наряду с шумовой присутствуют и помехи нефлуктуационного вида. Цель статьи – определение наилучших созвездий 16-АФМ и 32-АФМ, обеспечивающих минимум вероятности битовой ошибки.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Модель сигнала АФМ имеет вид:

$$s_i(t) = A r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i), t \in (0, T_s], i = \overline{0, M-1}, (1)$$

где $A = \sqrt{2E_s / T_s}$ – средняя амплитуда сигнала; $E_s = E_b \log_2 M$ – средняя энергия канального символа; E_b – средняя энергия, приходящаяся на 1 бит информации; ω_0 – несущая частота; r_i и φ_i – величины,

которые определяют амплитуду и фазу сигнальной посылки; T_s – длительность канального символа; M – позиционность сигнала, t – время.

Оптимизация формата созвездий осуществляется с помощью оценки вероятности ошибочного приема сигналов, а именно поиском минимума функции, описывающей зависимость вероятности битовой ошибки P_{cb} от параметров созвездия. Необходимая для этого методика расчета вероятности битовой ошибки приведена в [16], а расчеты статистических характеристик распределений случайных процессов в решающем устройстве оптимального приемника, таких как математические ожидания m_{mi} и дисперсии D_{mi} при различных комбинациях символов в присутствии разных типов нефлуктуационных помех и шумовой помехи со спектральной плотностью мощности N_0 , подробно изложены в [16–19]. Эти характеристики зависят от многих параметров сигналов и помех. В частности:

- в условиях воздействия фазоманипулированной помехи [17]:

$$s_{\text{int}}(t) = \mu A a_j \cos[(\omega_0 t + \Delta\omega_{\text{int}})t + \varphi_{\text{int}}], \\ t \in ((j-1)T_{\text{int}}, jT_{\text{int}}], j = \overline{1, N_{\text{int}}},$$

где μ – относительная (по амплитуде) интенсивность помехи, $a_j = \pm 1$ – случайный символ помехи, φ_{int} – ее случайная начальная фаза, N_{int} – относительная канальная скорость помехи, $T_{\text{int}} = T_s / N_{\text{int}}$, $\Delta\omega_{\text{int}}$ – расстройка помехи,

$$m_{mi} = \frac{E_s}{N_0} \left\{ 2r_m [r_m - r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)] + \frac{\mu}{N_{\text{int}}} \times \right. \\ \times 2S(y) [r_m \sum_{j=0}^{N_{\text{int}}-1} a_j \cos(y(2j+1) + \varphi_{\text{int}} - \varphi_m)] - \\ \left. - r_i \sum_{j=0}^{N_{\text{int}}-1} a_j \cos(y(2j+1) + \varphi_{\text{int}} - \varphi_i) \right\}, (2) \\ y = \frac{\Delta\omega_{\text{int}} T_s}{N_{\text{int}}}, S(y) = \frac{\sin y}{y};$$

- в условиях воздействия частотно-манипулированной помехи [18]:

$$s_{\text{int}}(t) = \mu A \cos[(\omega_0 + a_j \Delta\omega_d + \Delta\omega_{\text{int}})t + \varphi_{\text{int}}], \\ t \in ((j-1)T_{\text{int}}, jT_{\text{int}}], j = \overline{1, N_{\text{int}}},$$

где $\Delta\omega_d$ – девиация помехи,

$$m_{mi} = \frac{E_s}{N_0} (r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)) + \frac{2E_s}{N_0} \times \\ \times \frac{\mu}{N_{\text{int}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{int}}} \frac{\sin y}{y} [r_m \cos(x(2j-1) + \varphi_{\text{int}} - \varphi_m)] - \\ - r_i \cos(x(2j-1) + \varphi_{\text{int}} - \varphi_i)], \\ y = \frac{(a_j \Delta\omega_d + \Delta\omega_{\text{int}}) T_s}{2N_{\text{int}}}; (3)$$

¹ DVB. <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>. Дата обращения 11.11.2023. / Accessed November 11, 2023.

- в условиях воздействия ретранслированной помехи [19]:

$$s_{\text{int}}(t) = \begin{cases} \mu A r_{\tau} \cos(\omega_0(t - \tau) + \varphi_{\tau} + \varphi_{\text{int}}), & 0 < t \leq \tau, \\ \mu A r_i \cos(\omega_0(t - \tau) + \varphi_i + \varphi_{\text{int}}), & \tau < t \leq T_s, \end{cases}$$

где τ – задержка помехи,

$$m_{mi} = \frac{E_s}{N_0} [(r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)) + \frac{2E_s}{N_0} \mu r_{\tau} \times \\ \times \frac{\tau}{T_s} [r_m \cos(\varphi_{\text{int}} + \varphi_{\delta} - \varphi_m) - r_i \cos(\varphi_{\text{int}} + \varphi_{\tau} - \varphi_i)] + \\ + \frac{2E_s}{N_0} \mu r_m \cdot \left(1 - \frac{\tau}{T_s}\right) [r_m \cos \varphi_{\text{int}} - r_i \cos(\varphi_{\text{int}} + \varphi_{\tau} - \varphi_i)]; \quad (4)$$

- в условиях воздействия гармонической помехи [16]:

$$s_{\text{int}}(t) = \mu A \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_{\text{int}})t + \varphi_{\text{int}}],$$

$$m_{mi} = \frac{E_s}{N_0} [0.5(r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)) + \\ + \mu \frac{\sin(\Delta\omega_{\text{int}} T_s / 2)}{\Delta\omega_{\text{int}} T_s / 2} (\cos \eta (r_m \cos \varphi_m - r_i \cos \varphi_i) - \\ - \sin \eta (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i))], \quad (5)$$

$$\eta = \Delta\omega_{\text{int}} T_s / 2 + \varphi_{\text{int}}.$$

Для всех типов помех дисперсии анализируемых случайных процессов определяются по формуле:

$$D_{mi} = \frac{2E_s}{N_0} [r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)]. \quad (6)$$

В проведенных расчетах для примера приняты следующие параметры: отношение сигнал/шум $E_b/N_0 = 13$ дБ, относительная (по амплитуде) интенсивность помех $0.1 \leq \mu \leq 0.3$, расстройка помех $\Delta\omega_{\text{int}} = 0$, фазоманипулированная и частотно-манипулированная помехи имеют относительную канальную скорость $N_{\text{int}} = 2$, для частотно-манипулированной помехи приведенная девиация $\Delta\omega_d T_s = 6$, относительная задержка ретранслированной помехи $\tau/T_s = 0.5$.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМАТА СОЗВЕЗДИЯ ДЛЯ 16-АФМ

Сигнальное созвездие 16-АФМ (4, 12). Сигнальное созвездие 16-АФМ (4, 12) имеет два уровня амплитуд посылок (рис. 1): $A_1 = r_1 A$ и $A_2 = r_2 A$, соотношение между которыми выражается через коэффициент k : $A_1 = k A_2$ и, соответственно, два энергетических уровня E_1 и E_2 . Учитывая, что символы созвездия при передаче информации в среднем имеют одинаковую частоту появления, среднюю энергию символа можно определить усреднением по сигнальному созвездию:

$$E_s = \frac{A^2}{2} T_s = \frac{1}{16} (4E_1 + 12E_2) = \\ = \frac{1}{16} \cdot \frac{A_1^2}{2} T_s (4 + 12k^2) = \frac{1}{8} A_1^2 T_s (1 + 3k^2).$$

Следовательно,

$$A_1 = \frac{2}{\sqrt{1 + 3k^2}} A, \quad A_2 = \frac{2k}{\sqrt{1 + 3k^2}} A. \quad (7)$$

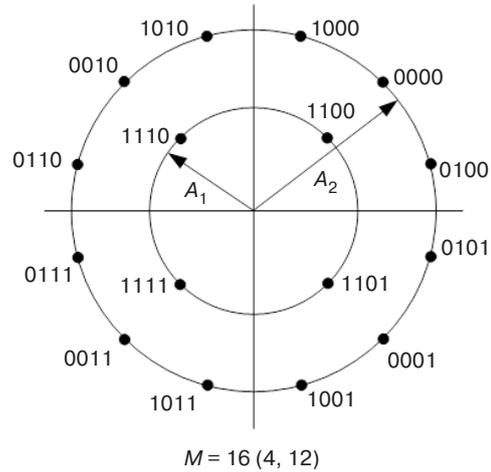


Рис. 1. Сигнальное созвездие 16-АФМ (4, 12)

Подставляя (7) в (2)–(6) с учетом (1) и методики [16], можно получить зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k (рис. 2).

Из представленных графиков видно, что минимум вероятности битовой ошибки для формата созвездия (4, 12) при наличии только шумовой помехи наблюдается при значении $k = 2.5$ и смещается в большую сторону по k при наличии в радиоканале нефлуктуационных помех с большой интенсивностью.

Традиционные созвездия 16-АФМ, такие как (4, 12) в системах DVB-S2 и VSAT или (8, 8) в некоторых других системах, имеют неравномерное распределение энергии между точками разных уровней. Использование точки с нулевой амплитудой в центре созвездия может уменьшить эту разницу в энергии. Чем более равномерное распределение энергии по точкам, тем более эффективно можно использовать полосу частот. В этом случае сокращается количество передаваемых точек в созвездии, но не снижается количество символов, т.е. скорость передачи информации.

Сигнальные созвездия 16-АФМ (1, 4, 11) и (1, 5, 10). Рассмотрим два вида формата созвездия для 16-АФМ: (1, 4, 11) и (1, 5, 10). В конфигурации (1, 4, 11) имеется 1 точка с нулевой амплитудой $A_1 = 0$ в центре созвездия, в первом (малом) круге – 4 точки с амплитудой A_2 и 11 точек с амплитудой

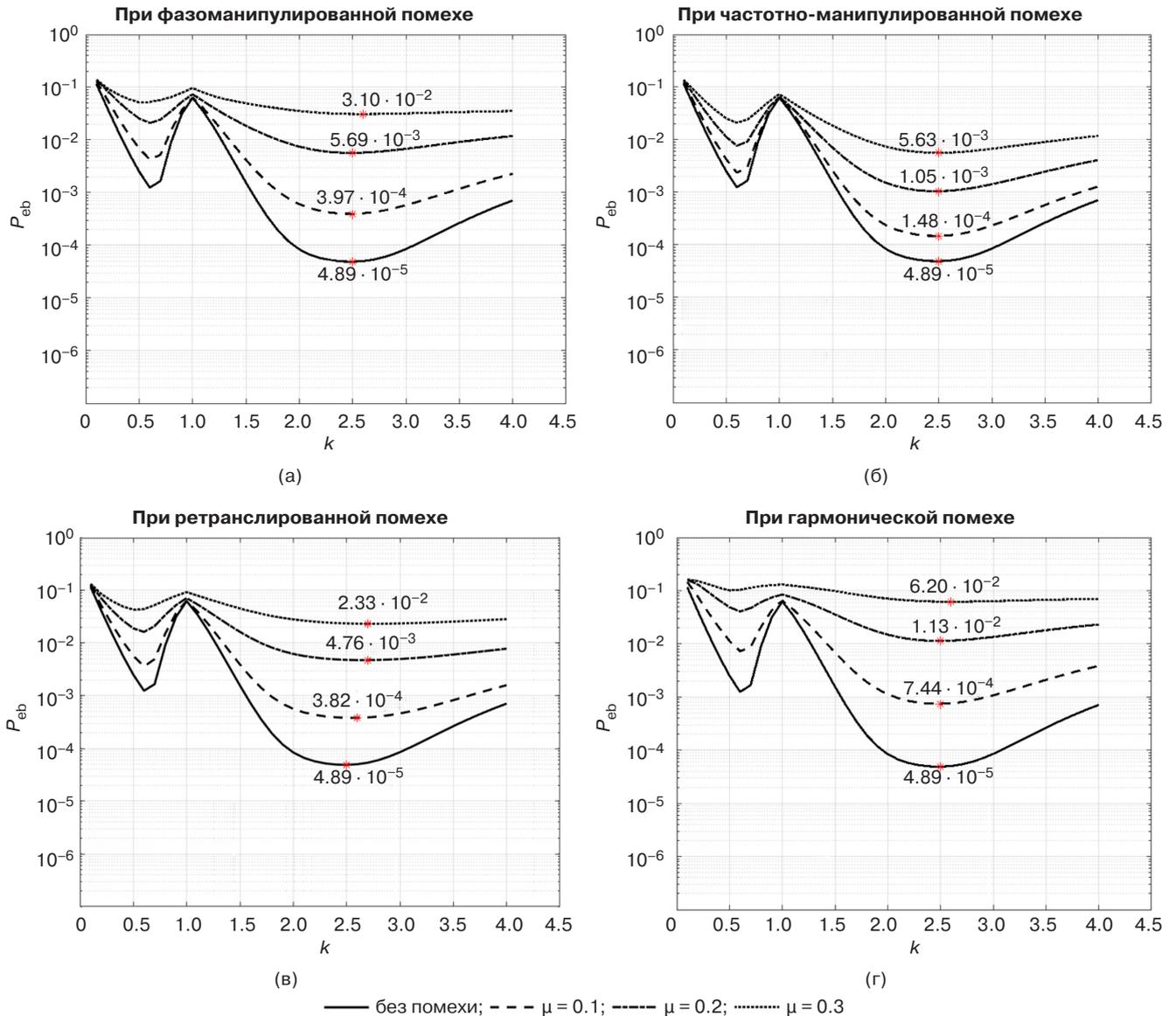


Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k для формата созвездия 16-АФМ (4, 12) при разных типах помех

$A_3 = kA_2$ в большом круге (рис. 3а). Аналогично (7) определим соотношения для A_2 и A_3 :

$$E_s = \frac{A^2}{2} T_s = \frac{1}{16} (E_1 + 4E_2 + 11E_3) =$$

$$= 0 + \frac{1}{16} \cdot \frac{A_2^2}{2} T_s (4 + 11k^2) = \frac{A_2^2}{32} T_s (4 + 11k^2).$$

Следовательно,

$$A_1 = 0, A_2 = \frac{4A}{\sqrt{4 + 11k^2}}, A_3 = \frac{4kA}{\sqrt{4 + 11k^2}}.$$

Для конфигурации (1, 5, 10) (рис. 3б) соответственно получим:

$$E_s = \frac{A^2}{2} T_s = \frac{1}{16} (E_1 + 5E_2 + 10E_3) =$$

$$= 0 + \frac{1}{16} \cdot \frac{A_2^2}{2} T_s (5 + 10k^2) = \frac{A_2^2}{32} T_s (5 + 10k^2),$$

$$A_1 = 0, A_2 = \frac{4A}{\sqrt{5 + 10k^2}}, A_3 = \frac{4kA}{\sqrt{5 + 10k^2}}.$$

Зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k при приеме сигналов 16-АФМ при применении формата созвездия (1, 4, 11) для разных типов помех показаны на рис. 4.

На рис. 5 показаны аналогичные результаты для формата 16-АФМ (1, 5, 10).

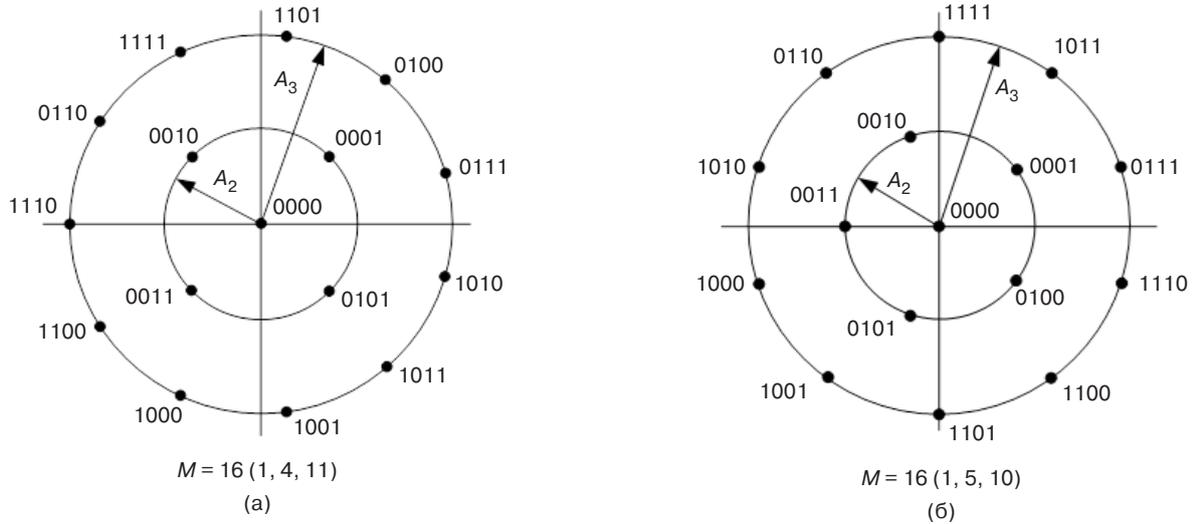


Рис. 3. Сигнальные созвездия сигналов 16-АФМ (1, 4, 11) и (1, 5, 10)

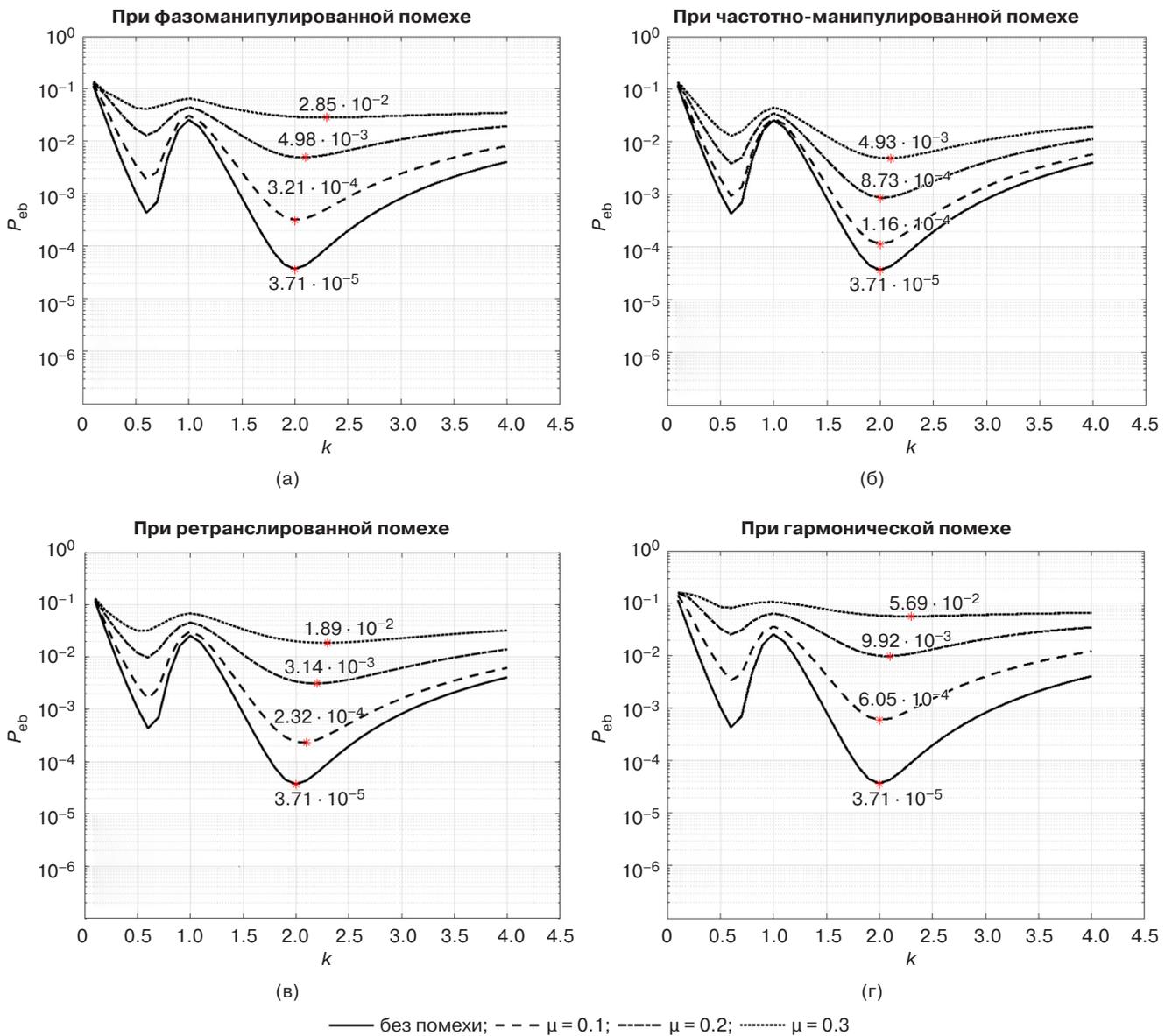


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k для формата созвездия 16-АФМ (1, 4, 11) при разных типах помех

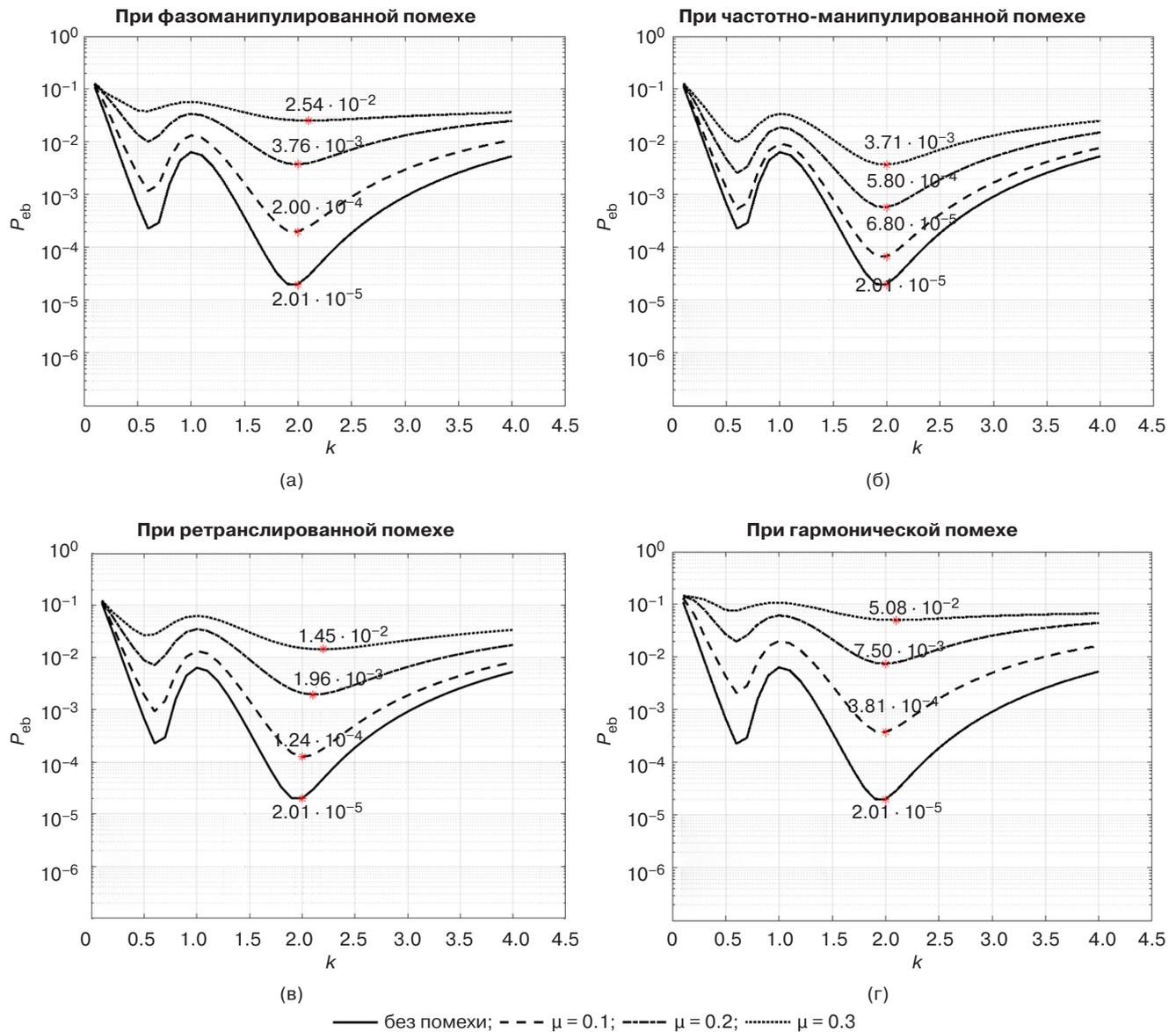


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k для формата созвездия 16-АФМ (1, 5, 10) при разных типах помех

Из приведенных графиков видно, что использование форматов 16-АФМ (1, 4, 11) и (1, 5, 10) дает при оптимальном значении коэффициента k некоторое повышение помехоустойчивости по сравнению с форматом (4, 12). Кроме того, заметно, что при увеличении относительной интенсивности помех μ оптимальное значение k смещается в большую сторону.

Для сравнения в табл. 1 для разных форматов приведены оптимальные значения коэффициентов k , при которых вероятность битовой ошибки минимальна.

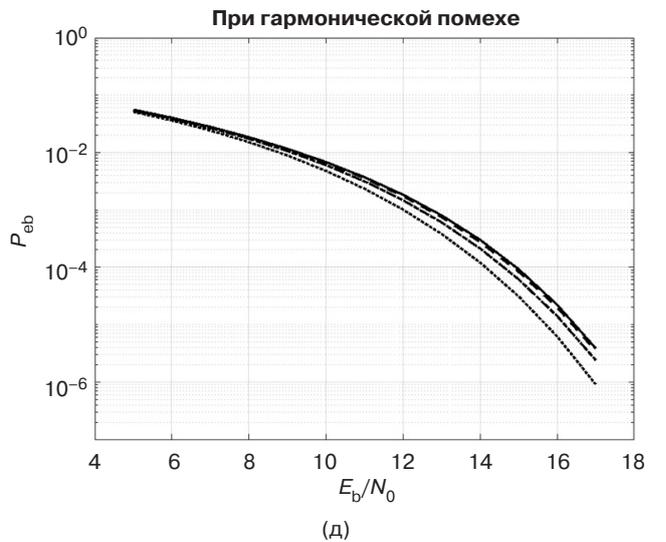
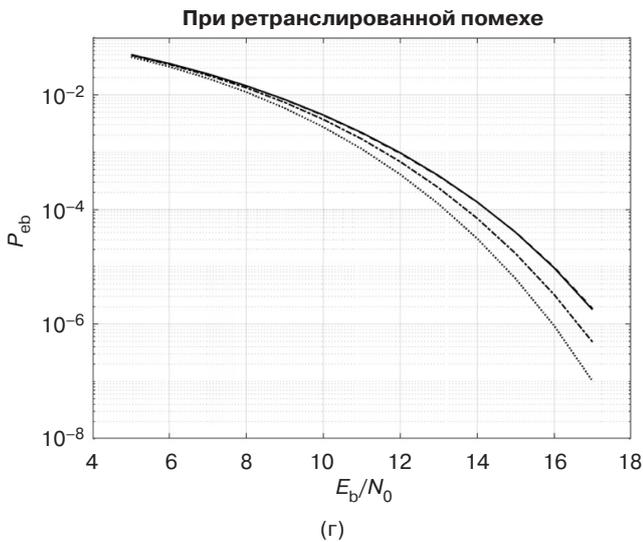
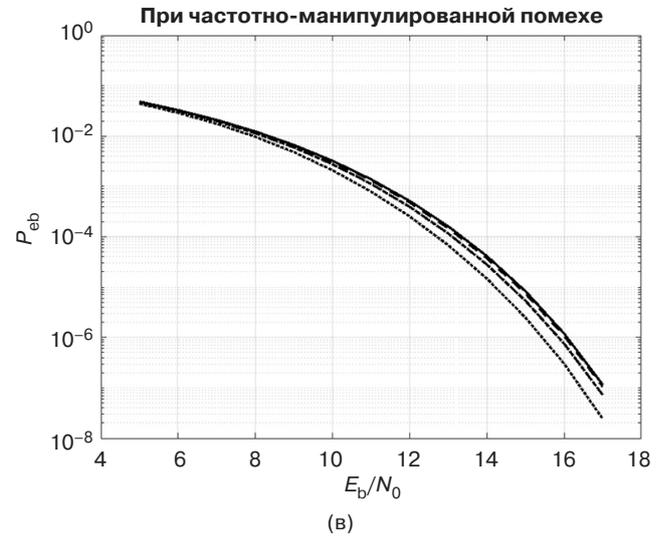
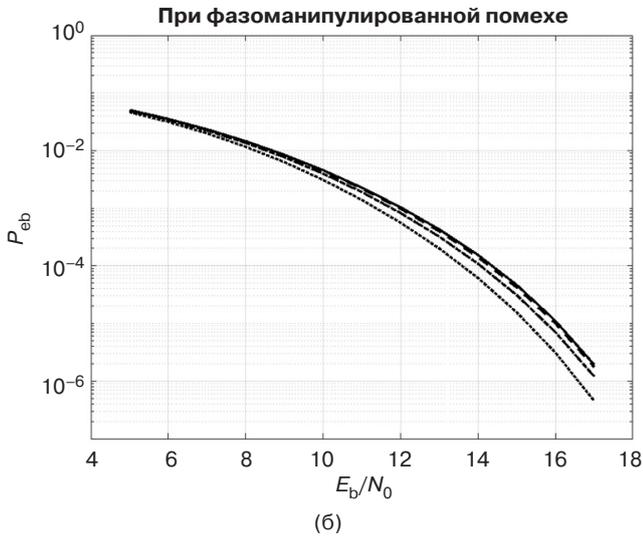
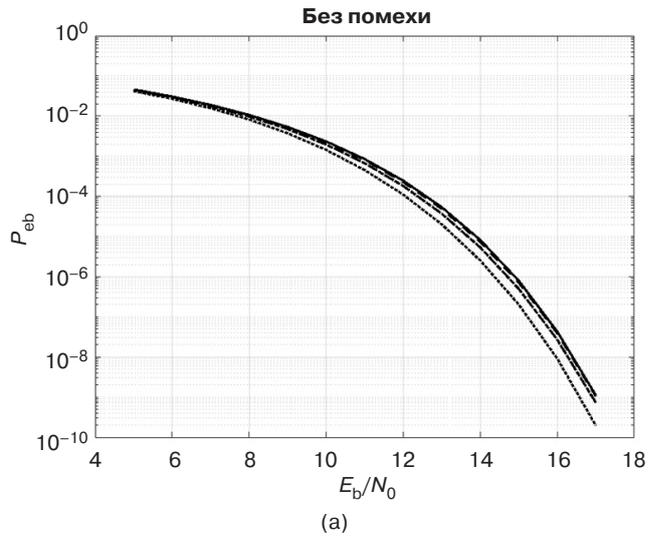
На рис. 6 показаны результаты расчета помехоустойчивости приема сигналов 16-АФМ с форматами (1, 4, 11) и (1, 5, 10), а также оптимизированного

созвездия (4, 12) (при $A_2 = 2.5A_1$) в сравнении со стандартным вариантом (4, 12) (при $A_2 = 2.7A_1$), используемым в стандарте DVB-S2, при приеме на фоне разных типов помех с относительной интенсивностью $\mu = 0.1$. Средние энергии для всех форматов приняты одинаковыми.

Видно преимущество формата (1, 5, 10) перед другим видами созвездий, причем энергетический выигрыш в этом случае достигает 1 дБ. В случае использования формата (1, 4, 11) тоже наблюдается некоторое увеличение помехоустойчивости по сравнению с оптимальным созвездием (4, 12), но оно невелико.

Таблица 1. Оптимальные значения коэффициентов k

Формат	$M = 16$					
	μ	0	0.1	0.2	0.3	
1, 4, 11	k	Частотно-манипулированная	2	2	2	2.1
		Ретранслированная	2	2	2.1	2.2
		Фазоманипулированная	2	2	2.1	2.3
		Гармоническая	2	2	2.1	2.3
1, 5, 10	k	Частотно-манипулированная	2	2	2	2
		Ретранслированная	2	2	2	2.1
		Фазоманипулированная	2	2	2	2.1
		Гармоническая	2	2	2	2.1
4, 12	k	Частотно-манипулированная	2.5	2.5	2.5	2.5
		Ретранслированная	2.5	2.6	2.7	2.9
		Фазоманипулированная	2.5	2.5	2.5	2.6
		Гармоническая	2.5	2.5	2.5	2.6



----- $M16 = 1, 4, 11; A_2 = 2A_1$; $M16 = 1, 5, 10; A_2 = 2A_1$; - - - $M16 = 4, 12; A_2 = 2.5A_1$; — $M16 = 4, 12; A_2 = 2.7A_1$

Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для разных форматов созвездий при разных типах помех

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМАТА СОЗВЕЗДИЯ ДЛЯ 32-АФМ

Сигнальное созвездие 32-АФМ (4, 12, 16) (рис. 7) имеет 3 окружности с отношением амплитуд $A_2 = k_2 A_1$ и $A_3 = k_3 A_1$ и, соответственно, 3 энергетических уровня E_1, E_2 и E_3 . Расчет соотношений амплитуд может быть выполнен аналогично случаю $M = 16$. Средняя энергия символа:

$$E_s = \frac{A^2}{2} T_s = \frac{1}{32} (4E_1 + 12E_2 + 16E_3) = \frac{A_1^2}{16} T_s (1 + 3k_2^2 + 4k_3^2).$$

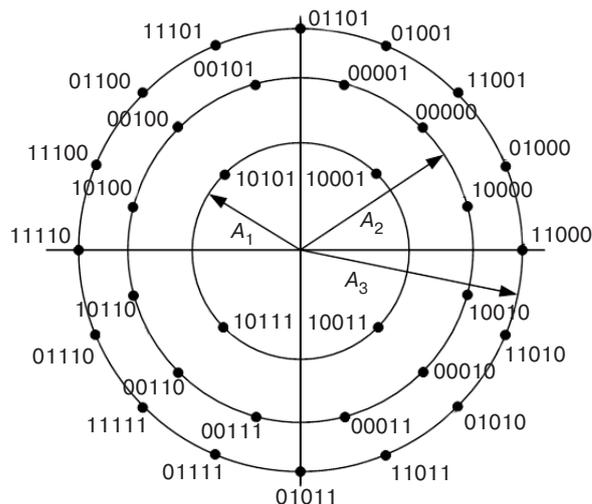
Следовательно,

$$A_1 = \frac{2\sqrt{2}A}{\sqrt{1 + 3k_2^2 + 4k_3^2}}, \quad A_2 = \frac{2\sqrt{2}k_2 A}{\sqrt{1 + 3k_2^2 + 4k_3^2}},$$

$$A_3 = \frac{2\sqrt{2}k_3 A}{\sqrt{1 + 3k_2^2 + 4k_3^2}}.$$

Зависимость вероятности битовой ошибки от коэффициентов k_2 и k_3 имеет вид поверхности в трехмерной системе координат, ее пример при отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 13$ дБ и отсутствии помех представлен на рис. 8. При этом минимальное значение P_{eb} достигается для $k_2 = 2.5$ и $k_3 = 3.9$.

В табл. 2 приведены оптимальные значения коэффициентов k_2 и k_3 , при которых вероятность битовой ошибки минимальна при наличии разных типов помех.



$M = 32 (4, 12, 16)$

Рис. 7. Сигнальное созвездие 32-АФМ (4, 12, 16)

Из табл. 2 видно, что с увеличением интенсивности помех оптимальные значения этих коэффициентов возрастают, и, если при наличии только шумовой помехи ($\mu = 0$) оптимальные соотношения: $A_2 = 2.5A_1$ и $A_3 = 3.9A_1$, то при $\mu = 0.3$ можно рекомендовать средние соотношения: $A_2 = 2.65A_1$ и $A_3 = 5.2A_1$.

На рис. 9 показаны результаты расчета помехоустойчивости для формата 32-АФМ ($A_2 = 2.5A_1$ и $A_3 = 3.9A_1$) в сравнении с форматом, применяемым в стандарте DVB-S2 ($A_2 = 2.64A_1$ и $A_3 = 4.64A_1$), при воздействии разных типов помех. Средние энергии для обоих форматов приняты одинаковыми. Видно, что вероятность ошибки во всех случаях несколько снизилась, и энергетический выигрыш при $10^{-5} \leq P_{eb} \leq 10^{-4}$ составляет около 1 дБ.

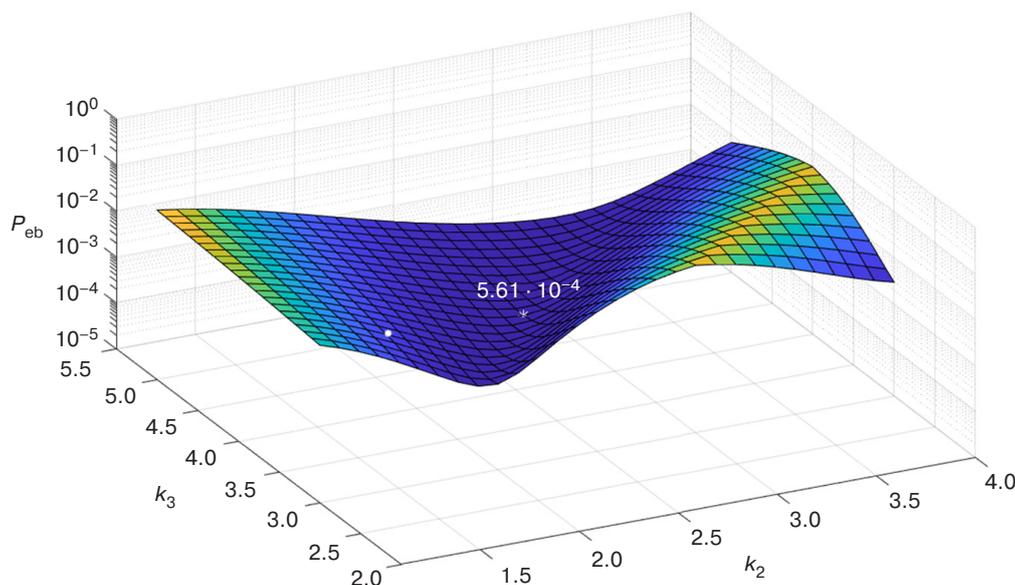
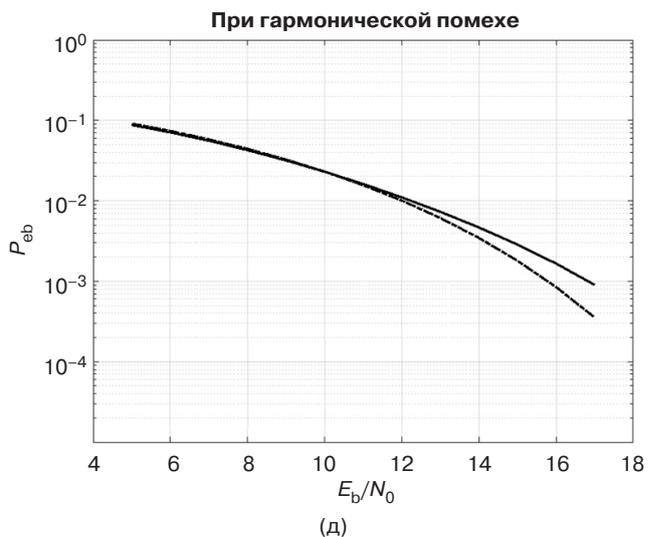
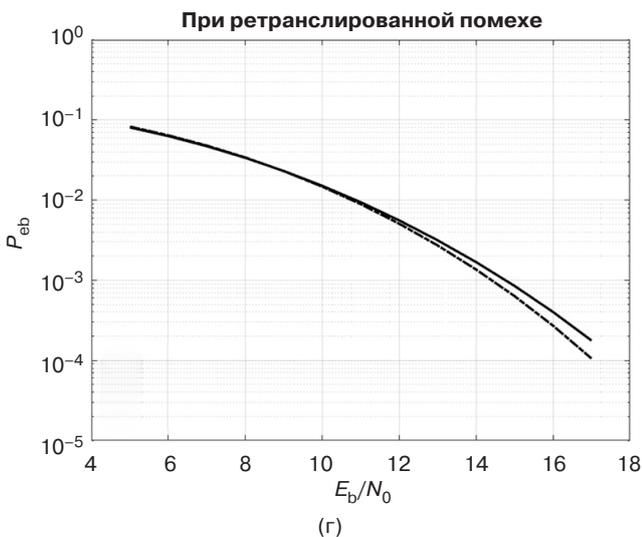
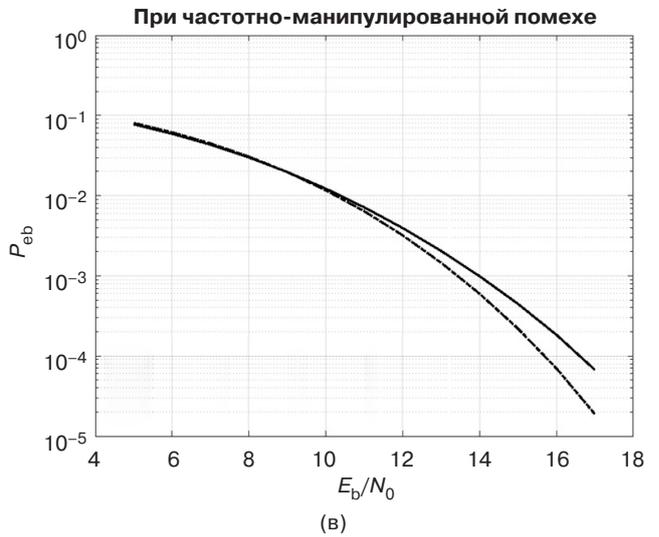
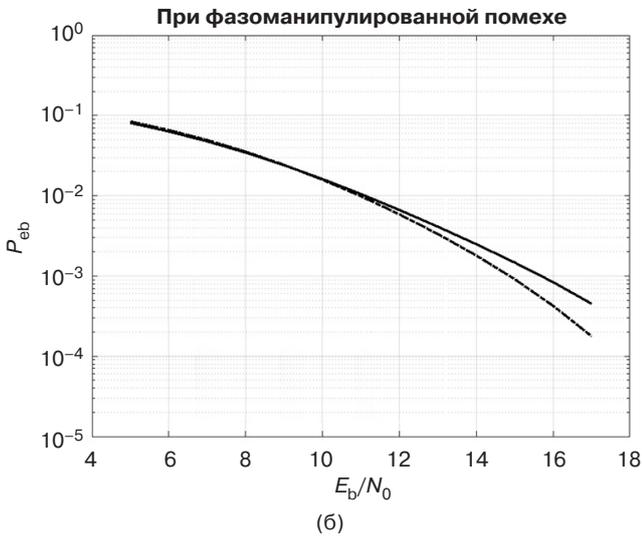
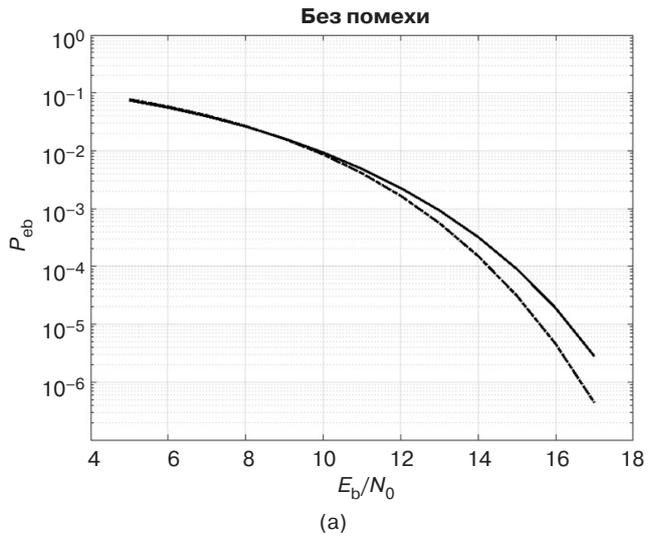


Рис. 8. Зависимость вероятности битовой ошибки от коэффициентов k_2 и k_3

Таблица 2. Оптимальные значения коэффициентов k_2 и k_3

Формат	$M = 32$					
	μ	0	0.1	0.2	0.3	
4, 12, 16	k_2/k_3	Частотно-манипулированная	2.5/3.9	2.5/3.9	2.5/4.0	2.6/4.4
		Ретранслированная	2.5/3.9	2.5/3.9	2.6/4.5	2.6/4.8
		Фазоманипулированная	2.5/3.9	2.5/3.9	2.6/4.4	2.5/6.0
		Гармоническая	2.5/3.9	2.5/4.0	2.6/4.4	3/6.0



----- M32; $A_2 = 2.5A_1$; $A_3 = 3.9A_1$; — M32; $A_2 = 2.64A_1$; $A_3 = 4.64A_1$

Рис. 9. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для предлагаемых амплитудных соотношений и штатных соотношений стандарта DVB-S2 при разных типах помех

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для улучшения качества связи в системах передачи информации при наличии нефлуктуационных помех небольшой интенсивности можно использовать существующие созвездия 16-АФМ (4, 12) и 32-АФМ (4, 12, 16) с изменением амплитудных соотношений ($A_2 = 2.5A_1$) для 16-АФМ и ($A_2 = 2.5A_1$ и $A_3 = 3.9A_1$) для 32-АФМ.
2. За счет более эффективного использования мощности сигнала применение созвездий с точкой с нулевой амплитудой для 16-АФМ позволяет добиться увеличения помехоустойчивости

приема. Например, в случае применения созвездия (1, 5, 10) с соотношением ($A_2 = 2A_1$) энергетический выигрыш по сравнению со стандартным созвездием (4, 12) может достигать 1 дБ.

Вклад авторов

Г.В. Куликов – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Данг Суан Ханг – проведение компьютерных расчетов.

А.А. Лелюх – обработка результатов.

Authors' contributions

G.V. Kulikov – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

Dang Xuan Khang – conducting computer calculations.

A.A. Lelyukh – processing the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proakis J.G. *Digital Communications*. 4th ed. NY: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
2. Fuqin X. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Artech House Telecommunications Library. Artech House Publishers; 2006. 1039 p.
3. Сомов А.М., Корнев С.Ф. *Спутниковые системы связи*. М.: Горячая линия – Телеком; 2012. 244 с. ISBN 978-5-9912-0225-1
4. Minoli D. *Innovations in Satellite Communications and Satellite Technology: The Industry Implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. NY: John Wiley & Sons Ltd; 2015. 441 p.
5. Шелухин О.И. и др. *Сети спутниковой связи VSAT*. М.: Изд-во МГУЛ; 2004. 281 с. ISBN 5-8135-0248-3
6. Савватеев Ю.И., Назаров О.В. (ред.). *Помехозащищенность приема дискретных сигналов*. М.: Радиотехника; 2015. 584 с. ISBN 978-5-93108-094-9
7. Савищенко Н.В., Африкантов И.Н., Капралов Д.Д., Кириллов В.С., Остроумов О.А. Расчет вероятности битовой и символьной ошибок для канала связи при приеме сигнальных конструкций стандарта DVB-S2. *Информация и космос*. 2015;1:9–15.
8. Паршуткин А.В., Маслаков П.А. Помехоустойчивость каналов связи с амплитудно-фазовой модуляцией к воздействию непреднамеренных нестационарных помех. *Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму*. 2019;11–12:96–101.
9. Выболдин Ю.К. Помехоустойчивость приема многопозиционных АФМ сигналов в каналах связи с замираниями. В сб.: *Научная сессия ГУАП: сборник докладов в 3-х ч.* СПб.: ГУАП; 2018. Ч. 2. С. 32–37. <https://elibrary.ru/yrbhcx>
10. Горобцов И.А., Кирик Д.И. Оценка помехоустойчивости приема сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией. В сб.: *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019): сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т.* 2019. Т. 3. С. 111–116. <https://elibrary.ru/vmilnb>
11. Довбня В.Г., Коптев Д.С., Бабанин И.Г. Оценка потенциальной помехоустойчивости приема цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2020;10(1):21–35. <https://elibrary.ru/xefpfi>
12. Носов В.И., Дегтярев С.С. Анализ помехоустойчивости спутниковой линии связи с модуляцией M-APSK при учете нелинейных искажений. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2017;6:14–22. <https://elibrary.ru/yzlemn>
13. Носов В.И., Дегтярев С.С. *Исследование влияния нелинейности усилителя мощности ретранслятора на помехоустойчивость спутниковых систем связи*. Новосибирск: СибГУТИ; 2019. 171 с. <https://elibrary.ru/pgyqxr>
14. Струков А.П. Метод аналитического расчета вероятности символьной и битовой ошибок сигнала с амплитудно-фазовой манипуляцией в нелинейном канале. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2017;4(4):83–88. <https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.83>
15. Елкин П.Е. Определение оптимального режима работы усилителя при передаче сигналов 16-APSK в нелинейном канале с АФК. В: *Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции*. Новосибирск: СибГУТИ; 2017. С. 287–290. <https://elibrary.ru/zfmmlj>
16. Куликов Г.В., Усманов Р.Р., Трофимов Д.С. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной амплитудно-фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Научно-технические технологии*. 2020;21(1):22–29. URL: http://radiotec.ru/journal/Science_Intensive_Technologies/number/2020-1/article/19749

17. Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2021;11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.7>
18. Куликов Г.В., Ханг Д.С., Стариковский А.И. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией на фоне частотно-манипулированной помехи. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022;4:44–51. <https://elibrary.ru/uvasse>
19. Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в двухлучевом канале связи. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022;2:43–49.

REFERENCES

1. Proakis J.G. *Digital Communications*. 4th ed. NY: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
2. Fuqin X. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Artech House Telecommunications Library. Artech House Publishers; 2006. 1039 p.
3. Somov A.M., Kornev S.F. *Sputnikovye sistemy svyazi (Satellite Communication Systems)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2012. 244 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0225-1
4. Minoli D. *Innovations in Satellite Communications and Satellite Technology: The Industry Implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. NY: John Wiley & Sons Ltd; 2015. 441 p.
5. Shelukhin O.I., et al. *Seti sputnikovoi svyazi VSAT (VSAT Satellite Communication Networks)*. Moscow: MGUL; 2004. 281 p. (in Russ.). ISBN 5-8135-0248-3
6. Savvateev Yu.I., Nazarov O.V. (Eds.). *Pomekhozashchishchennost' priema diskretnykh signalov (Noise Immunity of Reception of Discrete Signals)*. Moscow: Radiotekhnika; 2015. 584 p. (in Russ.). ISBN 978-5-93108-094-9
7. Savishchenko N.V., Afrikantov I.N., Kapralov D.D., Kirillov V.S., Ostroumov O.A. Calculation of the probability of bit and symbolic errors for the communication channel when receiving signal structures of the DVB-S2 standard. *Informatsiya i kosmos = Information and Space*. 2015;1:9–15 (in Russ.).
8. Parshutkin A.V., Maslakov P.A. Noise stability of satellite communication channels with amplitude-phase modulation to exposure to urged unsteady interference. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu = Military Enginery. Counter-Terrorism Technical Divices. Issue 16*. 2019;11–12:96–101 (in Russ.).
9. Viboldin Yu.K. Error probabilities for receiving multipositions APM signals in communication channels with fading. In: *GUAP Scientific Session: collection of reports in 3 v*. St. Petersburg: GUAP; 2018. V. 2. P. 32–37 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ypbhcx>
10. Gorobtsov I.A., Kirik D.I. Estimation of noise immunity of signal reception with APSK. In: *Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education (APINO 2019): Collection of scientific articles of the 8th International Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conference in 4 v*. 2019. V. 3. P. 111–116 (in Russ.). <https://elibrary.ru/vmilnb>
11. Dovbnaya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G. Assessment of potential interference of receiving digital signals used in modern and perspective radio-relay and satellite communication systems. *Proceedings of the Southwestern State University. Series: IT Management, Computer Science, Computer Engineering, Medical Equipment Engineering*. 2020;10(1):21–35 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xeofpi>
12. Nosov V.I., Degtyarev S.S. Noise immunity analysis for M-APSK signaling over satellite link with nonlinear distortions. *Modern Science: Actual Problems of Theory & Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2017;6:14–22 (in Russ.). <https://elibrary.ru/yzlemn>
13. Nosov V.I., Degtyarev S.S. *Issledovanie vliyaniya nelineinosti usilitelya moshchnosti retranslyatora na pomekhoustoichivost' sputnikovykh sistem svyazi (Investigation of the Influence of the Nonlinearity of the Repeater Power Amplifier on the Noise Immunity of Satellite Communication Systems)*. Novosibirsk: SibGUTI; 2019. 171 p. (in Russ.). <https://elibrary.ru/pgyqxr>
14. Strukov A.P. Method of analytical calculation of SER and BER for APSK modulation in the nonlinear channel with AWGN. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy = Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2017;4(4):83–88 (in Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.83>
15. Elkin P.E. Determination of the optimal operating mode of the amplifier when transmitting 16-APSK signals in a nonlinear channel with AFC. In: *Modern Problems of Telecommunications: Materials of the Russian Scientific and Technical Conference*. Novosibirsk: SibGUTI; 2017. P. 287–290 (in Russ.). <https://elibrary.ru/zfmmlj>
16. Kulikov G.V., Usmanov R.R., Trofimov D.S. Noise immunity analysis of amplitude and phase-shift keying signals reception in presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(1):22–29 (in Russ.). Available from URL: http://radiotec.ru/ru/journal/Science_Intensive_Technologies/number/2020-1/article/19749
17. Kulikov G.V., Dang X.Kh. Noise immunity of receiving signals with amplitude and phase-shift keying in the presence of phase-shift keying interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2021;11 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.7>
18. Kulikov G.V., Khang D.X., Starikovskiy A.I. Noise immunity of signal reception with amplitude-phase shift keying in the background of frequency shift keying interference. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2022;4:44–51 (in Russ.). <https://elibrary.ru/uvasse>
19. Kulikov G.V., Dang X.Kh. Noise immunity of reception of signal with amplitude-phase shift keying in a two-path communication channel. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2022;2:43–49 (in Russ.).

Об авторах

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

Данг Суан Ханг, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dangxuankhang147@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3372-7172>

Лелюх Андрей Александрович, к.т.н., заместитель начальника технического центра специальной аппаратуры, АО «Московский научно-исследовательский институт радиосвязи» (109029, Россия, Москва, Нижегородская ул., д. 32). E-mail: a.lel@mail.ru. Scopus Author ID 57218678005, SPIN-код РИНЦ 1021-5094

About the authors

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

Dang Xuan Khang, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dangxuankhang147@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3372-7172>

Andrey A. Lelyukh, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Technical Center of Special Equipment, Moscow Research Institute of Radio Communications (32, Nizhegorodskaya ul., Moscow, 109029 Russia). E-mail: a.lel@mail.ru. Scopus Author ID 57218678005, RSCI SPIN-code 1021-5094

УДК 621.396.946
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-89-102>
EDN OVSTWY



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование цифровой пространственной обработки в условиях тропосферного распространения сантиметровых радиоволн для задач телекоммуникации

И.В. Пешков^{1, ©},
Д.Н. Борисов²

¹ Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Елец, 399770 Россия

² Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018 Россия

© Автор для переписки, e-mail: ilvpeshkov@gmail.com

Резюме

Цели. Прохождение радиолуча в слоях атмосферы зависит от показателя преломления и характера его вертикального изменения. В связи с этим могут возникнуть условия, когда радиолучи на малых высотах будут распространяться волноводным образом. При этом происходит затухание сигнала с отличающимися угловыми координатами по углу места. Целью работы является исследование на основе моделирования алгоритмов работы цифровых антенных решеток (ЦАР) для повышения дальности и надежности радиосвязи в условиях тропосферного волновода. Основными преимуществами ЦАР являются высокий коэффициент усиления и управляемость формы диаграммы направленности. При этом необходимо воспользоваться методами моделирования распространения луча в слоях тропосферы для оценки работы алгоритмов оценки угловых координат со сверхразрешением с последующим диаграммообразованием.

Методы. В работе используется аппарат параболических уравнений для оценки коэффициента затуханий радиоволн сантиметрового диапазона, а также алгоритм трассировки лучей через тропосферный волновод для оценки фаз в раскрыте антенн ЦАР. В этом случае будет достоверно сформирована пространственная корреляционная матрица, являющаяся основой для вычисления координат со сверхразрешением (метод MUSIC) и вектора весовых коэффициентов (алгоритм максимизации отношения сигнал/помеха + шум).

Результаты. Рассмотрены типичные случаи возникновения тропосферного волновода на основе модифицированного показателя преломления. Получены графики вероятности битовых ошибок после прохождения сигнала по тропосферному волноводу при разной геометрии антенных решеток. Рассмотрены кольцевые и сферические решетки из направленных антенных элементов.

Выводы. Проведенные численные исследования позволяют сделать вывод, что дальность связи в диапазоне сантиметровых волн увеличивается с помощью ЦАР. Кроме того, установлено, что кольцевая антенная решетка позволяет получить самые низкие значения вероятности битовой ошибки при приеме дискретных радиосигналов в тропосферном волноводе.

Ключевые слова: цифровые антенные решетки, пеленгация, MUSIC, диаграммообразование, тропосферная связь, моделирование

• Поступила: 09.10.2023 • Доработана: 22.07.2024 • Принята к опубликованию: 10.12.2024

Для цитирования: Пешков И.В., Борисов Д.Н. Моделирование цифровой пространственной обработки в условиях тропосферного распространения сантиметровых радиоволн для задач телекоммуникации. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):89–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-89-102>, <https://elibrary.ru/OVSTWY>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Modeling of digital spatial processing under conditions of troposphere propagation of centimeter radio waves for wireless telecommunication

Ilia W. Peshkov ^{1, @},
Dmitry N. Borisov ²

¹ *Bunin Yelets State University, Yelets, 399770 Russia*

² *Voronezh State University, Voronezh, 394018 Russia*

@ *Corresponding author, e-mail: ilvpeshkov@gmail.com*

Abstract

Objectives. A radio beam traveling through the layers of the atmosphere depends on the refractive index and its vertical variation. In this regard, attenuation may occur when radio rays propagate in a waveguide manner at low altitudes. A multipath fading effect may also occur when several rays reflected from different layers of the troposphere and having different spatial coordinates in elevation arrive at the receiver. The aim of the study is to simulate the operational algorithms of digital antenna arrays (DAA) in order to increase the range and reliability of radio communication using a tropospheric waveguide. The main advantage of the DAA consists in the high gain and controllability of the pattern shape. In order to evaluate algorithms for direction-of-arrival estimation with super-resolution and beamforming, it is necessary to select an appropriate method for modeling beam propagation in the layers of the troposphere. It is proposed to use DAA to increase the range and reliability of radio communications using a tropospheric waveguide. The performance of algorithms for direction-of-arrival estimation and beamforming in the troposphere can be evaluated using ray tracing simulation.

Methods. Parabolic equations are used to estimate the path losses of radio waves in the centimeter range. A ray tracing algorithm referring to a tropospheric waveguide is used to estimate the phases in the aperture of the receiving array. A spatial correlation matrix is reliably generated to form the basis for calculating coordinates using a super-resolution multiple signal classification (MUSIC) method and the weighting factor vector (algorithm for maximizing the signal-to-noise + noise ratio).

Results. Typical cases of a tropospheric waveguide based on a modified refractive index were considered. The bit error rate curves are obtained as a function of the geometry of the antenna arrays after the signal has passed through the tropospheric waveguide. Circular and spherical antenna arrays composed of directional antenna elements are considered.

Conclusions. Numerical studies suggest that the range of communication links using digital antenna arrays increases in the centimeter band. The best geometry for this purpose is circular, since providing the lowest bit error rate for binary phase-shift keyed signals.

Keywords: digital antenna array, direction-of-arrival estimation, MUSIC method, beamforming, tropospheric waveguide, simulation

• Submitted: 09.10.2023 • Revised: 22.07.2024 • Accepted: 10.12.2024

For citation: Peshkov I.W., Borisov D.N. Modeling of digital spatial processing under conditions of troposphere propagation of centimeter radio waves for wireless telecommunication. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):89–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-89-102>, <https://elibrary.ru/OVSTWY>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Распространение радиоволн ультракоротковолнового диапазона в атмосфере осуществляется, как правило, не прямолинейно, а обычно изогнуто таким образом, что радиоволна может испытывать рефракцию в нижних слоях и/или многократные отражения от земной поверхности [1]. В этом случае сигналы сантиметровых длин волн могут достигать приемных терминалов за несколько сотен километров от передатчика [2–4]. Данный эффект возникает по причине разницы температур, влажности, давления в слоях тропосферы, за что получил наименование «тропосферный волновод» [5–7]. Такой вид связи на дальние расстояния может быть перспективным, т.к. при нем не задействуются дорогостоящие средства, как например, спутники [8]. Однако надежность и устойчивость связи определяются степенью затухания, корректностью определения высоты тропосферного волновода в зависимости от дальности до приемника и т.д. [9]. В связи с этим возникает необходимость исследования применения антенных решеток с цифровым управлением луча в условиях тропосферного волновода как средства для преодоления обозначенных проблем связи. Такие устройства позволяют цифровым способом формировать максимум и нули диаграммы направленности в нужных направлениях.

В работе предлагается комбинированный способ моделирования, основанный на поэтапном определении величины потерь, а также фаз лучей сантиметрового диапазона в слоях атмосферы в зависимости от показателя рефракции на различной высоте. Кроме того, для организации такого рода связи исследуется возможность использования цифровых антенных решеток (ЦАР). На начальном этапе моделирования осуществляется оценка затухания радиосигнала, затем – вычисление пути распространения с помощью алгоритма трассировки лучей от передатчика на приемную ЦАР, и на последнем этапе – моделирование алгоритмов диаграммообразования (оценка угловых координат всех лучей, а также цифровое формирование диаграммы направленности) с вычислением вероятности битовой ошибки.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛУЧА В ТРОПОСФЕРЕ

Известно, что путь распространения одиночного луча определяется известным законом Снеллиуса для сплошной сферически-слоистой среды¹:

$$n(h)(R_E + h)\cos e = \text{const}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления среды, h – высота над поверхностью Земли, R_E – радиус Земли. Рассмотрим механизм образования тропосферного распространения более подробно, e – угол места луча.

Действительная часть показателя преломления может быть выражена как функция атмосферного давления, влажности и температуры воздуха. Формула для показателя является полуэмпирической и записывается как²:

$$n = 1 + 77.6 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T} + 0.373 \frac{p}{T^2}, \quad (2)$$

где P – атмосферное давление в миллибарах, T – температура в градусах Кельвина и p – давление водяного пара в миллибарах. Уравнение (2) известно как формула Дебая, и было показано, что оно обладает погрешностью $\pm 0.5\%$ [10]. Показатель преломления n редко превышает величину 1.0004 на поверхности, и вводят так называемую рефракцию радиоволн³ N , определяемую как:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (3)$$

Распространение радиоволн больше зависит от градиентов рефракции, чем от самого значения N [10].

¹ Рекомендация МСЭ-R P.834-6. *Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн*. [Recommendation ITU-R P.834-6. *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation* (in Russ.).]

² Справочник по радиометеорологии. ITU, 2014. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-26-2013-OAS-PDF-R.pdf. Дата обращения 09.10.2023. [The Handbook on Radiometeorology. ITU, 2014. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-26-2013-OAS-PDF-R.pdf. Accessed October 09, 2023.]

³ Рекомендация МСЭ-R P.453-12(09/2016). *Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции*. [Recommendation ITU-R P.453-12(09/2016). *Radio wave refraction index: its formula and refraction data* (in Russ.).]

Как правило, заметные градиенты рефракции в горизонтальном направлении возникают в гораздо больших масштабах (десятки метров – десятки километров), чем в вертикальном (десятки метров – сотни метров). Поэтому часто предполагается, что атмосфера имеет горизонтальную стратификацию, и в дальнейшем рассматривается только высотная зависимость рефракции, пренебрегая любыми горизонтальными вариациями.

Таким же образом, чтобы включить кривизну Земли, определяется модифицированная или измененная рефракция M из модифицированного или измененного показателя преломления m [11]:

$$M = (m - 1) \cdot 10^6 = 10^6 \times \left(n - 1 + \frac{h}{R_E} \right) = N + 10^6 \cdot \frac{h}{R_E}. \quad (4)$$

Наземные и приподнятые волноводы моделируются трехлинейной кривой, называемой профилем, как на рис. 1. Случай на рис. 1а иллюстрирует структуру простого поверхностного канала. Здесь волновод простирается от определенной граничной высоты к поверхности Земли, а слой захвата, где справедливо условие $dM/dh < 0$, способствующее возникновению рефракции волн, тянется вдоль всего пути распространения волн. На рис. 1б показан поверхностный S-образный канал, который доходит до поверхности Земли, а слой захвата – не доходит, поскольку условие $dM/dh > 0$ справедливо возле поверхности. В этих двух случаях глубина канала представляет собой разницу высот между поверхностью Земли и верхней частью канала, где достигается минимум измененного профиля рефракции⁴. На рис. 1в приведены общие условия для приподнятого канала, когда значение M на поверхности Земли меньше, чем в верхней части канала, и поэтому канал не может достигать поверхности.

Как упоминалось выше, появление волновода является результатом сильных вертикальных изменений показателя преломления атмосферы между воздушными массами различной температуры и влажности, особенно на низких уровнях атмосферы. Таким образом, тропосферный волновод позволяет электромагнитной энергии распространяться на большие расстояния, обеспечивая загоризонтную дальнюю радиосвязь.

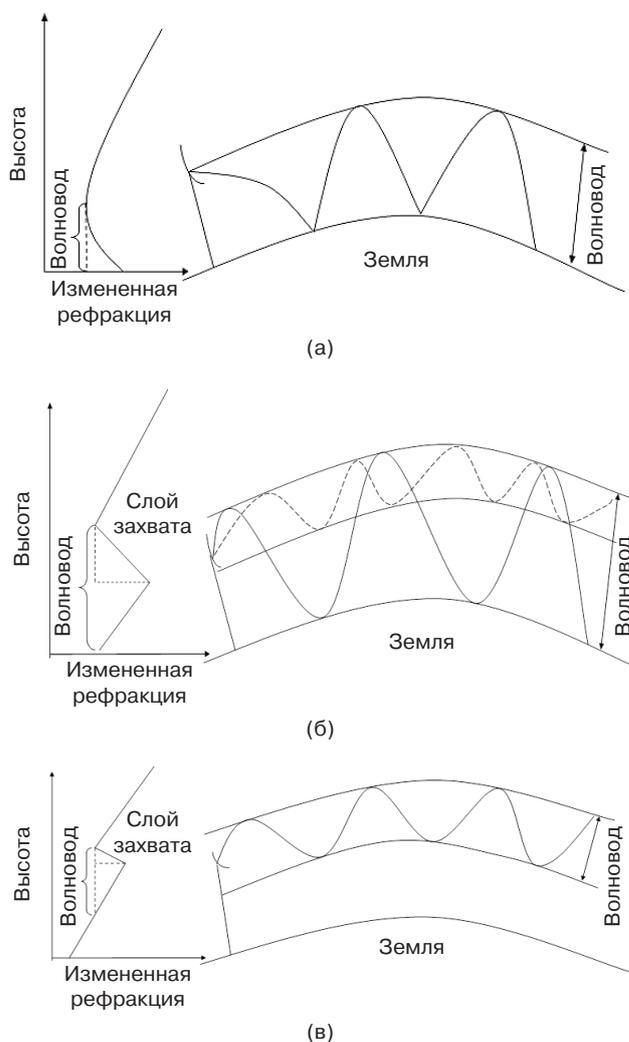


Рис. 1. M -профиль для различных типов проводимости: (а) простой поверхностный (приземный) волновод, (б) поверхностный волновод, (в) приподнятый волновод

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ МЕТОДОМ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

В данном разделе приводится описание аппарата параболического уравнения (ПУ) для задач тропосферного распространения радиоволн для оценки степени их затухания. Оно было введено Леонтовичем и Фоком в 1946 г. [12] и с тех пор постепенно совершенствовалось.

Из уравнения Гельмгольца компонент φ электрического или магнитного поля удовлетворяет условию [13]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k^2 n^2 \varphi = 0, \quad (5)$$

где k – волновое число свободного пространства, а φ – компонент электромагнитного поля либо E_y ,

⁴ Lindquist T. *Wave Propagation Models in the Troposphere for Long-Range UHF/SHF Radio Connections*. PhD Thesis. 2020. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kau:diva-80679>. Дата обращения 09.10.2023. / Accessed October 09, 2023.

либо H_u для горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно. Введем так называемую редуцированную функцию поля $u(x, z)$ в зависимости от координат x и z :

$$\dot{u}(x, z) = e^{-ikx} \varphi(x, z). \quad (6)$$

Смысл выполнения этой замены и решения для $\dot{u}(x, z)$ вместо $\varphi(x, z)$ заключается в том, что $\dot{u}(x, z)$ будет медленно меняться в зависимости от направления распространения. После этой замены скалярное волновое уравнение (5) примет вид:

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial}{\partial x} + k^2 [n^2 - 1] \right\} \dot{u}(x, z) = 0. \quad (7)$$

Это уравнение по-прежнему классифицируется как эллиптическое, а не как параболическое. Принято вводить псевдодифференциальный оператор

$$Q = \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2} = \sqrt{1 + q}, \quad q = \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + (n(x, z) - 1)$$

и факторизовать уравнение (7). Благодаря этой замене вывод становится более общим [14]:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} + ik(1 - Q) \right\} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} + ik(1 + Q) \right\} u = 0. \quad (8)$$

Если начальное приведенное поле $u(0, z)$ известно, уравнение (9) просто повторяется с шагом Δx , пока не будет достигнута целевая точка с координатами x, z [12, 13]:

$$u(x + \Delta x, z) = e^{ik\Delta x(Q-1)} u(x, z). \quad (9)$$

Существуют различные методы решения уравнения (9) [14]. Наиболее распространенными, встречающимися в существующей литературе, являются методы ПУ с разделенным шагом преобразования Фурье, методы конечных элементов и методы конечных разностей⁵.

После вычисления напряженности поля согласно (9) необходима оценка степени затухания на трассе, для чего используются коэффициенты распространения и потерь. Коэффициент распространения (propagation factor) PF (дБ) определяется как квадрат отношения амплитуды электрического поля в данной точке при определенных условиях к амплитуде электрического поля, полученной в той же точке в условиях свободного распространения. Уравнение (10) дает выражение коэффициента распространения через поле $|\dot{u}(x, z)|$ относительно свободного

пространства, а также показывает связь с величиной потерь на трассе (propagation loss) PL (дБ) [15–17]:

$$PF = 20 \lg |\dot{u}(x, z)| + 10 \lg(r) + 10 \lg(\lambda), \quad (10)$$

$$PL = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) - PF, \quad (11)$$

где λ – длина волны, r – дальность распространения радиоволн.

МЕТОД ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЫКНОВЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ 2-ГО ПОРЯДКА

В данном разделе описывается алгоритм трассировки лучей в слоях тропосферы для вычисления числа лучей, а также их азимутальных и угломестных координат в раскрыве антенной решетки с последующей цифровой обработкой. Запишем закон Снеллиуса (1), положив h как функцию r , т.е.

$$n[h(r)] [R_E + h(r)] \cos e = \text{const}. \quad (12)$$

Из геометрического представления величин (рис. 2) можно получить для бесконечно малого dh и dr [18]:

$$\sin e = \frac{dh}{dr}, \quad (13)$$

$$\cos e = \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr} \right)^2} \left(\geq 0, \text{ т.е. } e \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \right). \quad (14)$$

Тогда

$$nh(r) [R_E + h(r)] \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr} \right)^2} = \text{const}. \quad (15)$$

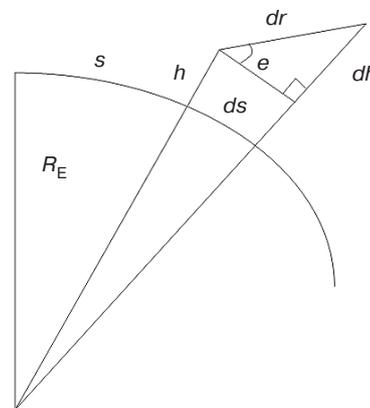


Рис. 2. Геометрическое представление величин R_E, h, s и их дифференциалов

⁵ Ehn J. *Propagation of Radio Waves in a Realistic Environment using a Parabolic Equation Approach*. PhD Thesis. 2019. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-157610>. Дата обращения 09.10.2023. / Accessed October 09, 2023.

Из предположения, что h является функцией r , следует, что показатель преломления n неявно зависит от r . Продифференцируем уравнение (15) по r и получим:

$$\frac{dn}{dh} \frac{dh}{dr} (R_E + h) \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr}\right)^2} + n \frac{dh}{dr} \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr}\right)^2} + n(R_E + 1) \frac{-2 \frac{dh}{dr} \frac{d^2h}{dr^2}}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{dh}{dr}\right)^2}} = 0. \quad (16)$$

После несложных преобразований и введя замену $\frac{dh}{dr} = u$, получим эквивалентную систему двух связанных уравнений 1-го порядка [18]:

$$\frac{dh}{dr} = u, \quad (17)$$

$$\frac{du}{dr} = -u^2 \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} + \frac{1}{R_E + h} \right) + \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} + \frac{1}{R_E + h} \right). \quad (18)$$

Уравнения (17)–(18) можно рассматривать как задачу с начальными значениями:

$$u(r=0) = \left. \frac{dh}{dr} \right|_{r=0} = \sin e_0, \quad (19)$$

$$h(r=0) = h_0, \quad (20)$$

и проблема трассировки лучей однозначно решается этим обыкновенным дифференциальным уравнением.

Уравнения (17)–(18) дискретизируются и решаются по шагам Δr . Значение шага итерации от $(l-1)$ до l выполняется следующим образом [18].

Шаг 1. Оценить величины $\frac{1}{n_{l-1}}$ и $\left. \frac{dn}{dh} \right|_{l-1}$ на высоте h_{l-1} с использованием экспериментальных данных или приближенных значений.

Шаг 2. Решить уравнения (17)–(18) с начальными значениями u_{l-1} и h_{l-1} , чтобы получить величины u_l и h_l .

Шаг 3. Рассчитать s_l – расстояние распространения луча на шаге l :

$$s_l = s_{l-1} + R_E \arcsin \left(\frac{\cos e_{l-1} \Delta r}{R_E + h_l} \right), \quad (21)$$

а также угол

$$e_l = \arcsin(u_{l-1}). \quad (22)$$

Шаги 1–3 повторяются от $l=1$ до $l=L$, т.е. соответствующей конечной точке расчета путей распространения лучей. Численное дифференцирование на шаге 2 реализуется с использованием метода Рунге – Кутты 4-го порядка. Для первой итерации $l=1$ начальные значения на шаге 2 задаются с помощью уравнений (19)–(20), а показатель преломления и его производная должны быть оценены на высоте h_0 , на которой располагается передающая антенна, в результате чего можно получить величины $\frac{1}{n_0}$

и $\left. \frac{dn}{dh} \right|_0$ соответственно. Таким образом, расстояние от точки передатчика до ЦАР делится на L точек. В каждой точке l итерации вычисляются значения s_l , e_l , n_l и h_l каждого луча.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В теоретической части статьи были представлены методы расчета распространения электромагнитных лучей в стратифицированной атмосфере. Полученные таким образом радиосигналы \vec{q} суммируются в раскрыве ЦАР для последующей пространственной фильтрации, схема которой показана на рис. 3 [19].

Пусть имеется антенная решетка, состоящая из K направленных антенных элементов (АЭ).

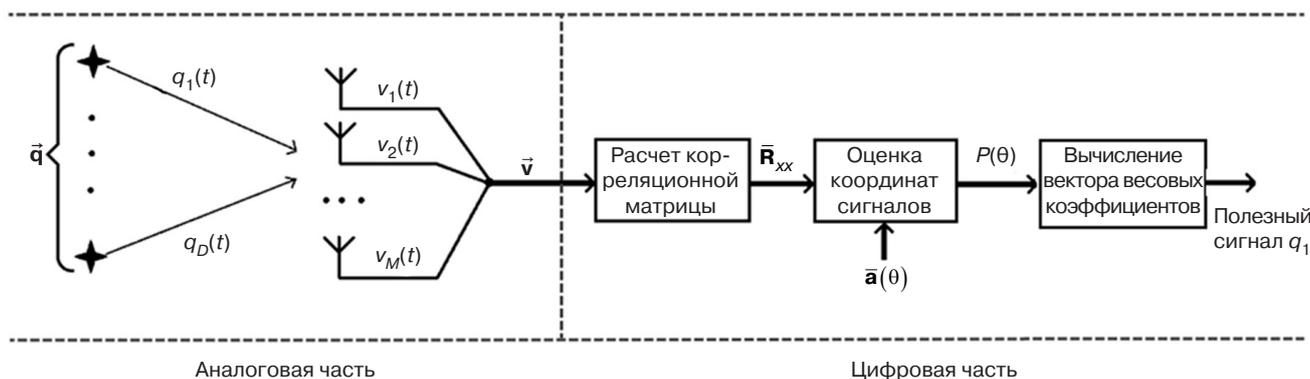


Рис. 3. Схема обработки сигналов в ЦАР

Она принимает D независимых сигналов с разных направлений с координатой по азимуту θ_D и углу места ϕ_D , как показано на рис. 3. Здесь $q_D(t)$ – падающий сигнал, $v_K(t)$ – принятый сигнал с K -го АЭ в дискретный момент времени t . Здесь и далее индекс «1» обозначает полезный сигнал. В итоге матрица выходного сигнала ЦАР имеет следующий вид:

$$\vec{v} = \mathbf{A}\vec{q} + \vec{n}, \quad (23)$$

где \vec{n} – вектор шума; \mathbf{A} – матрица сканирующих векторов $\vec{a}(\theta, \phi)$, которые определяют амплитудно-фазовое распределение поля антенной решетки. Таким образом:

$$\mathbf{A} = [\vec{a}(\theta_1, \phi_1) \ \vec{a}(\theta_2, \phi_2) \ \dots \ \vec{a}(\theta_D, \phi_D)], \quad (24)$$

$$\vec{a}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} g_1(\theta, \phi)e^{jkr_1^T} & g_2(\theta, \phi)e^{jkr_2^T} & \dots & g_K(\theta, \phi)e^{jkr_K^T} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda}(k_x, k_y, k_z) = \frac{2\pi}{\lambda}(\sin \phi \cos \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \phi)$ – волновой вектор, $\mathbf{r}_n^T = (x_n, y_n, z_n)^T$ – радиус-вектор к n -му АЭ, $g_n(\theta, \phi)$ – диаграмма направленности n -го АЭ.

Пространственная корреляционная матрица сигналов определяется по формуле:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \vec{v}(t) \vec{v}^H(t), \quad (26)$$

где T – число отсчетов цифрового сигнала, индекс H показывает эрмитово транспонирование вектора $\vec{v}(t)$.

Далее угловые координаты сигналов определяются по методу MUSIC⁶, который относится к собственно структурным и преодолевает разрешение по критерию Релея, т.е. его разрешающая способность меньше ширины главного лепестка диаграммы направленности решетки [20]:

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{|\vec{a}^H(\theta) \mathbf{E}_{\text{noise}} \mathbf{E}_{\text{noise}}^H \vec{a}(\theta)|}, \quad (27)$$

где $\mathbf{E}_{\text{noise}}$ – собственный вектор шумов.

⁶ Multiple signal classification – алгоритм, используемый для оценивания частот суммы синусоид на фоне шумов по серии измерений и определения угловых координат множества источников сигналов в цифровых антенных решетках. [Multiple signal classification is an algorithm for estimating sinusoidal sum frequencies against noise from a series of measurements and for determining angular coordinates of multiple signal sources in digital antenna arrays.]

Вектор весовых коэффициентов для формирования диаграммы направленности ЦАР рассчитывается как [21]:

$$\vec{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \vec{a}(\theta_1, \phi_1)}{\vec{a}(\theta_1, \phi_1)^H \mathbf{R}^{-1} \vec{a}(\theta_1, \phi_1)}. \quad (28)$$

Таким образом, ЦАР определяет пространственные координаты сигнала, согласно (26), (27) и затем формирует в цифровой области диаграмму направленности, исходя из полученного вектора \vec{w} . Тогда сигнал на выходе должен выглядеть следующим образом:

$$q_1 = \vec{w}^H \vec{v}. \quad (29)$$

На основе моделирования проведено исследование по оценке дальности распространения телекоммуникационных сигналов в слоях тропосферы. Для всех случаев максимальная дальность выбрана равной 150 км с разрешением Δr , равным 500 м. Очевидно, что для того, чтобы отследить все лучи от передатчика, прибывающие на приемную ЦАР, потребуется провести трассировку во всем диапазоне углов склонения. Однако известно выражение, показывающее предельные значения по углу места, в пределах которых происходит распространение радиоволны внутри воздушного тропосферного волновода [22]:

$$\Phi_{\min, \max} = \pm \sqrt{2 \left(\frac{1}{n(0)} \frac{dn}{dh} - \frac{1}{R_0} \right) (h_t - \delta)}, \quad (30)$$

где δ – толщина слоя захвата, h_t – высота передающей антенны.

Обобщенная схема имитационного моделирования показана на рис. 4. Антенна передатчика в экспериментах устанавливалась на высоту 200 м в условиях действия шума и многолучевого распространения. Использовался сигнал с бинарной фазовой манипуляцией со скоростью 1 Мбит/с. Мощность передатчика составляла 10 Вт, мощность шума в диапазоне ультракоротких волн – $1.7 \cdot 10^{-13}$ Вт [23]. Оценивалась вероятность битовой ошибки как отношение количества ошибочно принятых бит к общему их числу.

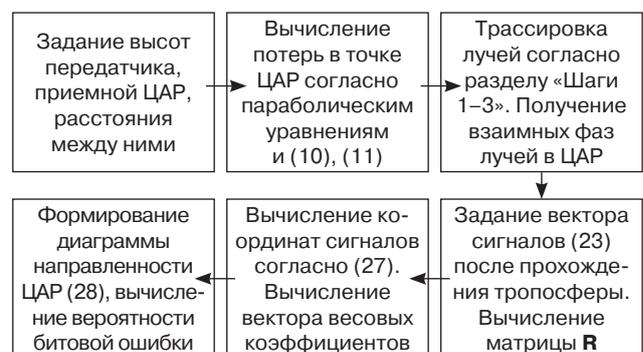


Рис. 4. Обобщенная схема имитационного моделирования

Эксперимент 1. Идеализированный поверхностный тропосферный волновод

В данном эксперименте моделировался поверхностный волновод. Модифицированный профиль рефракции показан на рис. 5. Он имеет отрицательный наклон по уровню $-100 M\text{-ед. км}^{-1}$ в диапазоне высот от 0 до 350 м и наклон $117 M\text{-ед. км}^{-1}$.

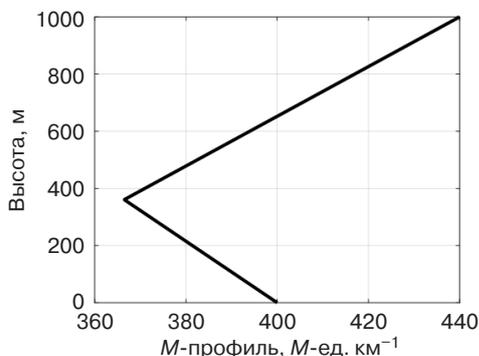


Рис. 5. Модифицированный M-профиль поверхностного волновода

На рис. 6 показано распределение электромагнитного поля в зависимости от расстояния от передатчика и высоты над поверхностью Земли. Вычисление осуществлено согласно аппарату ПУ и численному алгоритму расщепления Фурье. Частота несущей составляет 5 ГГц, в качестве антенны передатчика служит полуволновый диполь.

Из рис. 6 видно, что распределение поля носит неравномерный характер.

На рис. 7 показаны лучи для рассматриваемого профиля рефракции.

Видно, что лучи отражаются от верхней границы слоя захвата, после чего достигают поверхности

Земли, от которого снова происходит отражение. Такой процесс продолжается до приемной ЦАР с затуханием, как показано на рис. 6. На рис. 8 показан один из таких лучей, который пересекает приемную ЦАР.

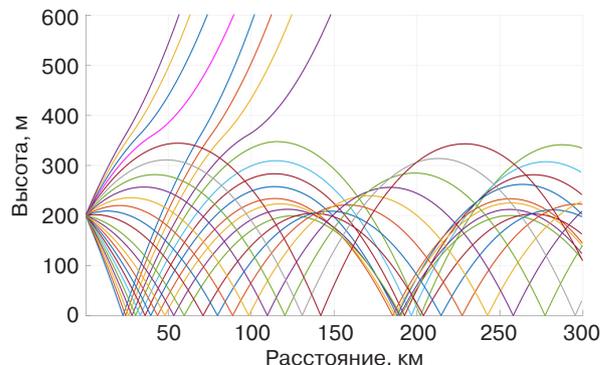


Рис. 7. Лучи, распространяющиеся в нижних слоях тропосферного волновода

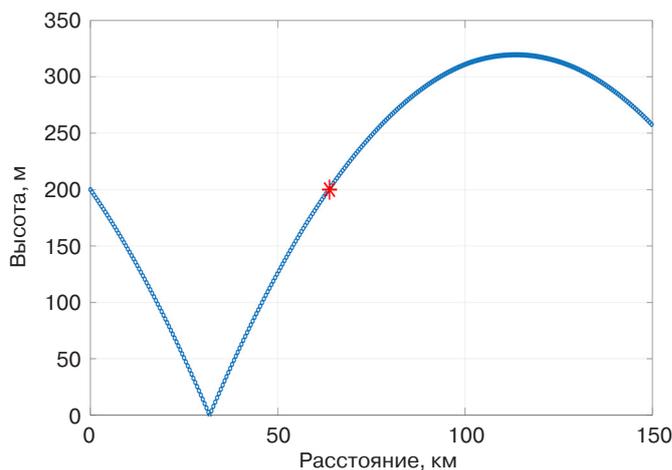
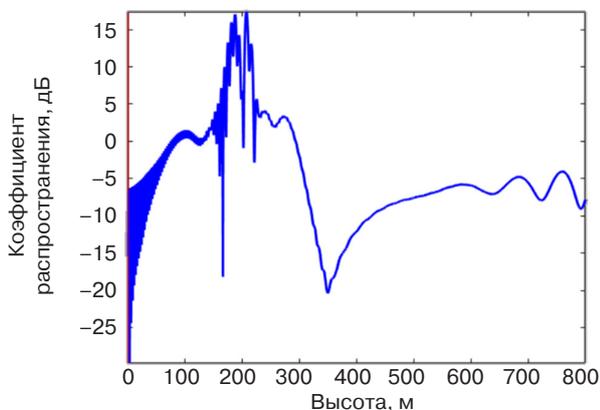
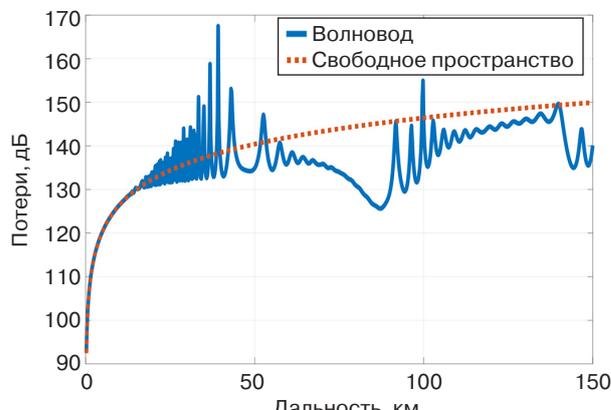


Рис. 8. Пример пересечения луча (синяя линия) и ЦАР (красная звездочка)



(а)



(б)

Рис. 6. Параметры распределения поля:

- (а) коэффициент распространения для вертикального среза в точке 25 км,
- (б) потери в горизонтальном срезе по уровню 200 м (синяя линия – в атмосфере, представленной на рис. 5; оранжевая пунктирная линия – в свободном пространстве)

На рис. 9 показан график вероятности битовой ошибки в зависимости от типа антенной решетки и расстояния, в пределах которого может быть осуществлен прием (на расстоянии от 50 до 100 км до передатчика). При этом затухание радиосигнала составляло около -135 дБ. Использовались кольцевая и полусферная геометрия приемных ЦАР с направленными АЭ [23].

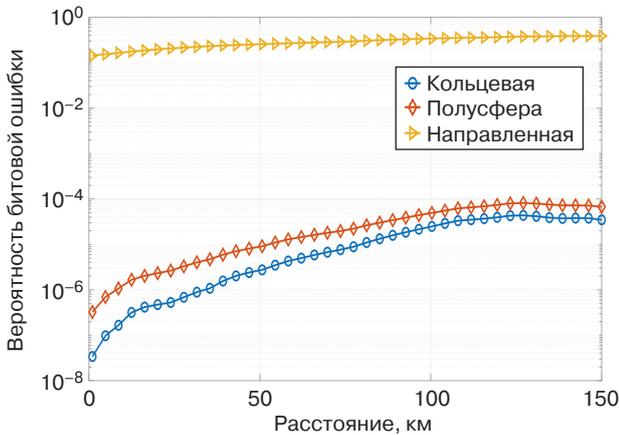


Рис. 9. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстояния

Из графиков на рис. 9 видно, что кольцевая ЦАР обеспечивает самую низкую вероятность ошибки (до 10^{-6}) на дистанции до 50 км. Если используется полусферическая форма приемной ЦАР и направленная антенна, то величина вероятности битовой ошибки на этой дистанции составляет примерно 10^{-5} и 0.3 соответственно, что согласуется с ранее полученными результатами [19]. В этом случае после прохождения атмосферы затухание сигнала составляет около 135 дБ, как видно из рис. 6, и тогда отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе каждого приемного АЭ составляет 10 дБ. При этом на рис. 9 и далее не наблюдается явной

зависимости битовой ошибки от расстояния, особенно начиная со значения 15 км. Объясняется это тем, что, как видно из формулы (11), величина потерь по мощности линейно зависит от пройденного радиоволновой пути, тогда как напряженность поля обратно пропорциональна величине \sqrt{r} .

Эксперимент 2. Идеализированный тропосферный S-образный волновод

Рассмотрим идеализированную поверхность S-образного канала, характеризующуюся профилями M и N , показанными на рис. 10. Профиль M начинается с наклона 117 М-ед. км^{-1} для самых низких 100 м, а затем изменяется на -100 М-ед. км^{-1} до высоты 400 м, после чего возвращается к значению 117 М-ед. км^{-1} .

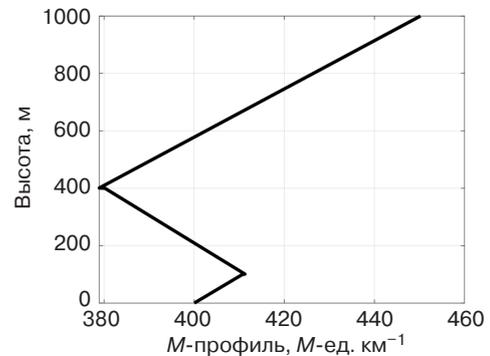
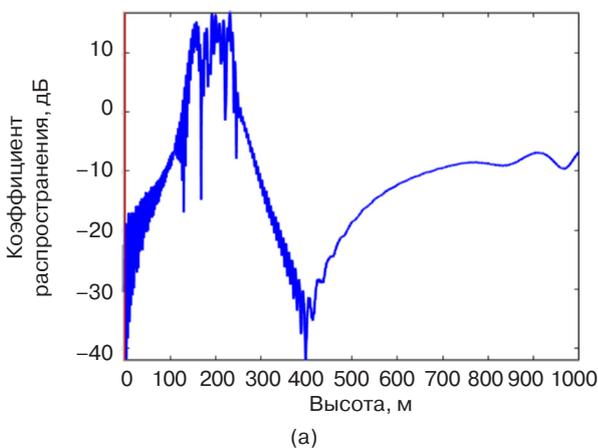


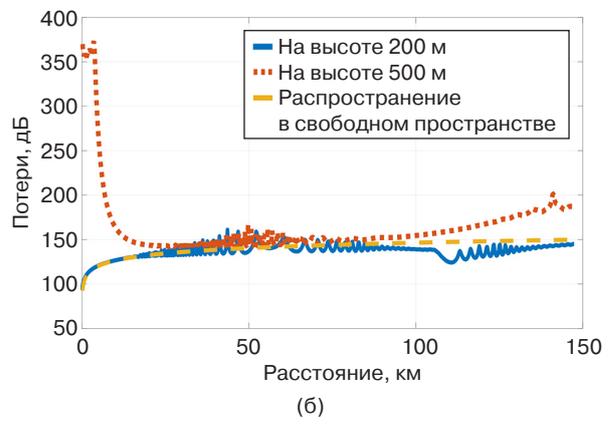
Рис. 10. Модифицированный M-профиль слоев атмосферы

На рис. 11 показаны параметры распределения электромагнитного поля в соответствии с профилем модифицированного показателя рефракции, изображенным на рис. 10.

Из рис. 11а видно, что коэффициент распространения на 15 дБ больше на высоте передатчика 200 м



(а)



(б)

Рис. 11. Свойства распределения поля:
(а) коэффициент распространения для вертикального среза в точке 110 км,
(б) потери для горизонтального среза

по сравнению с волной в свободном пространстве. На рис. 11б показаны графики величины потерь в зависимости от расстояния между передатчиком и приемной ЦАР, из которого можно сделать вывод, что внутри тропосферного волновода электромагнитная волна теряет мощность на 15–20 дБ меньше по сравнению с радиосигналом в свободном пространстве или вне слоя захвата.

На рис. 12 представлены траектории лучей для рассматриваемого типа показателя рефракции.

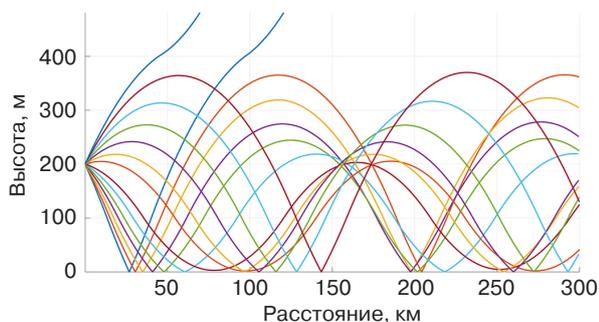


Рис. 12. Лучи, распространяющиеся в нижних слоях тропосферного волновода

Видно, что лучи могут как переотражаться от земной поверхности, так и преломляться на нижней и верхней границе слоев тропосферы.

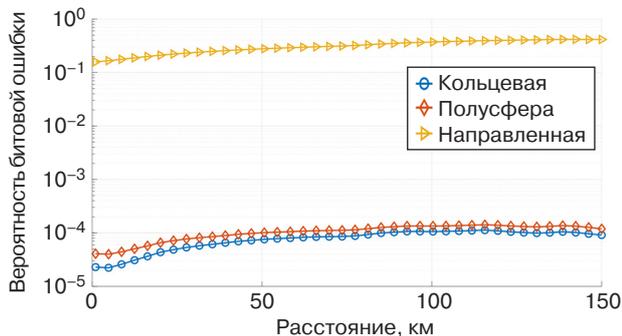
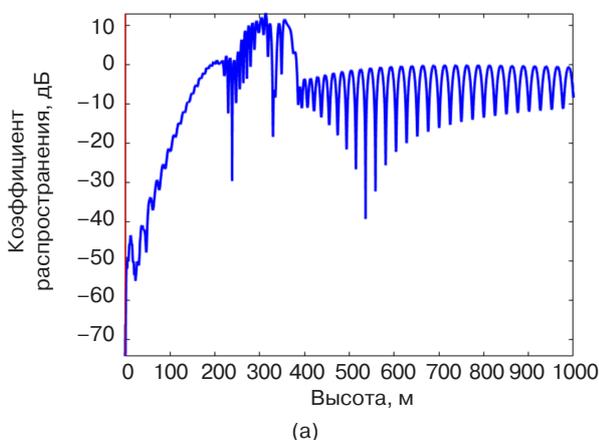


Рис. 13. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстояния



Из графиков на рис. 13 видно, что кольцевая ЦАР обеспечивает самую низкую вероятность ошибки. Таким образом, анализируя рис. 11–13, можно сказать, что радиосигналы на частоте 5 ГГц могут достичь приемника, находящегося в более чем 100 км от передатчика, обеспечивая при этом величину вероятности битовой ошибки в пределах 10^{-5} , что является приемлемым для большинства современных беспроводных телекоммуникационных систем.

Эксперимент 3. Идеальный приподнятый волновод

Рассмотрим идеальный приподнятый волновод. Соответствующий ему *M*-профиль показан на рис. 14. Модифицированный *M*-профиль начинается с наклона 117 *M*-ед. км⁻¹ для первых 250 м высоты и затем изменяется до -100 *M*-ед. км⁻¹ вплоть до 400 м, и затем возвращается к 117 *M*-ед. км⁻¹. Высота антенны – 300 м в пределах слоя захвата.

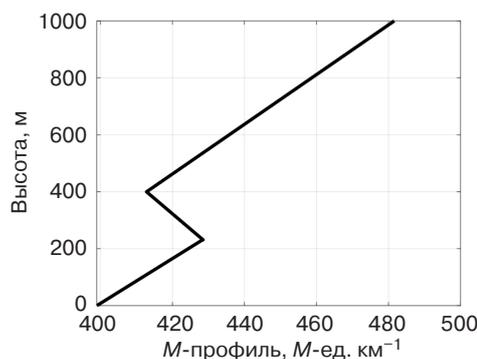


Рис. 14. Модифицированный *M*-профиль, характерный для приподнятого волновода

Из рис. 14 видно, что волновод в этом случае поднят и не касается поверхности Земли. На рис. 15 показано распределение электромагнитного поля

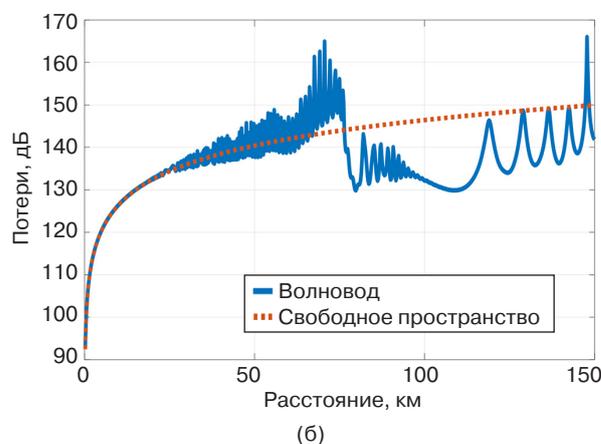


Рис. 15. Параметры распределения поля: (а) коэффициент распространения для вертикального среза в точке 80 км, (б) потери в горизонтальном срезе по уровню 50 м (синяя линия – в атмосфере, представленной на рис. 2; оранжевая пунктирная линия – в свободном пространстве)

в зависимости от расстояния от передатчика и высоты над поверхностью Земли.

Из рис. 15а видно, что электромагнитная волна с частотой 5 ГГц на высоте передатчика 300 м имеет большую мощность по сравнению со свободным прямолинейным распространением. Кроме того, из рис. 15б становится очевидным, что преимущество распространения внутри тропосферного волновода проявляется на расстояниях свыше 100 км, т.к. в этом случае потери на 20 дБ меньше, чем в свободном пространстве.

На рис. 16 показаны типичные траектории лучей для приподнятого волновода.

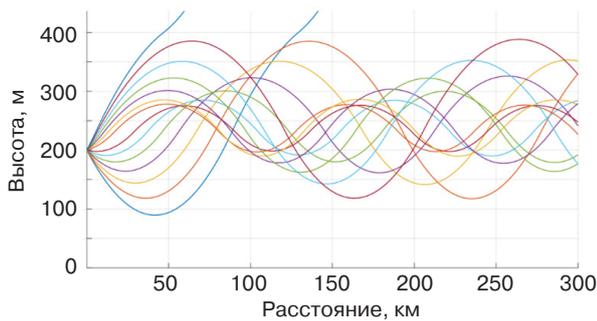


Рис. 16. Лучи, распространяющиеся в нижних слоях тропосферного волновода

Видно, что в этом случае лучи не достигают земной поверхности и испытывают только рефракцию на верхней и нижней границах изменения показателя рефракции.

На рис. 17 показаны графики зависимости вероятности битовой ошибки от расстояния между передатчиком и ЦАР, которая расположена внутри волновода также на высоте 300 м.

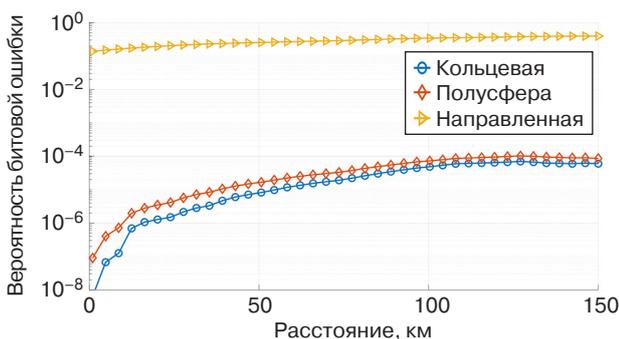


Рис. 17. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстояния

Из графиков на рис. 17 видно, что кольцевая ЦАР обеспечивает самую низкую вероятность ошибки (10^{-6}) по сравнению с полусферической геометрией и простым направленным излучателем на дистанции до 50 км, для которых вероятность ошибки

равна 10^{-5} и 0.3 соответственно. Данная геометрия имеет преимущество, т.к. электромагнитное излучение, приходящее на решетку, внутри тропосферного волновода имеет незначительные значения углов склонения, т.е. большая часть приходится на угол $\varphi \approx 90^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тропосферный волновод в нижних слоях атмосферы возникает, если происходит изменение модифицированного индекса рефракции от максимального значения у поверхности Земли до минимального – на определенной высоте. В этом случае электромагнитное излучение в диапазоне ультракоротких сантиметровых волн (5 ГГц) от передатчика будет распространяться не по прямой линии, а путем отражения от Земли (либо нижнего слоя захвата) и от верхнего слоя захвата. Предельные расстояния устойчивого приема достигают сотен километров, вызывая значительные затухания. Кроме того, в точке приема могут пребывать несколько лучей с разными амплитудами и фазами, т.е. имеет место многолучевое распространение. Для преодоления таких сложностей предполагается использовать антенные решетки с цифровым формированием диаграммы направленности на стороне приема.

Для корректного моделирования прохождения сигнала внутри тропосферного волновода и ЦАР в работе использовались несколько последовательных подходов: вычисление трасс распространения, вычисление потерь с учетом расстояния, индекса рефракции, высоты антенны и несущей частоты. Путем перебора находились лучи, оказавшиеся в раскрыве антенн ЦАР. На последнем этапе после оценки угловых координат лучей и процедуры цифрового диаграммообразования происходила оценка вероятности битовой ошибки.

Установлено, что лучшей формой антенной решетки совместно с цифровой пространственной обработкой является кольцевая форма.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00125, <https://rscf.ru/project/23-21-00125/>.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-21-00125, <https://rscf.ru/project/23-21-00125/>.

Вклад авторов

И.В. Пешков – постановка целей и задач исследования, разработка методов обработки, проведение исследования.

Д.Н. Борисов – планирование исследования, научное редактирование статьи, интерпретация и обобщение результатов.

Authors' contributions

I.W. Peshkov – setting the goals and objectives of the study, development of processing methods, conducting research.

D.N. Borisov – research planning, scientific editing of the article, interpretation and generalization of the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Schelleng J.C., Burrows C.R., Ferrell E.B. Ultra-shortwave propagation. In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers (Proc. I.R.E.)*. 1933;21(3):427–463. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1933.227639>
- Anderson K. Radar measurements at 16.5 GHz in the oceanic evaporation duct. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1989;37(1):100–106. <https://doi.org/10.1109/8.192171>
- Иванов В.К., Шаляпин В.Н., Левадный Ю.В. Рассеяние ультракоротких радиоволн на тропосферных флуктуациях в приводном волноводе. *Известия вузов. Радиофизика*. 2009;52(4):307–317.
- Dinc E., Akan O.B. Beyond-line-of-sight communications with ducting layer. *IEEE Commun. Mag.* 2014;52(10):37–43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6917399>
- Ma J., Wang J., Yang C. Long-Range Microwave Links Guided by Evaporation Ducts. *IEEE Commun. Mag.* 2022;60(5):68–72. <https://doi.org/10.1109/MCOM.002.00508>
- Woods G.S., Ruxton A., Huddleston-Holmes C., Gigan G. High-Capacity, Long-Range, Over Ocean Microwave Link Using the Evaporation Duct. *IEEE J. Oceanic Eng.* 2009;34(3):323–330. <https://doi.org/10.1109/JOE.2009.2020851>
- Mentes Ş., Kaymaz Z. Investigation of Surface Duct Conditions over Istanbul, Turkey. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2007;46(3):318–337. <https://doi.org/10.1175/JAM2452.1>
- Пищин О.Н., Каламбацкая О.В. Особенности распространения радиоволн УВЧ диапазона в приземном и приводном тропосферном волноводе. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2019;4:115–121. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-4-115-121>
- Пищин О.Н. Анализ и экспериментальные исследования затухания радиосигнала систем сотовой подвижной радиосвязи над водной гладью. *Известия ЮФУ. Серия: Технические науки*. 2009;1:43–49.
- Hartree D.R., Michel J.G.L., Nicolson P. Practical methods for the solution of the equations of tropospheric refraction. In: *Meteorological Factors in Radio-Wave Propagation. Report of a Conference. The Physical Society and The Royal Meteorological Society*. 1947. P. 127–168.
- Дедов Н.М., Толстых В.Д., Серебряков М.А. Влияние тропосферных волноводов на работу радиолокатора над морской поверхностью. В сб.: *Актуальные проблемы деятельности подразделений уголовно-исполнительной системы: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции в 2-х т. Воронеж; 2020. Т. 1. С. 128–132*. <https://www.elibrary.ru/nptlot>
- Leontovich M.A., Fok V.A. Solution of propagation of electromagnetic waves along the Earth's surface by the method of parabolic equations. *J. Phys. USSR*. 1946;10(1):13–23.
- Ахияров В.В. Вычисление множителя ослабления при обратном рассеянии от земной поверхности методом параболического уравнения. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.1>
- Zhang P., Lu Bai, Wu Z., Guo L. Applying the parabolic equation to tropospheric groundwave propagation: A review of recent achievements and significant milestones. *IEEE Trans. Antennas Propag. Mag.* 2016;58(3):31–44. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2541620>
- Levy M. *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. London: IET; 2000. 336 p.
- Ozlem O., Gokhan A., Mustafa K., Levent S. PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain. *Computer Phys. Commun.* 2011;182(12):2638–2654. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2011.07.017>
- Sirkova I. Propagation Factor and Path Loss Simulation Results for Two Rough Surface Reflection Coefficients Applied to the Microwave Ducting Propagation Over the Sea. *Progress In Electromagnetics Research M. (PIERM)*. 2011;17:151–166. <http://doi.org/10.2528/PIERM11020602>
- Zeng Y., Blahak U., Neuper M., Jerger D. Radar Beam Tracing Methods Based on Atmospheric Refractive Index. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2014;31(12):2650–2670. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00152.1>
- Нечаев Ю.Б., Пешков И.В. Исследование цифрового диаграммообразования для оптимального помехо- и шумоподавления в антенных решетках различной формы с направленными излучателями. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2022;25(2):73–82. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.73-82>
- Schmidt R.O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1986;AP-34(3):276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>
- Balanis C., Ioannides P. *Introduction to Smart Antennas*. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers; 2007. 174 p.

22. Dinc E., Akan O.B. Channel Model for the Surface Ducts: Large-Scale Path-Loss, Delay Spread, and AOA. *IEEE Trans. Antennas and Propag.* 2015;63(6):2728–2738. <http://doi.org/10.1109/TAP.2015.2418788>
23. Nechaev Y.B., Peshkov I.W. Simulation of Digital and Analog Spatial Filtering of VHF Signals in Channel with Losses due to Multiple Diffraction. In: *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2022. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF53456.2022.9744371>

REFERENCES

1. Schelleng J.C., Burrows C.R., Ferrell E.B. Ultra-shortwave propagation. In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers (Proc. I.R.E.)*. 1933;21(3):427–463. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1933.227639>
2. Anderson K. Radar measurements at 16.5 GHz in the oceanic evaporation duct. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1989;37(1):100–106. <https://doi.org/10.1109/8.192171>
3. Ivanov V.K., Shalyapin V.N., Levadny Y.V. Microwave scattering by tropospheric fluctuations in an evaporation duct. *Radiophys. Quantum. El.* 2009;52(4):277–286. <https://doi.org/10.1007/s11141-009-9133-z>
[Original Russian Text: Ivanov V.K., Shalyapin V.N., Levadny Y.V. Microwave scattering by tropospheric fluctuations in an evaporation duct. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika*. 2009;52(4):307–317 (in Russ.).]
4. Dinc E., Akan O.B. Beyond-line-of-sight communications with ducting layer. *IEEE Commun. Mag.* 2014;52(10):37–43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6917399>
5. Ma J., Wang J., Yang C. Long-Range Microwave Links Guided by Evaporation Ducts. *IEEE Commun. Mag.* 2022;60(5):68–72. <https://doi.org/10.1109/MCOM.002.00508>
6. Woods G.S., Ruxton A., Huddleston-Holmes C., Gigan G. High-Capacity, Long-Range, Over Ocean Microwave Link Using the Evaporation Duct. *IEEE J. Oceanic Eng.* 2009;34(3):323–330. <https://doi.org/10.1109/JOE.2009.2020851>
7. Mentis Ş., Kaymaz Z. Investigation of Surface Duct Conditions over Istanbul, Turkey. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2007;46(3):318–337. <https://doi.org/10.1175/JAM2452.1>
8. Pishchin O.N., Kalambatskaya O.V. Characteristics of UHF waves distribution in land and water surface tropospheric waveguide. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;4:115–121 (in Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-4-115-121>
9. Pishchin O.N. The analysis and experimental researches of attenuation of a radio signal of systems of a cellular mobile radio communication above a water smooth surface. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki (Izvestiya YuFU. Seriya: tekhnicheskie nauki) = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2009;1:43–49 (in Russ.).
10. Hartree D.R., Michel J.G.L., Nicolson P. Practical methods for the solution of the equations of tropospheric refraction. In: *Meteorological Factors in Radio-Wave Propagation. Report of a Conference. The Physical Society and The Royal Meteorological Society*. 1947. P. 127–168.
11. Dedov N.M., Tolstykh V.D., Serebryakov M.A. The influence of tropospheric ducts on the radar operation over the sea surface. In: *Actual Problems of the Activities of Departments of the Penal System: Collection of Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference: in 2 v. Voronezh*; 2020. P. 128–132 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/nptlot>
12. Leontovich M.A., Fok V.A. Solution of propagation of electromagnetic waves along the Earth's surface by the method of parabolic equations. *J. Phys. USSR*. 1946;10(1):13–23.
13. Akhiyarov V.V. Attenuation factor calculation for backscattering from the terrain using the parabolic equation technique. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2019;11 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.1>
14. Zhang P., Lu Bai, Wu Z., Guo L. Applying the parabolic equation to tropospheric groundwave propagation: A review of recent achievements and significant milestones. *IEEE Trans. Antennas Propag. Mag.* 2016;58(3):31–44. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2541620>
15. Levy M. *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. London: IET; 2000. 336 p.
16. Ozlem O., Gokhan A., Mustafa K., Levent S. PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain. *Computer Phys. Commun.* 2011;182(12):2638–2654. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2011.07.017>
17. Sirkova I. Propagation Factor and Path Loss Simulation Results for Two Rough Surface Reflection Coefficients Applied to the Microwave Ducting Propagation Over the Sea. *Progress In Electromagnetics Research M. (PIERM)*. 2011;17:151–166. <http://doi.org/10.2528/PIERM11020602>
18. Zeng Y., Blahak U., Neuper M., Jerger D. Radar Beam Tracing Methods Based on Atmospheric Refractive Index. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2014;31(12):2650–2670. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00152.1>
19. Nechaev Y.B., Peshkov I.V. Study of digital diagram formation for optimum interference and noise reduction in antenna arrays of different shapes with directional radiators. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2022;25(2):73–82 (in Russ.). <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.73-82>
20. Schmidt R.O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1986;AP-34(3):276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>
21. Balanis C., Ioannides P. *Introduction to Smart Antennas*. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers; 2007. 174 p.
22. Dinc E., Akan O.B. Channel Model for the Surface Ducts: Large-Scale Path-Loss, Delay Spread, and AOA. *IEEE Trans. Antennas and Propag.* 2015;63(6):2728–2738. <http://doi.org/10.1109/TAP.2015.2418788>

23. Nechaev Y.B., Peshkov I.W. Simulation of Digital and Analog Spatial Filtering of VHF Signals in Channel with Losses due to Multiple Diffraction. In: *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2022. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF53456.2022.9744371>

Об авторах

Пешков Илья Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, кафедра физики, радиотехники и электроники, ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина» (399770, Россия, Елец, ул. Коммунаров, д. 28). E-mail: ilvpeshkov@gmail.com. Scopus Author ID 7003332128, ResearcherID L-6734-2013, SPIN-код РИНЦ 8009-4805, <https://orcid.org/0000-0001-8370-6954>

Борисов Дмитрий Николаевич, к.т.н. доцент, заведующий кафедрой информационных систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (394018, Россия, Воронеж, Университетская пл., д. 1). E-mail: borisov@sc.vsu.ru. Scopus Author ID 54901090900, ResearcherID J-5289-2014, SPIN-код РИНЦ 6556-0285, <https://orcid.org/0000-0002-1265-7195>

About the authors

Ilya W. Peshkov, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Physics, Radio Engineering and Electronics, Bunin Yelets State University (28, Kommunarov ul., Yelets, 399770 Russia). E-mail: ilvpeshkov@gmail.com. Scopus Author ID 7003332128, ResearcherID L-6734-2013, RSCI SPIN-code 8009-4805, <https://orcid.org/0000-0001-8370-6954>

Dmitry N. Borisov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Information systems, Voronezh State University (1, Universitetskaya pl., Voronezh, 394018 Russia). E-mail: borisov@sc.vsu.ru. Scopus Author ID 54901090900, ResearcherID J-5289-2014, RSCI SPIN-code 6556-0285, <https://orcid.org/0000-0002-1265-7195>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.314.6; 621.373.5
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-103-114>
EDN UORVPM



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Резонансный источник электропитания для мощных сверхвысокочастотных устройств

Д.Р. Хафизов^{1, 2, @},
И.Н. Лобов¹,
Л.Ю. Фетисов²

¹ НПО «Алмаз», Москва, 125190 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: hafizov98@yandex.ru

Резюме

Цели. Постоянно растущие требования к техническим параметрам радиопередающих сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств вызывают необходимость искать способы повышения их эффективности и надежности, а также уменьшения массогабаритных показателей. Эти требования в значительной мере касаются источников вторичного электропитания. Целью данной работы является разработка источников вторичного электропитания цепей накала и смещения для пролетного многолучевого клистрона, способных работать под высоким потенциалом катода клистрона и обеспечивать стабильное напряжение во всех рабочих режимах.

Методы. Для расчета параметров резонансного контура использован метод аппроксимации первой гармоники.

Результаты. Описан метод разработки источников вторичного электропитания, разработаны источники питания накала и смещения для пролетного многолучевого клистрона. Представлен метод расчета и апробирована конструкция обмоток трансформатора, позволяющие отказаться от использования дросселей как отдельных элементов путем их интеграции внутри одной магнитной системы и обеспечить развязку по высокому потенциалу вторичной обмотки. Проведены испытания источника питания в составе комплексного испытательного моделирующего стенда, получены осциллограммы основных параметров. Показана работа источника питания в режиме переключения при нулевом напряжении для минимального, номинального и максимального входного напряжения в области с индуктивным сопротивлением контура, когда фаза напряжения опережает фазу тока.

Выводы. Коэффициенты полезного действия источников накала и смещения составили 85% и 92% соответственно. Разработанные источники имеют меньшие габариты по сравнению с трансформаторными аналогами и позволяют поддерживать стабильное выходное напряжение при изменении входного напряжения, а использование метода плавного пуска позволит продлить срок службы клистрона.

Ключевые слова: преобразователь напряжения, резонансный преобразователь, электропитание СВЧ-устройств, импульсный трансформатор, клистрон

• Поступила: 11.02.2024 • Доработана: 14.06.2024 • Принята к опубликованию: 11.12.2024

Для цитирования: Хафизов Д.Р., Лобов И.Н., Фетисов Л.Ю. Резонансный источник электропитания для мощных сверхвысокочастотных устройств. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):103–114. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-103-114>, <https://elibrary.ru/UORVPM>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Resonant power supply for high-power microwave devices

Damir R. Hafizov^{1, 2, @},
Ilya N. Lobov¹,
Leonid Y. Fetisov²

¹ NPO "Almaz", Moscow, 125190 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: hafizov98@yandex.ru

Abstract

Objectives. The ever-increasing demands on the technical parameters of microwave radio transmission devices necessitate a search for ways of improving their efficiency and reliability, as well as means for reducing their weight and size parameters. Since such requirements largely relate to secondary power supplies, the present work set out to develop secondary power supplies for the cathode heating and bias circuits of a floating-drift multibeam klystron capable of operating at a high potential of the klystron cathode and providing stable voltage in all operating modes.

Methods. In order to calculate the parameters of the resonant circuit, the first harmonic approximation method is used.

Results. Approaches for designing secondary supplies are described along with the method for developing the cathode heating and bias supplies for a floating-drift multipath klystron. The calculation method used for testing the design of the transformer windings is presented. The design avoids the use of chokes as separate elements by integrating them inside a magnetic system and providing isolation by high potential of the secondary winding. The results of testing the power supply using complex test bench waveforms are given along with the main obtained parameters. The operation of the power supply is demonstrated in switching mode at zero voltage for the minimum, nominal, and maximum input voltages in the range of the inductive resistance of the circuit when the voltage phase precedes the current phase.

Conclusions. The calculated efficiencies of the presented cathode heating and bias supplies are 85% and 92%, respectively. The developed supplies, which have smaller dimensions than their transformer analogues, allow a stable output voltage to be maintained when the input voltage varies, while the use of the soft start method allows the life of the klystron to be extended.

Keywords: voltage converter, resonant converter, power supply of microwave devices, pulse transformer, klystron

• Submitted: 11.02.2024 • Revised: 14.06.2024 • Accepted: 11.12.2024

For citation: Hafizov D.R., Lobov I.N., Fetisov L.Y. Resonant power supply for high-power microwave devices. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):103–114. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-103-114>, <https://elibrary.ru/UORVPM>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Клистроны и лампы бегущей волны – мощные усилительные сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы, в которых происходит преобразование электронного потока в энергию СВЧ-колебаний [1]. Эти устройства используются в качестве выходного усилителя мощности в радиопередающей аппаратуре [2–4]. Постоянно растущие требования к техническим параметрам радиопередающих СВЧ-устройств вызывают необходимость искать способы повышения их эффективности и надежности, а также уменьшения массогабаритных показателей. Эти требования в значительной мере касаются источников вторичного электропитания.

В настоящее время в источниках электропитания СВЧ-устройств применяют сетевые трансформаторы, работающие на частотах 50 и 400 Гц. Существенным недостатком таких источников питания являются их большие габаритные размеры, которые определяются размерами и массой составных частей. Они состоят из сетевых трансформаторов, фильтров и стабилизаторов напряжения. Стабилизаторы напряжения используются для поддержания высокого уровня стабильности выходного напряжения во вторичной цепи при некотором уменьшении КПД источника.

В настоящий момент наиболее популярными являются импульсные источники питания. Стабилизация напряжения в таких источниках обеспечивается с помощью схемы управления, которая регулирует передачу мощности в трансформатор на первичной стороне, а использование импульсного трансформатора позволяет снизить габариты всего устройства. Высокочастотные импульсные трансформаторы способны работать на частотах более 10^5 Гц. Более того, в сравнении с сетевым трансформатором, масса и размер импульсного трансформатора значительно меньше при одинаковой габаритной мощности сердечника трансформатора.

В основе импульсных источников питания используются широтно-импульсные (ШИМ) преобразователи, которые преобразуют выпрямленное сетевое напряжение в прямоугольное импульсное, а регулировка выходного напряжения в таких преобразователях осуществляется изменением длительности импульсов. Для ШИМ-преобразователей

характерны скачкообразное изменение токов и напряжений, что вызывает большие потери при переключении и ограничивает верхнюю рабочую частоту преобразователя, а большие скорости изменения токов и напряжений создают электромагнитные помехи в широкой области спектра, что является препятствием для использования импульсных источников электропитания мощных СВЧ-устройств [5].

Целью данной работы является разработка источников вторичного электропитания цепей накала и смещения для пролетного многолучевого клистрона, способных работать под высоким потенциалом катода клистрона порядка 25 кВ.

РЕЗОНАНСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Избавиться от вышеуказанных недостатков позволяет источник электропитания с резонансным преобразователем. Его особенность заключается в том, что за счет использования в преобразователе LC-контура форма выходного напряжения близка к синусоидальной, что позволяет значительно снизить уровень помех по сравнению с ШИМ-преобразователями [5, 6]. При этом использование резонансного контура позволяет реализовать метод переключения транзисторов при нуле напряжения, когда ток в контуре по фазе отстает от напряжения, позволяя значительно уменьшить потери при коммутации [7]. Существуют различные топологии резонансных преобразователей, однако, принцип работы у них схожий [8].

В статье рассматривается последовательно-параллельный LLC-преобразователь [9]. Последовательно-параллельный резонансный преобразователь является предпочтительной топологией при разработке источников высокого напряжения благодаря возможности мягкого переключения в широком диапазоне рабочих частот [10]. Схема полумостового резонансного LLC-преобразователя представлена на рис. 1.

Схема состоит из источника входного напряжения V_{in} , транзисторов VT1 и VT2, соединенных по полумостовой схеме, резонансного конденсатора C_r , последовательной индуктивности L_r , трансформатора T с коэффициентом трансформации n и параллельной катушки индуктивности L_{sh}

(индекс «sh» – от англ. shunt – шунт). На практике параллельная индуктивность как отдельный физический элемент может быть исключена из схемы. Это реализуется за счет использования собственной индуктивности намагничивания трансформатора L_m , необходимое значение которой достигается введением воздушного зазора в сердечнике трансформатора, о чем будет рассказано далее. Напряжение на вторичной обмотке выпрямляется диодами VD1 и VD2, после чего поступает на емкостный сглаживающий фильтр, образованный конденсатором C1 и резистором R1 в качестве эквивалента выходной нагрузки. При больших значениях тока вторичной обмотки применяют синхронные выпрямители, где в качестве выпрямителя напряжения используют полевые МОП-транзисторы¹. Благодаря малому сопротивлению канала «сток-исток» такие выпрямители являются более эффективными по сравнению с диодами [11]. Для ограничения бросков тока при включении используют метод плавного пуска [12, 13].

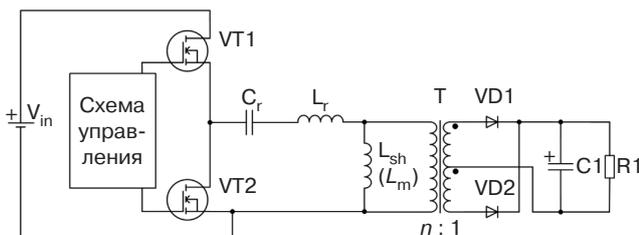


Рис. 1. Схема полумостового резонансного LLC-преобразователя. Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81²

В резонансном контуре ток отстает от напряжения, что позволяет транзисторам переключаться при нулевом напряжении, в то время как ток протекает через антипараллельный диод транзистора [14]. Синусоидальное напряжение через трансформатор подводится к нагрузке. Регулировка выходного напряжения осуществляется изменением рабочей частоты переключения транзисторов, при этом изменяется режим работы преобразователя.

Ввиду наличия как последовательных, так и параллельных компонент преобразователь имеет нижнюю и верхнюю резонансные частоты [15]. Нижняя частота обусловлена элементами L_r , C_r и величиной L_m , а верхняя – элементами L_r и C_r .

¹ Металл-оксид-полупроводник. [Metal-oxide-semiconductor.]

² 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.).]

РАСЧЕТ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА

Для расчета используется метод аппроксимации первой гармоники [16]. Проведем расчет параметров источника электропитания накала. Питание источника осуществляется от сети 220 В ± 10% с частотой 400 Гц. Выходное напряжение источника равно (13 ± 0.5) В, номинальный ток – 12 А, максимальный ток – не более 15 А. Коэффициент трансформации n при номинальном входном напряжении определяется при значении коэффициента передачи контура M равным единице.

$$n = M \frac{V_{in} / 2}{V_{out}} = 12, \quad (1)$$

где номинальное входное напряжение $V_{in} = 311$ В, а выходное напряжение $V_{out} = 13$ В.

Эквивалентное сопротивление нагрузки определяется как:

$$R_{ac} = \frac{8n^2 V_{out}}{\pi^2 I_{out}} = 126 \text{ Ом}, \quad (2)$$

индекс «ac» – сокращение от англ. alternating current (переменный ток).

Для определения максимального и минимального коэффициентов передачи используют следующие выражения:

$$M_{min} = \frac{n V_{out_min}}{V_{in_max} / 2} = 0.87, \quad (3)$$

$$M_{max} = \frac{n V_{out_max}}{V_{in_min} / 2} = 1.15, \quad (4)$$

где $V_{out_min} = 12.5$ В, $V_{out_max} = 13.5$ В, $V_{in_min} = 279$ В, $V_{in_max} = 341$ В.

Резонансная частота контура определяется выражением:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}}. \quad (5)$$

Выбор рабочей частоты источника электропитания осуществляется исходя из технических условий на конструирование источника для радиолокационной станции и не может превышать 100 кГц.

Значение резонансной частоты выбирается так, чтобы емкость резонансного конденсатора была равной или кратной стандартному значению, например, из ряда E24. Резонансная частота выбрана $f_r = 80$ кГц.

Значение емкости конденсатора C_r определяют по следующей формуле:

$$C_r = \frac{1}{2\pi Q R_{ac}} = 22 \text{ нФ}, \quad (6)$$

где добротность контура $Q = 0.7$, частота переключений $f = 80$ кГц.

Значение добротности подбирают исходя из максимального и минимального коэффициентов передачи. Для этого на одном графике строят несколько передаточных характеристик с разным значением Q . На этом графике проводят горизонтальные прямые, соответствующие максимальному M_{max} и минимальному M_{min} коэффициентам передачи. Среди построенных кривых коэффициента передачи выбирают такую, которая пересекает обе горизонтальные прямые в выбранном диапазоне частот.

Большое значение Q приводит к уменьшению пикового коэффициента передачи. Для гарантированного обеспечения режима переключения при нуле напряжения во всем рабочем диапазоне частот необходимо обеспечить запас около 15% от пикового коэффициента передачи. Поэтому оптимальным значением является $Q = 0.7$.

Расчет индуктивности L_r проводят по формуле:

$$L_r = \frac{1}{(2\pi f)^2 C_r} = 181 \text{ мкГн}. \quad (7)$$

Для упрощения расчета индуктивности L_m и L_r объединяют в один параметр общей индуктивности. Соотношение для общей индуктивности определяют так:

$$L_n = \frac{L_m}{L_r}. \quad (8)$$

Величина L_n подбирается путем построения кривых коэффициента передачи контура при различных значениях L_n . С уменьшением L_n увеличивается пиковый коэффициент передачи. Уменьшение L_n приводит к уменьшению индуктивности намагничивания и увеличению тока намагничивания, поэтому оптимальным значением является $L_n = 3 \dots 7$. В расчете используется значение $L_n = 3$ и значение индуктивности намагничивания $L_m = 543$ мкГн.

Используя следующее выражение, можно провести анализ изменений передаточной характеристики при изменении параметров резонансного контура:

$$M = \left| \frac{L_n f_n^2}{[(L_n + 1)f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1)f_n Q L_n]} \right|, \quad (9)$$

где f_n – отношение частоты переключений f к резонансной частоте контура f_r ,

$$f_n = \frac{f}{f_r}. \quad (10)$$

При известных значениях L_r , C_r и R_{ac} добротность контура определяется как:

$$Q = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{R_{ac}}. \quad (11)$$

С использованием приведенных формул получены графики передаточных характеристик преобразователя при разных значениях добротности контура (рис. 2).

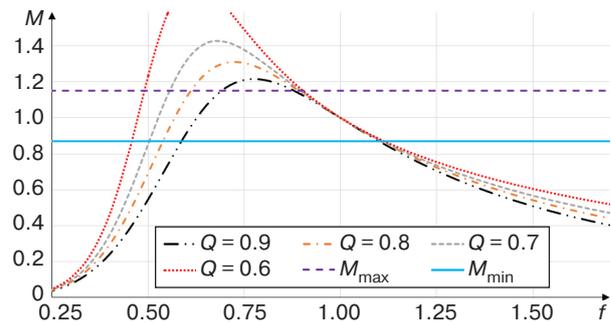


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи от добротности контура (текущая частота нормирована относительно резонансной частоты)

В зависимости от того, в какой области передаточной характеристики работает преобразователь, можно реализовать различные режимы работы с коммутацией: при нулевом токе и при нулевом напряжении [17]. Если рабочая частота преобразователя находится левее пикового коэффициента M , преобразователь работает в области, где емкостное сопротивление преобразователя является основным. При работе на емкостную нагрузку ток в контуре будет опережать напряжение, и реализуется режим переключения при нулевом токе. Работа в этой области приводит к большим потерям, т.к. транзисторы переключаются в жестких условиях. Если рабочая частота преобразователя находится правее пикового коэффициента M , то в этом случае доминирующим является индуктивное сопротивление. При работе в индуктивной области напряжение в контуре опережает ток. В этой рабочей области реализуется режим переключения при нуле напряжения, позволяющий транзисторам переключаться с минимальными потерями. Следовательно, оптимальная рабочая область преобразователя находится правее пикового коэффициента M .

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Резонансный контур состоит из трех электромагнитных компонентов: трансформатора T , параллельной катушки индуктивности L_{sh} (L_m) и последовательной катушки индуктивности L_r . Каждый

из них выполняется на отдельном сердечнике (магнитопроводе). Наиболее рациональным будет интегрировать указанные компоненты внутри одной магнитной системы на основе трансформатора. Возможность объединения компонентов внутри одной магнитной системы обоснована эквивалентной схемой двухобмоточного трансформатора, в которой выходная нагрузка приведена к первичной обмотке [18]. Индуктивность L_r может быть заменена индуктивностью рассеяния первичной обмотки L_{S1} ³, а параллельная индуктивность L_{sh} может быть заменена индуктивностью намагничивания трансформатора L_m [19].

Для корректной работы схемы с возможностью реализации переключения при нулевом напряжении необходимо учесть, что индуктивность намагничивания должна находиться в пределах $(3...8)L_r$, что достигается введением немагнитного зазора в трансформаторе. В расчете использован сердечник N87 Ercos, типоразмер ER 42/22/15, магнитная проницаемость $\mu = 2200$, индукция насыщения (сатурации) $B_s = 0.49$ Тл.

Индуктивность намагничивания для трансформаторов с зазором определяется следующим образом [20]:

$$L_m = \frac{\mu_{\text{eff}} \mu_0 N_1^2 S_c}{l_{\text{av}}}, \quad (12)$$

где μ_{eff} – эффективная магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная постоянная, N_1 – число витков первичной обмотки, S_c – площадь сечения магнитопровода (индекс «с» – от англ. core – сердечник), l_{av} – длина средней линии магнитопровода.

Эффективная магнитная проницаемость – это магнитная проницаемость материала сердечника с зазором, которая определяется так:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{l_g}{l_{\text{av}}}}, \quad (13)$$

где μ – магнитная проницаемость материала, l_g – длина немагнитного зазора (индекс «g» – от англ. gap – зазор).

Число витков первичной обмотки определяют по формуле:

$$N_1 = \frac{n(V_{\text{out}} + V_f)}{2f_{\text{min}} M_{\text{min}} B S_c} = 20, \quad (14)$$

где прямое падение напряжения на диоде выпрямителя $V_f = 0.6$ В, минимальная рабочая частота

³ L_{S1} – индуктивность рассеяния (индекс «s» – сокращение от англ. scattering – рассеяние) первичной обмотки (1).

$f_{\text{min}} = 72$ кГц, значение максимальной индукции $B = 0.4$ Тл.

Минимальная рабочая частота f_{min} определяется с использованием графика (рис. 2).

Значение максимальной индукции определяется исходя из значения индукции насыщения сердечника по следующей формуле:

$$B = 0.8B_s = 0.4 \text{ Тл.} \quad (15)$$

С учетом коэффициента трансформации число витков вторичной обмотки $N_2 = 2$.

Подставив (13) в (12), вычисляем величину немагнитного зазора для получения необходимой индуктивности намагничивания:

$$l_g = \frac{\mu \mu_0 N_1^2 S_c - l_{\text{av}} L_m}{\mu L_m} = 0.11 \text{ мм}, \quad (16)$$

где площадь сечения магнитопровода $S_c = 170$ мм², длина средней линии магнитопровода $l_{\text{av}} = 99$ мм.

Индуктивность рассеяния первичной обмотки представляет собой часть индуктивности, которая не связана общим магнитным потоком со вторичной обмоткой и магнитопроводом, а магнитный поток замыкается через воздух. Для Ш- и П-образных магнитопроводов индуктивность рассеяния может быть рассчитана по формуле для катушки индуктивности без магнитного сердечника:

$$L_{S1} = \frac{\mu_0 N_1^2 S_{i.s.}}{h_w}, \quad (17)$$

где $S_{i.s.}$ – (индекс «i.s.» – от англ. inductive system – индуктивная система) – эффективная площадь, охватываемая током, не являющаяся площадью магнитопровода, h_w – высота обмотки (индекс «w» – от англ. winding – обмотка).

Эффективная площадь определяется соотношением:

$$S_{i.s.} = l_{w1_av} \delta_{w1}, \quad (18)$$

где l_{w1_av} – средняя длина витка первичной обмотки, δ_{w1} – расстояние от среднего витка первичной обмотки до магнитопровода.

Соотношения (17) и (18) показывают, что для увеличения индуктивности рассеяния необходимо разнести первичную и вторичную обмотки на каркасе трансформатора, увеличивая число витков обмотки и ее толщину, а также уменьшая длину обмотки на магнитопроводе.

Индуктивность рассеяния, близкая к расчетной, может быть получена при использовании секционного способа намотки, показанного на рис. 3.

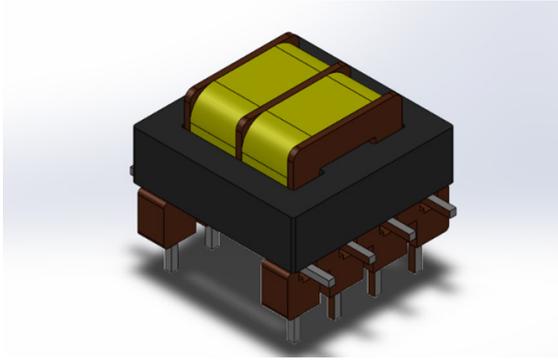


Рис. 3. Расположение обмоток
накального трансформатора

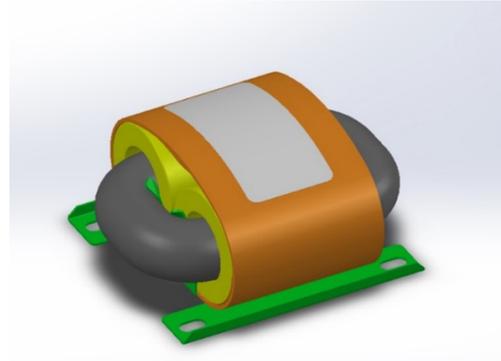


Рис. 4. Пример компоновки высоковольтного
трансформатора для источника электропитания цепи
смещения клистрона

В отличие от способа намотки, когда первичная и вторичная обмотки послойно наматываются по всей длине каркаса, секционный метод позволяет получить наибольшее значение индуктивности рассеяния.

Выполнив намотку трансформатора необходимо проверить, чтобы индуктивность первичной обмотки совпадала со значением полной индуктивности $L_m + L_r$. В случае если оно отличается от расчетного, то разброс можно скомпенсировать, отрегулировав величину зазора в сердечнике. На следующем этапе необходимо проверить, чтобы полученное значение индуктивности рассеяния отличалось от расчетного не более чем на 10%. Для этого замыкают все выходные обмотки между собой и измеряют индуктивность первичной обмотки. Если измеренное значение отличается от расчетного более чем на 10%, то трансформатор необходимо изготовить заново. В случае, если все параметры соответствуют расчетным значениям, то такой трансформатор пригоден для использования.

Метод секционной намотки первичной и вторичной обмотки пригоден для получения относительно небольших уровней выходного напряжения, однако, он неприменим для получения больших напряжений, которые требуются от источников смещения. В источниках смещения выходное напряжение может варьироваться от единиц до десятков киловольт, и обеспечение электрической прочности при таких напряжениях является первостепенной задачей.

Для получения высоких уровней напряжения используют П-образный сердечник, а первичная и вторичная обмотки разносятся друг от друга на некоторое расстояние. Первичная и вторичная обмотки закрепляются на противоположных стрижнях сердечника, а вторичная обмотка разбивается на отдельные секции. После того как намотка завершена обмотки трансформатора заливаются изоляционным компаундом (рис. 4).

ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННОГО ИСТОЧНИКА

Согласно описанному методу, были разработаны источники питания накала и смещения для пролетного многолучевого клистрона.

Источник цепи накала имеет следующие параметры: напряжение накала $U_n = 13$ В, ток накала номинальный $I_n = 12$ А, емкость резонансного конденсатора $C_r = 22$ нФ, резонансная индуктивность $L_r = 182$ мкГн, резонансная частота $f_r = 80$ кГц. В источнике реализован метод плавного пуска, позволяющий увеличить срок службы клистрона.

Источник смещения клистрона обеспечивает напряжение $U_{см} = 6$ кВ, ток смещения не более $I_{см} = 100$ мА, резонансную частоту $f_r = 80$ кГц, емкость резонансного конденсатора $C_r = 68$ нФ, резонансную индуктивность $L_r = 58$ мкГн.

Сложность разработки таких источников заключается в обеспечении электрической прочности трансформатора по высокому потенциалу вторичной обмотки, находящейся под потенциалом катода около 25 кВ. Для этого трансформатор заливают компаундом. В случае с накальным трансформатором вторичная обмотка выполнена проводом ПВМК⁴ для увеличения электрической прочности. Электрическая прочность изоляции между первичной и вторичной обмотками проверена на пробойной электроустановке при напряжении 30 кВ. Проведены измерения параметров источников. Ниже приведены осциллограммы, демонстрирующие работу преобразователя накала клистрона. На рис. 5 представлены осциллограммы работы преобразователя при номинальном входном напряжении сети: желтая линия (I) – напряжение на датчике тока сопротивлением 0.51 Ом (по вертикали – напряжение в масштабе 1 В/дел),

⁴ Провод высоковольтный монтажный с комбинированной изоляцией.

зеленая линия (2) – напряжение на резонансном конденсаторе (по вертикали – напряжение в масштабе 150 В/дел), красная линия (3) – напряжение «сток-исток» верхнего транзистора VT1. По горизонтали указано время в масштабе 5 мкс/дел. Из представленных осциллограмм видно, что фаза напряжения опережает фазу тока, и контур работает в индуктивной области. Поскольку входное напряжение сети стабильно, преобразователь работает около резонансной частоты $f \approx 80$ кГц, что соответствует рассчитанным значениям. В таком режиме нет необходимости менять рабочую частоту, поскольку параметры преобразователя не зависят от потребляемой мощности.

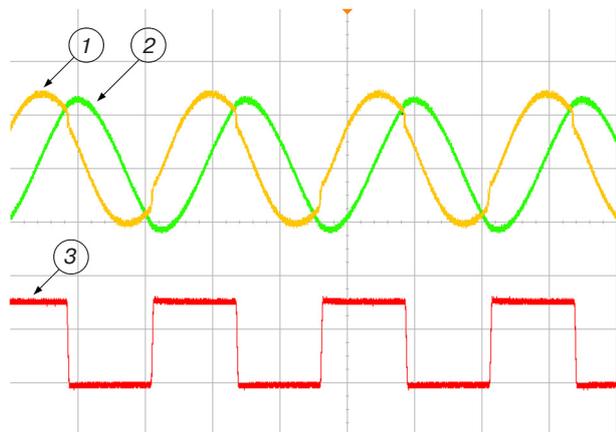


Рис. 5. Осциллограммы работы преобразователя при номинальном входном напряжении

На рис. 6 приведены осциллограммы переключения транзисторов и напряжение на датчике тока при входном напряжении сети 198 В. Красная (1) и желтая (2) линии – напряжения «сток-исток» верхнего VT1 и нижнего VT2 транзисторов соответственно (по вертикали – напряжение в масштабе 200 В/дел). Зеленая линия (3) – напряжение на датчике тока (по вертикали – напряжение в масштабе 2 В/дел). По горизонтали указано время в масштабе 5 мкс/дел.

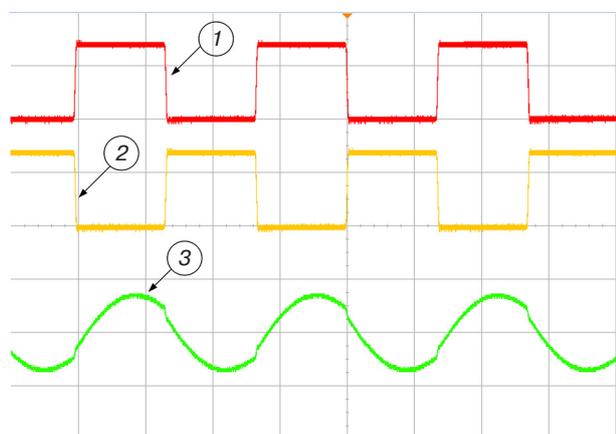


Рис. 6. Осциллограммы переключения транзисторов при минимальном входном напряжении

Аналогично рис. 6 на рис. 7 показана работа преобразователя при максимальном входном напряжении сети, что соответствует значению 242 В.

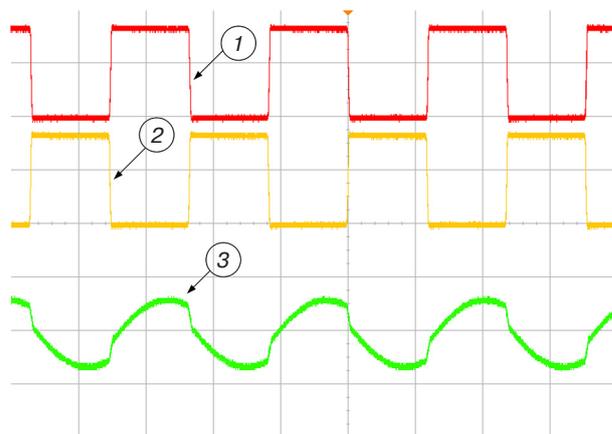


Рис. 7. Осциллограммы работы преобразователя при максимальном входном напряжении

При работе преобразователя с различными входными напряжениями во всех случаях реализуется режим переключения при нулевом напряжении, при этом выходное напряжение поддерживается на заданном уровне.

Процесс работы преобразователя можно разбить на четыре этапа.

1. Транзистор VT1 открывается, через резонансный контур протекает ток первичной обмотки трансформатора I_1 , возникает резонанс. При прекращении резонанса ток спадает до значения тока намагничивания I_m .
2. Транзистор VT1 закрывается. Ток намагничивания I_m продолжает течь через корпусный диод транзистора VT2.
3. Транзистор VT2 открывается, запасенная в конденсаторе C_r энергия создает ток I_1 в обратном направлении, ток намагничивания I_m пересекает нулевую точку и увеличивается в обратном направлении. Возникает резонанс. При прекращении резонанса ток спадает до значения тока намагничивания I_m .
4. Транзистор VT2 закрывается, ток намагничивания I_m продолжает течь через корпусный диод транзистора VT1. Транзистор VT1 открывается, и процесс повторяется.

На этапе 2 ток протекает через корпусный диод транзистора VT2, затем транзистор открывается, когда его напряжение «сток-исток» почти достигает нуля (переключение при нулевом напряжении). Аналогично транзистор VT1 переключается при нулевом напряжении на этапе 4.

Измеренный КПД источников накала и смещения составили 85% и 92% соответственно.

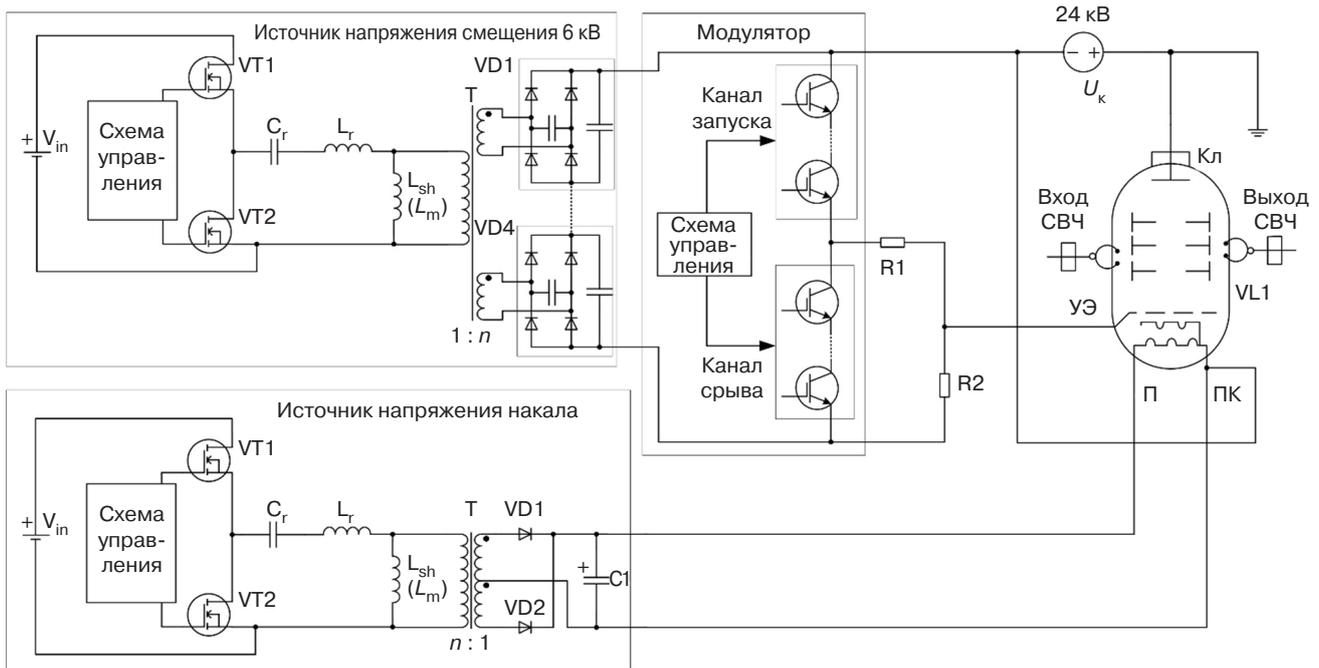


Рис. 8. Функциональная схема испытательного стенда

УЭ – управляющий электрод; П – подогреватель; ПК – подогреватель-катод; Кл – коллектор; VL1 – клистрон; R1 – резисторная сборка, ограничивающая ток; R2 – резисторная сборка «подтяжки» смещения; U_k – напряжение источника электропитания катода клистрона

Макет опытного образца резонансного источника электропитания прошел лабораторные испытания в составе комплексного испытательного моделирующего стенда радиопередающего устройства многофункциональной радиолокационной станции. Функциональная схема стенда показана на рис. 8.

В исходном состоянии на УЭ клистрона через резисторную сборку R2 подается напряжение смещения -6 кВ, клистрон заперт. Напряжение на УЭ относительно коллектора -30 кВ является суммой напряжений последовательно соединенных источников электропитания катода и смещения. По управляющему импульсу в модуляторе открывается канал запуска, клистрон открывается и усиливает входной СВЧ-сигнал. Напряжение на УЭ относительно коллектора составляет -24 кВ. По окончании управляющего импульса канал запуска закрывается, открывается канал срыва, на УЭ относительно коллектора подается напряжение -30 кВ, клистрон закрывается. Описанный процесс изображен на осциллограмме рис. 9.

Красной линией показано напряжение на УЭ относительно коллектора клистрона (по вертикали – напряжение в масштабе 5 кВ/дел). Фиолетовой линией показана огибающая выходного СВЧ-сигнала (по вертикали – напряжение в масштабе 5 В/дел). По горизонтали указано время в масштабе 2 мкс/дел.

Из представленных осциллограмм видно, что, когда клистрон заперт, напряжение на УЭ

составляет -29.75 кВ и стабильно держится на заданном уровне. Выходная СВЧ-мощность клистрона также стабильна и соответствует номинальной паспортной мощности. Таким образом, можно заключить, что разработанные источники могут быть применены в опытных образцах радиопередающих устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен метод разработки источников вторичного электропитания для электровакуумного СВЧ-усилителя. Приведены теория и метод расчета резонансного LLC-источника. Представлен и опробован метод расчета и намотки трансформатора, позволяющий отказаться от использования дросселей как отдельных элементов путем их интеграции внутри одной магнитной системы и обеспечивающий развязку по высокому потенциалу вторичной обмотки.

Проведены испытания источника питания в составе комплексного испытательного моделирующего стенда радиопередающего устройства. Получены осциллограммы работы преобразователя источника электропитания накала при минимальном, номинальном и максимальном входном напряжении сети. Показано, что источник работает в режиме переключения при нулевом напряжении в индуктивной области. КПД источников накала и смещения составили 85% и 92% соответственно.

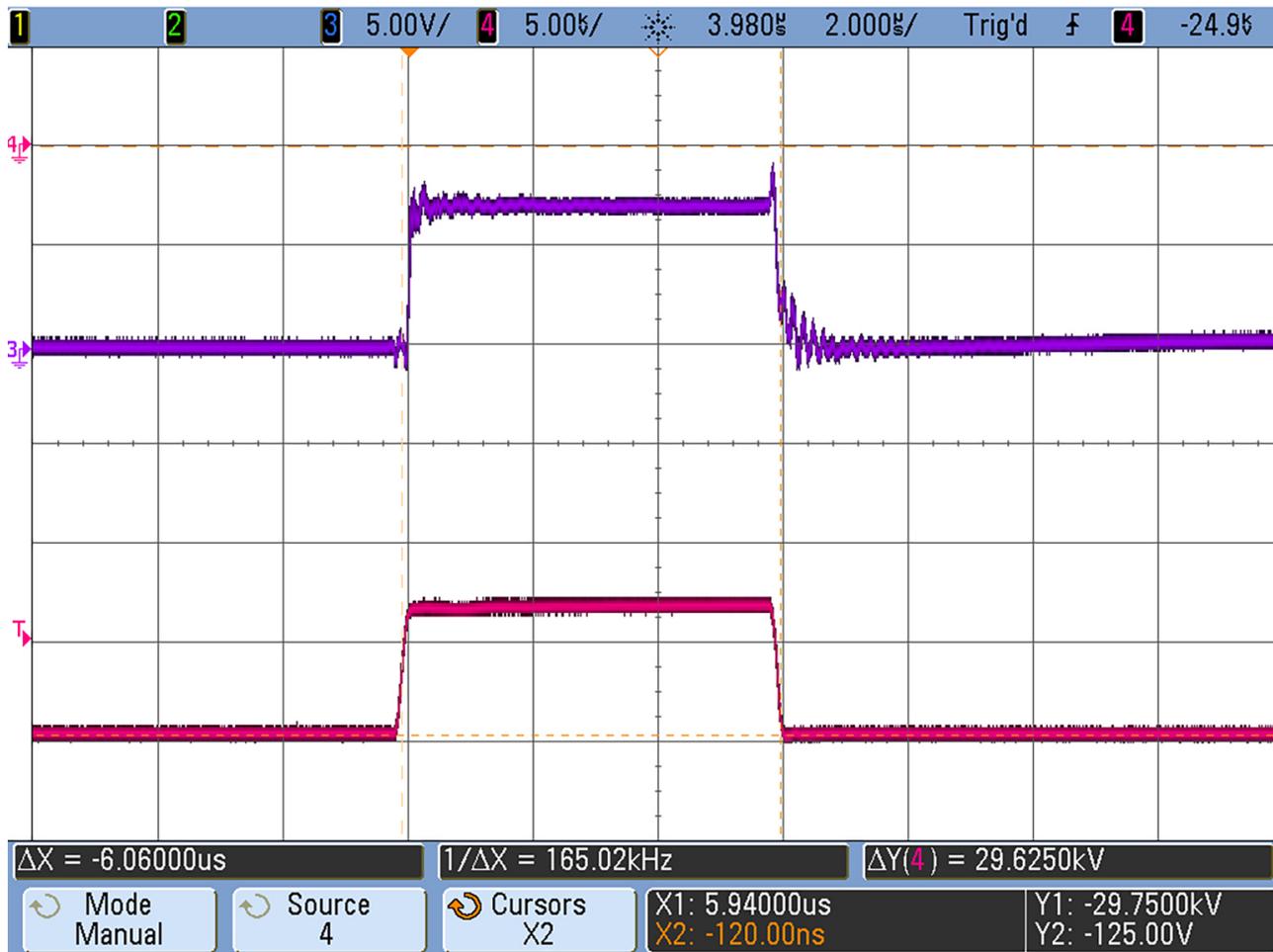


Рис. 9. Процесс работы клистрона

Разработанные источники имеют меньшие габариты по сравнению с трансформаторными аналогами и позволяют поддерживать стабильное выходное напряжение при изменении входного напряжения, а использование метода плавного пуска позволит продлить срок службы клистрона.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All authors have equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суходолец Л.Г. *Мощные вакуумные СВЧ приборы*. Учебное пособие по изучению ЭВП СВЧ. М.: ИКАР; 2014. 272 с.
2. Заболотная С.В., Емельянов Е.В., Цыцарев А.Ю., Албутов А.Н. Система автоматизированного управления, защиты и контроля выходного усилителя передающего устройства многофункционального радиолокатора. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2017;2(14):70–76. <https://elibrary.ru/ysdqqr>
3. Лобов И.Н., Березин О.К. Высоковольтный импульсный модулятор для аппаратуры передающего устройства МФР. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2020;3(27):22–30. <https://www.elibrary.ru/attkk>
4. Баранов В.В., Лобов И.Н., Хафизов Д.Р. Высоковольтный импульсный модулятор для лампы бегущей волны радиопередающей аппаратуры МРЛС. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2023;2(38):55–62. <https://www.elibrary.ru/cqkgfd>
5. Зиновьев Г.С. *Основы силовой электроники. Часть 2*. Новосибирск: НГТУ; 2000. 197 с.
6. Полищук А. Высокоэффективные источники вторичного электропитания высокого напряжения для радиопередающих устройств СВЧ. *Силовая электроника*. 2004;2:66–70. <https://elibrary.ru/mvrpnb>
7. Lee S.-S., Moon G.-W. Full ZVS-Range Transient Current Buildup Half-Bridge Converter with Different ZVS Operations to Load Variation. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008;55(6):2557–2559. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.921239>

8. Steigerwald R.L. A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies. *IEEE Trans. Power Electron.* 1988;3(2): 174–182. <http://doi.org/10.1109/63.4347>
9. Zhang B., Zhao M., Huang P., Wang Q. Optimal design of GaN HEMT based high efficiency LLC converter. *Energy Rep.* 2022;8(5):1181–1190. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.276>
10. Zhang S., Li L., Zhao Z., Fan S., Wang C. Optimal trajectory based start-up control of LCC resonant converter for X-ray generator applications. *Energy Rep.* 2022;8(5):957–965. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.266>
11. Wei Y., Luo Q., Mantooth H.A. Synchronous Rectification for LLC Resonant Converter: An Overview. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021;36(6):7264–7280. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3040603>
12. Li N., Cao Y., Zhang Y., Li Z., Jiang L., Zhang X.P. Parameter optimization strategy of LLC converter soft start-up process based on a simplified numerical calculation model. *Energy Rep.* 2023;9(10):909–919. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.118>
13. Kucka J., Dujic D. Equal Loss Distribution in Duty-Cycle Controlled H-Bridge LLC Resonant Converters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021;36(5):4937–4941. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3028879>
14. Смирнова В. Высокоэффективный, компактный резонансный ZVS мостовой конвертер на основе 1200 В SiC-MOSFET. *Силовая электроника.* 2016;6(63):54–60. <https://www.elibrary.ru/xrngcd>
15. Новиков Ю., Соломатин М. Разработка полумостового резонансного преобразователя на основе IRS2795. *Электронные компоненты.* 2011;3:103–111.
16. Duerbaum T. First harmonic approximation including design constraints. In: *INTELEC – Twentieth International Telecommunications Energy Conference (Cat. No. 98CH36263)*. 1998. P. 321–328. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.1998.793519>
17. Скуто А., Гайто А. Выбор полумостового резонансного LLC-преобразователя и MOSFET первичной стороны. *Силовая электроника.* 2016;2(59):30–32. <https://elibrary.ru/waoxqt>
18. Семенов Б.Ю. *Силовая электроника от простого к сложному*. М.: СОЛОН-Пресс; 2005. 416 с.
19. Chen Q., Long X., Chen Y., Xu S., Chen W. The Structure and Its Leakage Inductance Model of Integrated LLC Transformer With Wide Range Value Variation. *CPSS Trans. Power Electron. Appl.* 2022;7(4):409–420. <https://doi.org/10.24295/CPSSPEA.2022.00037>
20. Хныков А.В. *Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания*. М.: СОЛОН-Пресс; 2004. 128 с.

REFERENCES

1. Sukhodolets L.G. *Moshchnye vakuurnye SVCh pribory (Powerful Vacuum Microwave Devices)*. Textbook on the Study of Microwave Vacuum Devices. Moscow: IKAR; 2014. 272 p. (in Russ.).
2. Zabolotnaya S.V., Emelyanov E.V., Tsytarev A.Yu., Albutov A.N. Automatic control, monitoring and protection system of multifunctional radar transmitter output amplifier. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald.* 2017;2(14):70–76 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ysdqqr>
3. Lobov I.N., Berezin O.K. A High-voltage pulse modulator for the MFR transmitter. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald.* 2020;3(27):22–30 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/attdkk>
4. Baranov V.V., Lobov I.N., Khafizov D.R. High-voltage pulse modulator for a traveling wave lamp of radio transmitting equipment MRL. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald.* 2023;2(38):55–62 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/cqkgfd>
5. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki (Fundamentals of Power Electronics)*. Part 2. Novosibirsk: NGTU; 2000. 197 p. (in Russ.).
6. Polishchuk A. Highly efficient sources of secondary high-voltage power supply for microwave radio transmitters. *Silovaya Elektronika.* 2004;2:66–70 (in Russ.). <https://elibrary.ru/mvrpnb>
7. Lee S.-S., Moon G.-W. Full ZVS-Range Transient Current Buildup Half-Bridge Converter with Different ZVS Operations to Load Variation. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008;55(6):2557–2559. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.921239>
8. Steigerwald R.L. A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies. *IEEE Trans. Power Electron.* 1988;3(2): 174–182. <http://doi.org/10.1109/63.4347>
9. Zhang B., Zhao M., Huang P., Wang Q. Optimal design of GaN HEMT based high efficiency LLC converter. *Energy Rep.* 2022;8(5):1181–1190. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.276>
10. Zhang S., Li L., Zhao Z., Fan S., Wang C. Optimal trajectory based start-up control of LCC resonant converter for X-ray generator applications. *Energy Rep.* 2022;8(5):957–965. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.266>
11. Wei Y., Luo Q., Mantooth H.A. Synchronous Rectification for LLC Resonant Converter: An Overview. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021;36(6):7264–7280. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3040603>
12. Li N., Cao Y., Zhang Y., Li Z., Jiang L., Zhang X.P. Parameter optimization strategy of LLC converter soft start-up process based on a simplified numerical calculation model. *Energy Rep.* 2023;9(10):909–919 <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.118>
13. Kucka J., Dujic D. Equal Loss Distribution in Duty-Cycle Controlled H-Bridge LLC Resonant Converters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021;36(5):4937–4941. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3028879>
14. Smirnova V. A highly efficient, compact resonant ZVS bridge converter based on a 1200 V SiC MOSFET. *Silovaya Elektronika.* 2016;6(63):54–60 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xrngcd>

15. Novikov Yu., Solomatin M. Development of a half-bridge resonant converter based on IRS2795. *Elektronnye komponenty*. 2011;3:103–111 (in Russ.).
16. Duerbaum T. First harmonic approximation including design constraints. In: *INTELEC – Twentieth International Telecommunications Energy Conference (Cat. No.98CH36263)*. 1998. P. 321–328. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.1998.793519>
17. Skuto A., Gaito A. The choice of a half-bridge resonant LLC converter and a MOSFET of the primary side. *Silovaya Elektronika*. 2016;2(59):30–32 (in Russ.). <https://elibrary.ru/waoxqt>
18. Semenov B.Yu. *Silovaya elektronika ot prostogo k slozhnomu (Power Electronics from Simple to Complex)*. Moscow: SOLON-Press; 2005. 416 p. (in Russ.).
19. Chen Q., Long X., Chen Y., Xu S., Chen W. The Structure and Its Leakage Inductance Model of Integrated LLC Transformer With Wide Range Value Variation. *CPSS Trans. Power Electron. Appl.* 2022;7(4):409–420. <https://doi.org/10.24295/CPSSPEA.2022.00037>
20. Khnykov A.V. *Teoriya i raschet transformatorov istochnikov vtorichnogo elektropitaniya (Theory and Calculation of Transformers of Secondary Power Supply Sources)*. Moscow: SOLON-Press; 2004. 128 p. (in Russ.).

Об авторах

Хафизов Дамир Ринатович, инженер, ПАО «НПО «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина (125190, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, д. 80, корп. 16); 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: hafizov98@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 3037-0537, <https://orcid.org/0009-0004-2662-0299>

Лобов Илья Николаевич, начальник отдела, ПАО «НПО «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина (125190, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, д. 80, корп. 16). E-mail: lobov.en@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0003-6741-825X>

Фетисов Леонид Юрьевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры наноэлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: fetisovl@yandex.ru. Scopus Author ID 26431336600, ResearcherID D-1163-2013, SPIN-код РИНЦ 9788-0680, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

About the authors

Damir R. Hafizov, Engineer, A.A. Raspletin NPO Almaz (80/16, Leningradskii pr., Moscow, 125190 Russia); Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: hafizov98@yandex.ru. RSCI SPIN-code 3037-0537, <https://orcid.org/0009-0004-2662-0299>

Ilya N. Lobov, Head of the Department, A.A. Raspletin NPO Almaz (80/16, Leningradskii pr., Moscow, 125190 Russia). E-mail: lobov.en@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0003-6741-825X>

Leonid Y. Fetisov, 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: fetisovl@yandex.ru. Scopus Author ID 26431336600, ResearcherID D-1163-2013, RSCI SPIN-code 9788-0680, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

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

УДК 537.632

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-115-121>

EDN OABAYG



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Магнитооптический экваториальный эффект Керра в нанокompозитах $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$

М.М. Яшин[@],
В.Е. Рябухин,
А.Н. Юрасов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Целью работы является получение и исследование спектров магнитооптического экваториального эффекта Керра (ЭЭК) в нанокompозитах $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$, сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, выявление их особенностей. Подобные исследования являются, безусловно, важными, как с фундаментальной точки зрения, так и с практической, т.к. магнитооптическая спектроскопия – метод неразрушающего контроля и исследования широкого класса наноструктур с перспективными и интересными свойствами.

Методы. Для достижения поставленной цели применялось компьютерное моделирование в рамках перспективного метода эффективной среды – приближения Бруггемана, согласно которому исследуемая структура заменяется средой с эффективными свойствами.

Результаты. Изучены экспериментальные спектры ЭЭК и в рамках компьютерного моделирования получены спектры эффекта Керра в диапазоне 1.5–3.0 эВ. При этом моделирование проводилось двумя способами: без учета и с учетом квазиклассического размерного эффекта. Конечным результатом стало сопоставление модельных и экспериментальных спектров эффекта Керра, где было показано влияние размерных эффектов на вид спектров ЭЭК. Достоверность методик хорошо подтверждается сравнением полученных результатов с эмпирическими данными, а ценность полученных результатов обусловлена тем, что все рассчитанные параметры обсуждаемого нанокompозита и форма спектральных зависимостей ЭЭК хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Выводы. В рамках компьютерного моделирования установлены оптимальные параметры исследуемого образца: форм-фактор, средний размер гранул, коэффициент аномального эффекта Холла. Описанный подход позволяет бесконтактным и неразрушимым способом изучать магнитооптические свойства перспективных наноматериалов, а полученные результаты являются важными при создании новых типов устройств, а также элементов электроники и нанoeлектроники.

Ключевые слова: нанокompозиты, теория эффективной среды, экваториальный эффект Керра, оксид кобальта, размерные эффекты

• Поступила: 26.04.2024 • Доработана: 17.05.2024 • Принята к опубликованию: 28.11.2024

Для цитирования: 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>, <https://elibrary.ru/OABAYG>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Magneto-optical transverse Kerr effect in $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$ nanocomposites

Maxim M. Yashin [@],
Vitaly E. Ryabukhin,
Alexey N. Yurasov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The aim of this paper is to attain and investigate the spectra of the magneto-optical transverse Kerr effect (TKE) in $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$ nanocomposites, to compare the obtained results with experimental data, and identify their specific features. Magneto-optical spectroscopy is a method for non-destructive testing and research of a wide class of nanostructures with promising and interesting properties, and such studies are essential in terms of both fundamental and practical aspects.

Methods. Computer modeling is used as part of the promising effective medium method. This is in the form of the Bruggeman approximation, according to which the structure under study is replaced by a medium with effective properties.

Results. TKE experimental spectra were studied and Kerr effect spectra in the range of 1.5–3.0 eV were obtained by computer modeling. In this case, the modeling is performed by means of two methods, ignoring and considering the quasiclassical size effect. The final result is the comparison of the model and experimental Kerr effect spectra, in which the influence of size effects on the appearance of the TKE spectra is shown. The reliability of methods is well confirmed by comparing the results obtained with empirical data. The value of the results obtained stems from the fact that all the calculated parameters of the nanocomposite under study and the shape of TKE spectral dependencies are in good agreement with the observation results.

Conclusions. The optimal parameters of the sample under study are established as part of computer modeling: form factor, average granule size, and the anomalous Hall effect coefficient. The described approach allows the magneto-optical properties of promising nanomaterials to be studied in a non-contact and non-destructive manner. These results are useful for creating new types of devices as well as electronics and nanoelectronics elements.

Keywords: nanocomposites, effective medium approach, transverse Kerr effect, cobalt oxide, size effects

• Submitted: 26.04.2024 • Revised: 17.05.2024 • Accepted: 28.11.2024

For citation: 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>, <https://elibrary.ru/OABAYG>

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 современной электронной отрасли активно применяются результаты работы в области магнитооптики. Магнитооптика – раздел физики, изучающий явления, возникающие в результате взаимодействия электромагнитного излучения (оптического диапазона в инфракрасной (ИК), видимой и ближней ультрафиолетовой области спектра) с намагниченным веществом. Одним из магнитооптических эффектов является экваториальный эффект Керра (ЭЭК), описание которого представлено на рис. 1.

ЭЭК активно используется при исследовании наноструктур, магнитном чтении и записи информации с магнитных дисков. Современные тенденции развития устройств хранения информации ведут к поиску новых материалов в области магнитных гранулированных сплавов и нанокompозитов.

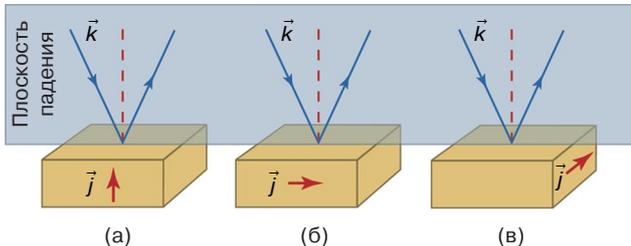


Рис. 1. Эффект Керра в полярной (а), меридиональной (б) и экваториальной (в) геометрии. \vec{k} – волновой вектор; \vec{j} – намагниченность

В связи с этим изучение свойств перспективных наноструктур сегодня является актуальной задачей с учетом возможного значительного усиления важных с практической точки зрения эффектов, таких как магнитосопротивление, квантовые эффекты Холла, магниторефрактивный эффект и многие другие [1–3]. Интересным примером наноструктуры служит нанокompозит на основе Co – CoO , а моделирование наблюдаемых оптических и магнитооптических эффектов позволяет бесконтактным способом оценивать различные характерные параметры исследуемых образцов [4–7].

В результате эксперимента, описанного в [8, 9], получены спектральные зависимости параметра ЭЭК (δ) в экваториальной геометрии нанокompозита $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$ при различных значениях объемной доли X кобальта (рис. 2).

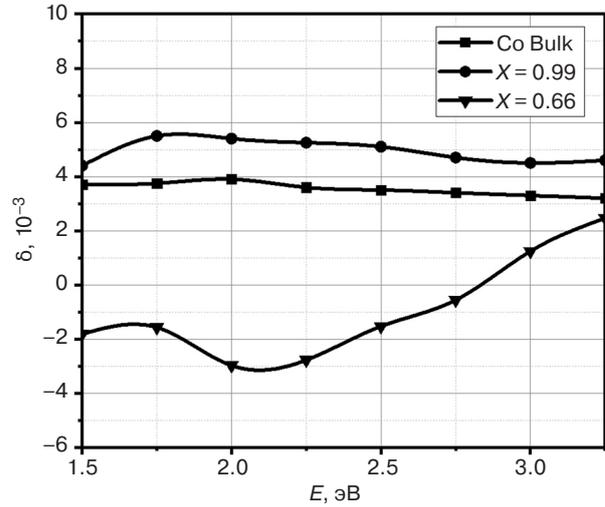


Рис. 2. Экспериментальные спектры ЭЭК нанокompозита $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$ [8, 9]. E – энергия электромагнитной волны. Bulk – массивный образец

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Феноменологическая теория магнитооптических эффектов – это решение уравнений Максвелла с учетом рассмотрения диэлектрической проницаемости в матричной (тензорной) форме, $\hat{\epsilon}$ – тензор диэлектрической проницаемости (ТДП):

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & i\gamma & 0 \\ -i\gamma & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Вектор магнитной индукции направлен вдоль оси z , а ϵ и γ компоненты ТДП имеют вид:

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_1 - i\gamma_2, \\ \epsilon &= \epsilon_1 - i\epsilon_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где ϵ и γ являются комплексными величинами. При этом ϵ_1 и γ_1 – действительная часть диагональных и недиагональных компонент ТДП, а ϵ_2 и γ_2 – мнимая часть компонент ТДП, соответственно.

Любой магнитооптический эффект однозначно выражается через компоненты ТДП. Магнитооптические эффекты позволяют разделять вклад левой и правой спиновых подзон,

а исследование частотных зависимостей мнимых частей диагональных и недиагональных компонент ТДП дает полную информацию о зонной структуре исследуемой среды.

Магнитооптические эффекты позволяют визуализировать доменную структуру, что делает их важнейшими инструментами в исследовании магнитных нано- и микрообъектов, в т.ч. рабочей зоны магнитных головок и доменных границ [1–6].

Глобальным преимуществом магнитооптической Керр-спектроскопии является возможность с помощью ЭЭК определять недиагональные компоненты тензоров, а в практическом отношении – «отсеять» шумы и наводки в экспериментальной установке. При этом экспериментально измерять параметр эффекта Керра δ возможно только на r -компоненте, т.к. на s -компоненте в металлических ферромагнетиках δ_s -эффект на 2–3 порядка меньше по сравнению с δ [9]:

$$\delta = (A\gamma_1 + B\gamma_2) + \frac{2 \sin 2\varphi}{A^2 + B^2}, \quad (3)$$

где $A = \varepsilon_2(2\varepsilon_1 \cos^2 \varphi - 1)$, $B = \cos^2 \varphi(\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2 + 1) + \varepsilon_1 - 1$, φ – угол падения света.

Оптимальной при описании спектральных зависимостей наноструктур и наноконпозитов, в частности, является теория эффективной среды [10]. В ИК-области спектра в данной теории необходимо учитывать значительное влияние квазиклассического размерного эффекта, что связано с внутризонными переходами [11]. Размерные эффекты учитываются варьированием форм-факторов частиц L и добавками в диагональные и недиагональные компоненты ТДП ферромагнитной компоненты наноконпозита, что связано с рассеянием электронов на поверхностях гранул. Окончательно с учетом вклада в ТДП размерных эффектов, согласно модели Друде – Лоренца, компоненты ТДП представляются в виде [11]:

$$\varepsilon_{\text{mod}} = \varepsilon_{\text{Co}} + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})}, \quad (4)$$

$$\gamma_{\text{mod}} = \gamma_{\text{Co}} - \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{bulk}}/\tau_{\text{bulk}}^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})^2} + \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{gr}}/\tau_{\text{part}}^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})^2},$$

где ε_{Co} и γ_{Co} – диагональные и недиагональные компоненты ТДП ферромагнетика, в данном случае кобальта; ω – частота падающей электромагнитной волны; ω_p – плазменная частота; τ_{bulk} , τ_{part} – среднее время пробега электрона в массивном образце и грануле соответственно; $\sigma_{xy}^{\text{bulk}} = 4\pi M_s R_{\text{bulk}}/\rho_{\text{bulk}}^2$; $\sigma_{xy}^{\text{gr}} = 4\pi M_s R_{\text{gr}}/\rho_{\text{gr}}^2$; M_s – намагниченность насыщения ферромагнетика;

R_{gr} и R_{bulk} – коэффициент аномального эффекта Холла (АЭХ) гранул и массивного образца; ρ_{bulk} – удельное сопротивление массивного образца; ρ_{gr} – удельное сопротивление гранулы. Размерный эффект проявляется как в параметре АЭХ, так и в удельном сопротивлении:

$$R_{\text{gr}} = R_{\text{bulk}} + 0.2R \frac{l}{r_0} \left(1 + \frac{l}{r_0}\right), \quad (5)$$

$$\rho_{\text{gr}} = \rho_{\text{bulk}} \left(1 + \frac{l}{r_0}\right), \quad (6)$$

где R – значение параметра АЭХ материала поверхности гранул, r_0 – размер частиц наноконпозита и l – длина свободного пробега.

В дальнейшем выражения (4), (5) подставляются в формулы эффективной среды (см., например, [6]) и окончательно в (3).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В рамках перспективного метода эффективной среды – приближения Бруггемана [12] по формулам (1)–(3) получены значения параметра ЭЭК с учетом различной формы частиц L (форм-фактор) без учета размерного эффекта и проведено сравнение с экспериментальными данными, которые были получены в научной лаборатории кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [12] (рис. 3). В качестве образца для сравнения был выбран наноконпозит с объемной долей кобальта $X = 0.66$.

Как видно из рис. 3, наилучшее согласие наблюдается при $L = 0.3$. Для более точного описания ЭЭК рассмотрим влияние квазиклассического размерного эффекта (формулы (4) и (5)) (рис. 4).

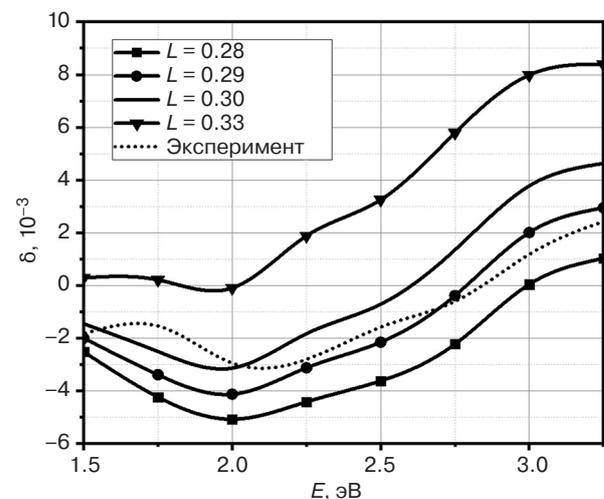


Рис. 3. Модельные спектры ЭЭК наноконпозита $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$ без учета размерного эффекта при различных значениях форм-фактора частиц

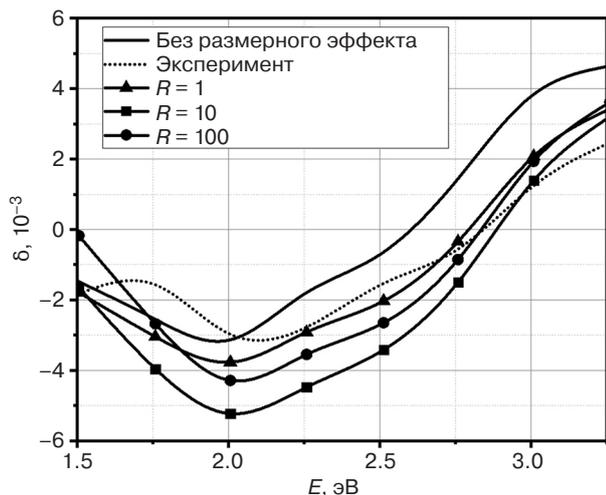


Рис. 4. Модельные спектры ЭЭК нанокompозита $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$ без учета размерного эффекта и с учетом размерного эффекта при различных значениях параметра АЭХ R

Как видно из рис. 4, учет квазиклассического размерного эффекта позволяет лучше описать изменение ЭЭК в ближней ИК-области спектра. Наилучшее совпадение модельных и экспериментальных кривых наблюдается при $R = 1$, при этом также установлен средний размер гранул нанокompозита $\text{Co}_x\text{CoO}_{1-x}$, который составляет $r_0 = 2.5$ нм. Полученные результаты являются важными при создании новых типов устройств, а также элементов электроники и наноэлектроники [13–15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы получены модельные спектры ЭЭК в нанокompозите $\text{Co}_x(\text{CoO})_{1-x}$, а также проведено их сравнение с экспериментальными данными.

Показана важность учета вклада влияния форм-фактора частиц, а также квазиклассического размерного эффекта на вид спектральных

зависимостей ЭЭК. В рамках компьютерного моделирования установлены оптимальные параметры исследуемого образца: форм-фактор, средний размер гранул, а также коэффициент АЭХ.

Таким образом, описанный подход позволяет бесконтактным и неразрушимым способом изучать магнитооптические свойства перспективных наноматериалов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке программы «Акселератор 4.0 РТУ МИРЭА вторая волна» и при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the program “Accelerator 4.0 RTU MIREA second wave” and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment for Universities No. FGFZ-2023-0005).

Вклад авторов

М.М. Яшин – моделирование, обсуждение результатов, написание и редактирование текста.

В.Е. Рябухин – обработка литературных источников, компьютерное моделирование, обсуждение результатов, написание текста статьи.

А.Н. Юрасов – разработка модели, компьютерное моделирование, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Authors' contributions

M.M. Yashin – computer simulation, discussion of results, and writing and editing the text of the article.

V.E. Ryabukhin – processing of literary sources, computer simulation, discussion of results, and writing the text of the article.

A.N. Yurasov – model development, computer simulation, discussion of results, and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gan'shina E.A., Golik L.L., Kun'kova Z.E., Zykov G.S., Rukovichnikov A.I., Markin Yu.V. Magnetic inhomogeneity manifestations in the magneto-optical spectra of (In-Mn)As layers. *IEEE Magn. Lett.* 2020;11:2502105. <https://doi.org/10.1109/LMAG.2020.2982849>
- Ганьшина Е.А., Припеченков И.М., Перова Н.Н., Каназакова Е.С., Овешников Л.Н., Джалолиддинзода М., Риль А.И., Грановский А.Б., Аронзон Б.А. Магнитооптическая спектроскопия композитов GaSb–MnSb. *Известия Российской академии наук. Серия физическая.* 2023;87(3):328–332. <https://doi.org/10.31857/S0367676522700570>
- Granovsky A.B., Khanikaev A.B., Kioussis N., Kalitsov A.V. Influence of grain size on the extraordinary Hall effect in magnetic granular alloys. *J. Magn. Magn. Mater.* 2003;258–259:87–89. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)01119-8](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)01119-8)
- Звездин А.К., Котов В.А. *Магнитооптика тонких пленок.* М.: Наука; 1988. 192 с.
- Ganshina E.A., Garshin V.V., Pripechenkov I.M., Ivkov S.A., Domashevskaya E.P., Sitnikov A.V. Effect of phase transformations of a metal component on the magneto-optical properties of thin-films nanocomposites $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. *Nanomaterials.* 2021;11(7):1666. <https://doi.org/10.3390/nano11071666>

- Юрасов А.Н., Яшин М.М., Гладышев И.В., Ганьшина Е.А., Каназакова Е.С., Сайфулина Д.А., Симдянова М.А. Влияние распределения гранул по размерам на магнитооптические свойства нанокompозитов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2023;110(5):63–72. URL: <https://vestniken.bmstu.ru/catalog/phys/cryst/1111.html>
- Blinov M.I., Chernenko V., Prudnikov V.N., Aseguinolaza I.R., Barandiaran J.M., Lahderanta E., Granovsky A.B. Anomalous hall effect in $\text{Ni}_{47.3}\text{Mn}_{30.6}\text{Ga}_{22.1}/\text{Mg O}(001)$ thin films. *Phys. Rev. B*. 2020;102(6):064413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.064413>
- Domashevskaya E.P., Ivkov S.A., Sitnikov A.V., et al. Influence of the relative content of the metal component in the dielectric matrix on the formation and size of cobalt nanocrystals in $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ film composites. *Phys. Solid State*. 2019;61(2):71–79. <https://doi.org/10.1134/S1063783419020112>
- 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*. 2023;164(4):662–672. <https://doi.org/10.31857/S0044451023100188>
- Юрасов А.Н., Яшин М.М. Методы эффективной среды как оптимальные методы моделирования физических свойств наноструктур. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):68–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-68-77>
- Алешников А.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Федосов А.Г. Магнитные свойства многослойных структур на основе нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$. *Перспективные материалы*. 2012;5:68–75.
- Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Y.E., Kushchev S.B., Foshin V.A., Perova N.N., Ganshina E.A., Granovsky A.B. Magnetic, magnetoresistive and structural properties of $\text{Co}_x(\text{CoO})_{100-x}$ thin film composites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2023;587(39):171154. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171154>
- Фадеев Е.А., Блинов М.И., Гаршин В.В., Тарасова О.С., Ганьшина Е.А., Прудникова М.В., Прудников В.Н., Ляхдеранта Э., Рыльков В.В., Грановский А.Б. Магнитные свойства нанокompозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ вблизи порога перколяции. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2019;83(7):917–920. <https://doi.org/10.1134/S0367676519070159>
- Михайловский Ю.О., Метгус Д.Е., Казаков А.П., Прудников В.Н., Калинин Ю.Е., Ситников А.С., Гербер А., Бартов Д., Грановский А.Б. Аномальный эффект холла в нанокompозитах $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{Al-O})_{100-x}$. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2013;97(7–8):544–548.
- Manoharan S.S., Elefant D., Reiss G., Goodenough J.B. Extrinsic giant magnetoresistance in chromium (IV) oxide, CrO_2 . *Appl. Phys. Lett.* 1998;72(8):984–986. <https://doi.org/10.1063/1.120616>

REFERENCES

- Gan'shina E.A., Golik L.L., Kun'kova Z.E., Zykov G.S., Rukovishnikov A.I., Markin Yu.V. Magnetic inhomogeneity manifestations in the magneto-optical spectra of (In-Mn)As layers. *IEEE Magn. Lett.* 2020;11:2502105. <https://doi.org/10.1109/LMAG.2020.2982849>
- Gan'shina E.A., Pripechenkov I.M., Perova N.N., et al. Magneto-Optical Spectroscopy of GaSb–MnSb Composites. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023;87(3):282–286. <https://doi.org/10.3103/s1062873822701088> [Original Russian Text: Gan'shina E.A., Pripechenkov I.M., Perova N.N., Kanazakova E.S., Oveshnikov L.N., Dzhalloliddinzoda M., Ril' A.I., Granovskii A.B., Aronzon B.A. Magneto-optical spectroscopy of composites GaSb–MnSb. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2023;87(3):328–332 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0367676522700570>]
- Granovsky A.B., Khanikaev A.B., Kioussis N., Kalitsov A.V. Influence of grain size on the extraordinary Hall effect in magnetic granular alloys. *J. Magn. Magn. Mater.* 2003;258–259:87–89. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)01119-8](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)01119-8)
- Zvezdin A.K., Kotov V.A. *Magnitooptika tonkikh plenok (Magneto-Optics of Thin Films)*. Moscow: Nauka; 1988. 192 p. (in Russ.).
- Ganshina E.A., Garshin V.V., Pripechenkov I.M., Ivkov S.A., Domashevskaya E.P., Sitnikov A.V. Effect of phase transformations of a metal component on the magneto-optical properties of thin-films nanocomposites $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. *Nanomaterials*. 2021;11(7):1666. <https://doi.org/10.3390/nano11071666>
- Yurasov A.N., Yashin M.M., Gladyshev I.V., Ganshina E.A., Kanazakova E.S., Saifulina D.A., Simdyanova M.A. Granule size distribution influence on the nanocomposite magneto-optical properties. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya Estestvennye nauki = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2023;110(5):63–72 (in Russ.). Available from URL: <https://vestniken.bmstu.ru/catalog/phys/cryst/1111.html>
- Blinov M.I., Chernenko V., Prudnikov V.N., Aseguinolaza I.R., Barandiaran J.M., Lahderanta E., Granovsky A.B. Anomalous hall effect in $\text{Ni}_{47.3}\text{Mn}_{30.6}\text{Ga}_{22.1}/\text{Mg O}(001)$ thin films. *Phys. Rev. B*. 2020;102(6):064413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.064413>
- Domashevskaya E.P., Ivkov S.A., Sitnikov A.V., et al. Influence of the relative content of the metal component in the dielectric matrix on the formation and size of cobalt nanocrystals in $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ film composites. *Phys. Solid State*. 2019;61(2):71–79. <https://doi.org/10.1134/S1063783419020112>
- Gan'shina 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 A., Garshin V.V., Perova N.N., Pripechenko I.M., Yurasov A.N., Yashin M.M., Rylkov V.V., Granovskii A.B. Magneto-optical Kerr Spectroscopy of Nanocomposites. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*. 2023;164(4):662–772 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044451023100188>]
10. Yurasov A.N., Yashin M.M. Methods of effective media as optimal methods for modeling the physical properties of nanostructures. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*. 2020;8(5):68–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-68-77>
 11. Aleshnikov A.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Fedosov A.G. Magnetic properties of multilayer structures based on $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ nanocomposites. *Perspektivnye Materialy*. 2012;5:68–75 (in Russ.).
 12. Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Yu.E., Kushchev S.B., Foshin V.A., Perova N.N., Ganshina E.A., Granovsky A.B. Magnetic, magnetoresistive and structural properties of $\text{Co}_x(\text{CoO})_{100-x}$ thin film composites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2023;587(39):171154. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171154>
 13. Fadeev E.A., Blinov M.I., Garshin V.V., et al. Magnetic properties of $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ nanocomposites near the percolation threshold. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019;83(7):835–837. <https://doi.org/10.3103/S1062873819070153>
[Original Russian Text: Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Yu.E., Kushchev S.B., Foshin V.A., Perova N.N., Ganshina E.A., Granovsky A.B. Magnetic properties of $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ nanocomposites near the percolation threshold. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2019;83(7):917–920 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0367676519070159>]
 14. Mikhailovsky Yu.O., Mettus D.E., Kazakov A.P., et al. Anomalous Hall effect in $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{Al-O})_{100-x}$ nanocomposites. *JETP Lett.* 2013;97(8):473–477 <https://doi.org/10.1134/S0021364013080110>
[Original Russian Text: Mikhailovsky Yu.O., Mettus D.E., Kazakov A.P., Prudnikov V.N., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.S., Gerber A., Bartov D., Granovsky A.B. Anomalous Hall effect in $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{Al-O})_{100-x}$ nanocomposites. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*. 2013;97(7–8):544–548 (in Russ.).]
 16. Manoharan S.S., Elefant D., Reiss G., Goodenough J.B. Extrinsic giant magnetoresistance in chromium (IV) oxide, CrO_2 . *Appl. Phys. Lett.* 1998;72(8):984–986. <https://doi.org/10.1063/1.120616>

Об авторах

Яшин Максим Михайлович, к.ф.-м.н., доцент, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: yashin@mirea.ru. ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57210607470, SPIN-код РИНЦ 2438-6135, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Рябухин Виталий Евгеньевич, магистрант, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vitas900@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-0421-4845>

Юрасов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры наноэлектроники, 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>

About the authors

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: yashin@mirea.ru. ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57210607470, RSCI SPIN-code 2438-6135, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Vitaly E. Ryabukhin, Student, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vitas900@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-0421-4845>

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>

УДК 53.082.52+621.391.822
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-122-135>
EDN OABDBH



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Шумовые свойства предварительного усилителя для инфракрасного фотоприемника на основе HgCdTe

Д.В. Казанцев^{1, 2, @},
Е.А. Казанцева³

¹ ФИАН – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

² НИУ ВШЭ – Высшая школа экономики, Москва, 101000 Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: kaza@itep.ru

Резюме

Цели. Фоторезисторы на основе твердого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ) применяются в инфракрасной (ИК) технике более 60 лет и в зависимости от композиции $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ имеют диапазон чувствительности в области длин волн от 1 до 15 мкм. Сопротивление светочувствительных КРТ-элементов составляет (в зависимости от площади) десятки Ом, и термодинамически ожидаемый шум Найквиста составляет менее $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ для такого резистора. Современные полупроводниковые технологии обеспечивают высокое качество как фотоприемных устройств, так и входных каскадов микросхем для усиления сигнала с них. Целью работы является исследование шумовых свойств разработанного электронного блока, предназначенного для совместной работы с КРТ-фотоприемником, охлаждаемым жидким азотом.

Методы. Для измерения и накопления шумовых спектров сигнала в диапазоне частот 0–1 МГц использована микропроцессорная плата аналогового ввода-вывода P25M производства Innovative, Inc. (США). Плата, на которой имеются четыре 16-битовых аналого-цифровых преобразователя с частотой до 25 МГц, управляющая ими программируемая логическая интегральная схема Spartan-3, процессор TMS320C6713 и оперативная память, передает собранные цифровые данные в материнскую плату через общий для них слот PCI-X. Спектры принятых данных вычислялись с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье с последующим усреднением квадрата амплитуды для всех спектральных составляющих.

Результаты. Измерены спектры плотности шума первого каскада (ADA4898-2), второго каскада (AD8034) и источников тока смещения (AD8397 и LT3009). Обнаружено, что спектральная плотность шумов входа операционного усилителя ADA4898-2 сравнима с найквистовым (термодинамически ожидаемым) шумом резистора 20–100 Ом, соответствующего сопротивлению светочувствительного элемента. Это означает, что выбранный операционный усилитель идеально подходит для решения обсуждаемой технической задачи. Обнаружено также, что спектр шумов микросхем стабилизаторов напряжения и тока LT3009, ADR510 содержит заметную дрейфовую составляющую со спектральной плотностью вида $1/f^\alpha$ (f – частота, $\alpha \approx 1$).

Выводы. Показано, что спектральная плотность шумов электронных компонентов, приведенная ко входу устройства, в несколько раз ниже плотности шумов использованного фотоприемника.

Ключевые слова: ИК-фотоприемник, КРТ-приемник, мал шумящая аппаратура, входные каскады, аналоговая электроника

• Поступила: 19.02.2024 • Доработана: 09.09.2024 • Принята к опубликованию: 28.11.2024

Для цитирования: Казанцев Д. В., Казанцева Е. А. Шумовые свойства предварительного усилителя для инфракрасного фотоприемника на основе HgCdTe. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):122–135. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-122-135>, <https://elibrary.ru/OABDBH>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Noise properties of preamplifier to be used with LN₂-cooled HgCdTe photodetector

Dmitry V. Kazantsev^{1, 2, @},
Elena A. Kazantseva³

¹ P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

² HSE – Higher School of Economy, Moscow, 101000 Russia

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: kaza@itep.ru

Abstract

Objectives. Photoresistors based on a solid solution of mercury–cadmium–tellurium (MCT) have been used in infrared (IR) technology for over 60 years. They can have a sensitivity range in the wavelength region from 1 μm to 15 μm, depending on Hg_{1-x}Cd_xTe composition. The resistance of photosensitive MCT elements is (depending on their area) tens of Ohms, and for such a resistor the thermodynamically expected Nyquist noise is less than 1 nV/√Hz. Modern semiconductor technologies ensure a high level of quality of both photodetectors and input stages of integrated circuits for amplifying the signal from them. The aim of this work is to study the noise properties of the electronic unit developed for joint operation with a liquid nitrogen cooled MCT-photodetector.

Methods. An analog input-output digital signal processor card P25M (Innovative, Inc., USA) was used to measure and accumulate the noise spectra of the signal in the frequency range 0–1 MHz. The card has four 16-bit ADCs of sampling rate up to 25MSpS, a Spartan-3 field-programmable gate array controlling them, a TMS320C6713 processor, and RAM, in order to transmit the collected digital data to the motherboard through a common PCI-X slot. The spectra of the received data were calculated using the fast Fourier transform algorithm with subsequent averaging of the square of the amplitude for all spectral components.

Results. The noise properties of comparatively modern integrated circuits currently used for this task were considered. The noise density spectra of the first stage (ADA4898-2), the second stage (AD8034), and bias current sources (AD8397 and LT3009) were measured. It was found that the spectral density of the input noise of the operational amplifier ADA4898-2 is comparable to the Nyquist (thermodynamically expected) noise of a 20–100-Ohm resistor corresponding to the resistance of the photosensitive element. This means that the selected operational amplifier is ideal for resolving the technical problem discussed herein. Meanwhile, it was also established that the noise spectrum of the LT3009, ADR510 voltage and current stabilizer integrated circuits contains a noticeable drift component with a spectral density of “pink noise” 1/f^α (f – frequency, α ≈ 1).

Conclusions. It was shown that the spectral noise density of the electronic components, reduced to the input of the device, is several times lower than the noise density of the photodetector used.

Keywords: IR-photodetector, MCT-photodetector, low-noise electronics, input stages, analog electronics

• Submitted: 19.02.2024 • Revised: 09.09.2024 • Accepted: 28.11.2024

For citation: Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. Noise properties of preamplifier to be used with LN₂-cooled HgCdTe photodetector. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):122–135. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-122-135>, <https://elibrary.ru/OABDBH>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является исследование шумовых свойств разработанного и изготовленного электронного блока, предназначенного для совместной работы с охлаждаемым жидким азотом инфракрасным (ИК) фотодетектором на основе твердого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ), и шумовых свойств такого фотоприемного устройства в целом.

Для приема оптических сигналов в среднем ИК-диапазоне широко применяются фотоприемники на основе соединения Hg_{1-x}Cd_xTe [1–5]. Ширина запрещенной зоны в этом полупроводнике зависит от доли кадмия [6]. Как было заявлено в первой работе [7] по поводу материала, ширина составляла 95 мВ (13 мкм), а в итоге оказалось, что может составлять и меньше, в зависимости от соотношения доли кадмия и теллура в кристалле. Оптические измерения края полосы поглощения [8, 9] и магнитные измерения проводимости [10, 11] позволили установить, что по мере роста доли кадмия x в твердом растворе Hg_{1-x}Cd_xTe кривая зависимости ширины запрещенной зоны пересекает нуль, поскольку валентная зона и зона проводимости меняются местами на энергетической диаграмме.

Промышленность прилагает усилия к разработке ИК-фотоприемников, основанных на новых принципах. Достигнуты успехи в формировании гетероструктур широкозонных полупроводников, в которых небольшая энергия рабочего оптического перехода, соответствующая величине принимаемого кванта света, определяется разницей в положении зон соседних слоев [12, 13]. Сообщалось об успехе использования для приема длинноволновых (малознергетичных) квантов света графеновых [14] и сверхпроводящих [15] структур. Тем не менее, фоторезистивные детекторы ИК-излучения, особенно для применения в одноканальных фотоприемниках, по-прежнему остаются востребованными с учетом их простоты, технологичности и проверенной десятилетиями функциональности.

Хотя теоретически обнаружительная способность D^* идеального фотодиода должна быть вдвое выше, чем чувствительность идеального фоторезистора [16], фотоприемники с фоторезистивным детектированием падающего на них ИК-света распространены гораздо шире. Заселение энергетических уровней в полупроводнике подчиняется распределению Ферми:

$$N(E) = N_0(E) \frac{1}{e^{kT} + 1}, \quad (1)$$

где E обозначает энергию электронного уровня; $N(E)$ – число фактически заселенных уровней с такой энергией; $N_0(E)$ – число уровней с энергией E , которые в принципе пригодны в качестве волновых функций в полупроводниковом кристалле и E_F – положение уровня Ферми в распределении. Масштаб размытия ступеньки заселенности соответствует температурному потенциалу Φ_T :

$$\Phi_T = \frac{kT}{e^-}. \quad (2)$$

Здесь T – температура в кельвинах, k – постоянная Больцмана и e^- – заряд электрона. Этот температурный потенциал при комнатной температуре (20°C) равен 26 мВ. Это означает, что число термодинамически возбуждаемых электронов и дырок при комнатной температуре составит приблизительно $e^{-\frac{50 \text{ мВ}}{26 \text{ мВ}}} = 2.71^{-2} = 0.13$ от общего числа состояний (примерно 10^{23} шт/см³), и вклад оптически возбуждаемых электронно-дырочных пар окажется пренебрежимо мал. Из этого следует, что узкозонные полупроводниковые фотоприемники обязательно требуется охлаждать. Удовлетворительные результаты приносит температура жидкого азота $T = 77 \text{ К}$: показатель экспоненты возрастает в $300 \text{ К} / 77 \text{ К} = 3.89$ раз, а сама экспонента – в 1795 раз.

При использовании Hg_{1-x}Cd_xTe в режиме фотопроводимости на полупроводниковый кристалл с торцов подают ток (рис. 1). Полупроводниковый материал нанесен на непроводящую подложку. Активная фоточувствительная область расположена между напыленными на поверхность полупроводникового слоя проводящими (например, золотыми) контактами, и ее размер обычно составляет 50–1000 мкм. Предметом измерения служит падение напряжения на таком фоторезисторе. Естественно ожидать, что вариации тока смещения ΔI_{bias} , будучи умножены на сопротивление фоторезистора R_{det} (см. рис. 2) превратятся на выходе схемы в вариации напряжения $\Delta U_{\text{det}} = \Delta I_{\text{bias}} R_{\text{det}}$.

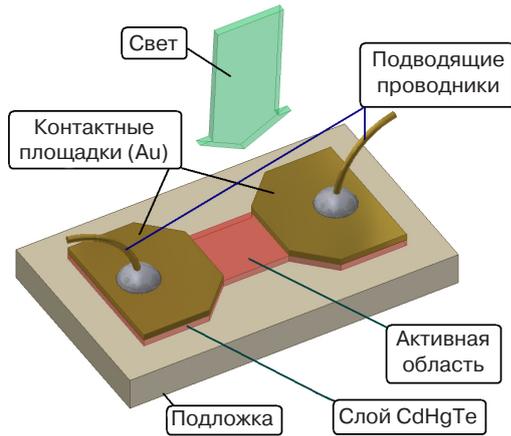


Рис. 1. Вид фотодетектора на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$, размещенного на подложке¹

Схема, в которой на фоторезистор подают некоторое напряжение (рис. 2а), а предметом измерения является возникающий ток фотопроводимости, практически не используется. Во многих случаях полупроводниковая светочувствительная полоска размещена в азотном кристате на холодном пальце, и один из концов этой полоски заземлен, так что эта схема с точки зрения инженера неприменима. Схема включения (рис. 2б), в которой на КРТ-фоторезистор подают стабилизированный ток, а предметом измерения является возникающее на концах светочувствительной полоски напряжение, вполне осуществима с инженерной точки зрения и обеспечивает высокую линейность отклика. Однако подача хорошо стабилизированного тока с точки зрения инженера достаточно сложна и требует некоторого количества дополнительных радиокомпонентов. Наиболее используемой является схема, изображенная на рис. 2в, когда источником тока смещения для фоторезистора служит достаточно большой резистор, подключенный другим концом к источнику стабильного напряжения. На средней точке делителя напряжения, образованного фоторезистором R_{det} и резистором R_{bias} , формируется напряжение, которое зависит от освещенности фоторезистора.

Упомянутые приемы получения электрического сигнала – отклика на оптическое излучение – существуют уже более 60 лет. Ряд работ посвящен исследованию шумов самого фотоприемника, в частности отмечалось, что компонента вида $1/f^\alpha$ (f – частота, $\alpha \approx 1$) заметна в спектре шумов [17].

¹ Рисунок частично взят из брошюры «Mercury Cadmium Telluride Detectors». Teledyne Judson Technologies. http://www.judsontechnologies.com/mercadm_pc.html. Дата обращения 31.01.2022. [The idea for the composition of a drawing is taken from the booklet “Mercury Cadmium Telluride Detectors.” Teledyne Judson Technologies. http://www.judsontechnologies.com/mercadm_pc.html. Accessed January 31, 2022.]

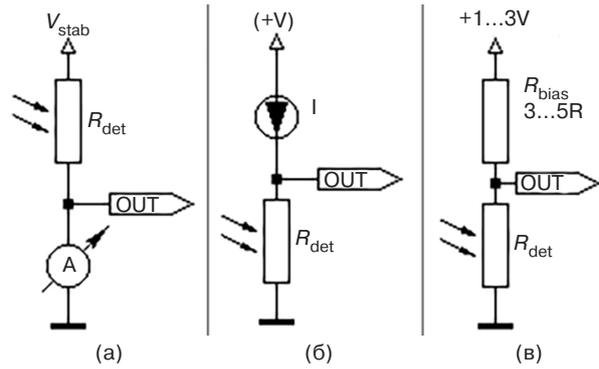


Рис. 2. Токоизмерительная схема включения фоторезистора (а), схема подачи смещения от генератора тока (б), традиционная схема включения² фоторезистора на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (в)

По поводу шумов со спектральной плотностью вида $1/f^\alpha$ следует сделать отступление. Как радиофизический феномен этот шум был, по-видимому, впервые обнаружен Джонсоном [18] при изучении спектра шумов лампового триода. Шоттки дал ему название «flicker-noise» (буквальный перевод с англ. – «мерцающий шум») и радиофизическое объяснение [19], состоявшее в том, что эмиссионная способность разных участков раскаленного катода постоянно подвергается хаотическим изменениям, которые затем остаются существовать надолго. Между тем, на протяжении XX века обнаружилось, что шумовым спектром вида $1/f^\alpha$ обладает огромное множество процессов: координата частицы при броуновском движении [20], параметры сердечных сокращений, сигнал радиопередачи музыки или новостей [21], уровень моря... По этому поводу написано множество обзоров, например, [22, 23], и учебников, например, [24]. До сих пор обращаются к этой теме и радиофизики [25]. Во всех случаях зависимость спектральной плотности $\langle U_N^2 \rangle$ шумов от частоты f имеет вид $\langle U_N^2 \rangle \sim 1/f^\alpha$, где показатель степени $\alpha \sim 0.5 \dots 1.5$ примерно равен 1.

Между тем, качество фоточувствительных полупроводников, а также технические возможности используемых электронных компонентов, все эти годы росли. Уровень шумов (зависит от ширины запрещенной зоны в использованном КРТ-кристалле) уже близок к фундаментальному пределу, задаваемому в статистической физике формулой Найквиста:

$$\langle U_N^2 \rangle = 4kTR_{det}\Delta f \quad (\text{в полосе частот } \Delta f), \quad (3)$$

² PB212. J15D Series. Operating Instructions. Teledyne Judson Technologies. <https://www.teledynejudson.com/prods/Documents/PB212.pdf>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

основанной на значении омического сопротивления R_{det} фоторезистора. Подставив значения постоянной Больцмана $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, сопротивления $R_{\text{det}} = 50$ Ом и температуры $T = 77$ К, получим спектральную плотность шума 0.46 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Уровень шумов современных операционных усилителей (ОУ) имеет тот же порядок величины, что и у 50-омного резистора. Например, 0.9 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ у микросхемы ADA4898-2³.

Постоянная времени фотоприемников J15Dxx производства Teledyne Judson Technologies (США) составляет, в зависимости от площади и размера светочувствительного элемента, от 0.1 до 0.5 мкс. Естественно надеяться получить от предварительного усилителя полосу частот усиления 5–10 МГц, чтобы полностью использовать частотные возможности фоторезистора. Это означает, что в перечне ОУ следует искать модели с частотой единичного усиления ($G = 1$) $f_{G=1}$ больше 50 МГц. Такие модели у современных производителей есть. Например, самая малошумящая из таблицы, предлагаемой Analog Devices⁴ для выбора разработчикам, модель ОУ ADA4898-2 имеет значение частоты среза $f_{G=1} = 65$ МГц.

МЕТОДЫ

Схема включения фотоприемника и усилительной электроники

В качестве фотодетектора использовался КРТ-фотоприемник J15D12-M204-100u (Teledyne Judson Technologies), установленный в заливаемом жидким азотом сосуде Дьюара M204. В основном этот фотоприемник предназначен для работы с СО₂-лазером и используется для детектирования слабой оптической волны, рассеянной зондирующей иглой в сканирующем микроскопе ASNOM [26–28], изготовленном NT-MDT-SI (Зеленоград, Россия). Электрический сигнал с фотоприемника подается на вход электронной схемы (рис. 3), в основном описанной в [29]. Первый каскад выполнен на малошумящем ОУ ADA4898-2. Резисторы обратной связи задают коэффициент усиления 40. Второй каскад выполнен на плате в двух вариантах: на ОУ DA3A с коэффициентом усиления 50 (приблизительно равные величины позволяют добиться максимальной ширины плоской амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) двух последовательных каскадов, с учетом $f_{G=1} = 65$ МГц) и на ОУ DA3B

с коэффициентом усиления 5, который иногда используется при большой величине оптического сигнала. Ток смещения, необходимый для работы фоторезистора (см. рис. 2в), подается через резистор R_{bias} с выхода регулируемого источника напряжения DA1.

На плате предусмотрен также другой источник стабилизированного тока, предназначенный для измерения температуры холодного пальца в криостате, на котором размещен фоторезистор. На холодном пальце в сосуде Дьюара рядом с фоторезистором установлен полупроводниковый диод, и падение напряжения на нем определяется формулой Шокли [30]:

$$I_D(U_D) = I_0 \left(\exp\left(\frac{U_D e^-}{kT}\right) - 1 \right) \approx I_0 \exp\left(\frac{U_D e^-}{kT}\right),$$

т.е. при заданном токе I_D через диод напряжение U_D на нем пропорционально температуре. Измерение (по падению напряжения на резисторе R39) и стабилизацию тока смещения осуществляет ОУ DA4B, а «идеал» напряжения для него формирует «стабилитрон» DA5 ADR510 (микросхема⁵).

С целью измерения при настройке электроники тока смещения, подаваемого в фоторезистор, на плате предусмотрены гнезда, в которые можно установить резистор R_{meas} вместо отключенного на это время кабеля от фотоприемника.

Измерительная микропроцессорная плата аналогового ввода

Для записи спектров шума фотоприемника и предварительного усилителя сигнала использовалась микропроцессорная плата аналогового ввода-вывода P25M производства Innovative, Inc. (США) [31]. На этой плате установлены 4 канала аналого-цифрового преобразователя (АЦП), 4 канала цифроаналогового преобразователя (16 бит, частота оцифровки и тех, и других – до 25 МГц), управляющая ими программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) Spartan-3, процессор TMS320C6713 и оперативная память. Логическая структура ПЛИС обеспечивает весьма точное задание частоты оцифровки входного напряжения (цифровой делитель частоты и схема фазовой автоподстройки частоты для подстройки тактового генератора АЦП). Перед началом измерения в логическую структуру ПЛИС программно загружалась также длина пакета измерений, выполняемых после старта процесса без дополнительного вмешательства

³ <https://www.analog.com/ADA4898-2/datasheet>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

⁴ <https://www.analog.com>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

⁵ <https://www.analog.com/ADR510/datasheet>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

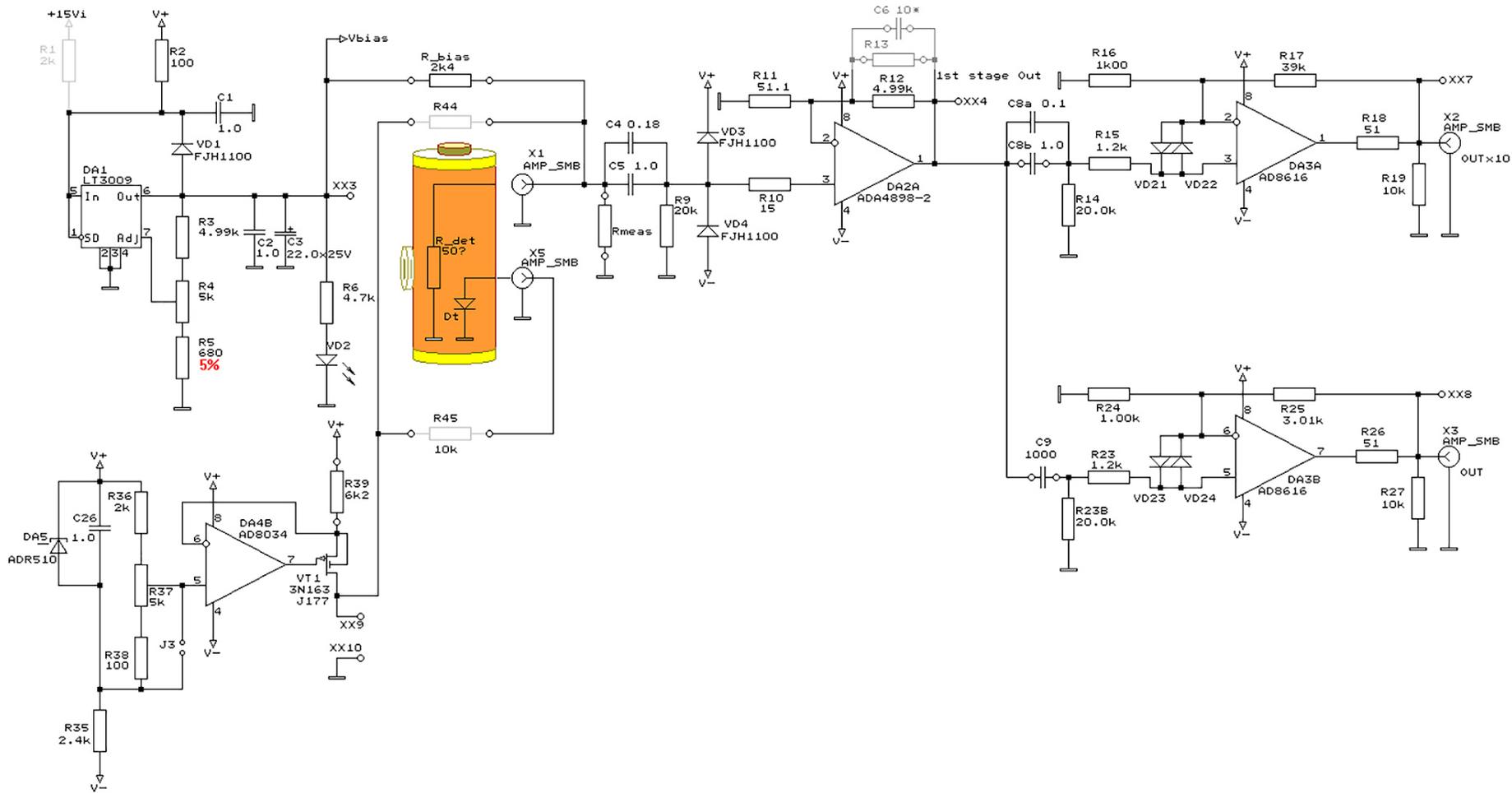


Рис. 3. Принципиальная схема платы предварительных усилителей, предназначенной для совместной работы с HgCdTe фотодетектором, работающим в среднем ИК-диапазоне. Обозначения частично приведены в соответствии с ГОСТ 2.710-81⁶

⁶ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. *Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.* М.: Стандартинформ; 2008. [GOST 2.710-81. Interstate standard. *Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams.* Moscow: Standardinform; 2008 (in Russ.).]

со стороны процессора TMS320C6713 платы P25M. Полученные таким образом несколько тысяч значений измерений АЦП в виде массива 16-битовых целых чисел попадают вначале в адресное пространство платы, а затем пересылаются через общий слот PCI-X в материнскую плату компьютера, работающего под управлением *Windows*. Такая организация работы АЦП позволяет быть уверенным, что все события единичного измерения входного напряжения платой расположены совершенно равномерно во времени. В этом отношении вычисленный по таким данным спектр входного сигнала можно считать достоверным.

Обработка полученных данных спектра

Полученный с измерительной платы пакет отсчетов АЦП обрабатывался в компьютере на языке C++. Основой вычисления спектра являлся алгоритм быстрого преобразования Фурье [32, 33]. Прямое преобразование Фурье вычислялось по массиву данных, полученных из платы ввода-вывода. Данные преобразовывались из исходного формата `short (int16)` в формат с плавающей точкой `double`, причем эти действительные значения соответствуют входному напряжению в вольтах. Частота оцифровки и длительность пакета измеренных значений известны программе и заносились в поля данных класса, однако, на «оси времени» вычисления велись в безразмерном виде. Это позволило оставаться уверенными в корректности преобразований, убедившись для различных длин массива данных в неизменности амплитуд спектральных компонент, неизменном выполнении теоремы Парсеваля (сумма квадратов гармоник «на шкале частот» должна равняться сумме квадратов отсчетов «на шкале времени») и независимости величины спектральных компонент от частоты оцифровки. Разумеется, для выполнения перечисленных требований приходилось нормировать полученные значения гармоник на корень квадратный из рабочей длины массива данных.

По окончании вычислений спектральных компонент было организовано накопление квадрата их комплексной величины с усреднением полученного значения. Средняя величина амплитуды любой гармоники (кроме, возможно, нулевой) при усреднении хаотического сигнала стремится к нулю, а вот средний квадрат, что естественно, стремится к среднему уровню шумов в этой области спектра. Неизменность предела, к которому стремятся средние квадраты амплитуд спектральных компонент по мере увеличения числа попыток усреднения спектров, а также независимость результата от числа точек разбиения и от частоты срабатывания АЦП

убеждают в том, что метод накопления и усреднения данных выбран правильно.

По желанию пользователя накопленные данные, в процессе измерения отображаемые на виртуальном дисплее, могут быть экспортированы на диск в виде ASCII-текста. В этой таблице первый столбец содержит номер спектральной точки, второй столбец содержит частоту спектральной компоненты и третий столбец – ее среднеквадратичную амплитуду. При экспорте данные нормируются на корень квадратный из ширины спектра, которая берется из известной частоты оцифровки данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектр входных шумов АЦП

Перед началом измерений параметров обсуждаемого усилителя необходимо было убедиться в том, что плата аналогового ввода-вывода P25M, как измерительный прибор, сама вносит мало шума и искажений в измеряемый сигнал. Шумовые спектры, полученные с пустого (неподключенного) входа АЦП, показаны на рис. 4. Как видно из рисунка, спектральная плотность вносимого измерительным прибором шума не зависит от частоты. Уровень спектральной плотности входного шума измерительной платы (около $1.4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$) неплохо соответствует предсказаниям выражения (3) при ее входном сопротивлении 50 Ом. Следует отметить, что предварительный усилитель на входе АЦП допускает перед началом измерений программную установку усиления (варианты {GND, $\pm 200 \text{ мВ}$, $\pm 1 \text{ В}$, $\pm 2.5 \text{ В}$ } для диапазонов допустимого сигнала), и уровень шума на широком размахе входного сигнала (диапазон значений измеряемого входного сигнала $\pm 2.5 \text{ В}$), т.е. при умеренном усилении до входа АЦП, заметно выше (рис. 4), чем шум в режиме большего усиления на входе измерительной платы (диапазон входного сигнала $\pm 200 \text{ мВ}$).

Зависимости спектральной плотности шума от частоты, записанные для выходного сигнала исследуемой платы, показаны на рис. 5. Кривые спектральной плотности были пересчитаны ко входу схемы путем деления на коэффициент усиления $G_{\text{OUT} \times 1} = 200$ для данных, полученных с выхода канала малого усиления $\text{OUT} \times 1$, и на коэффициент усиления $G_{\text{OUT} \times 10} = 2000$ для данных, полученных с выхода канала большого усиления $\text{OUT} \times 10$. Масштаб величины спектральной плотности шумов составляет для этого случая тоже несколько $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Можно утверждать, что роль второго каскада при высоком коэффициенте усиления $G_{\text{OUT} \times 10} = 2000$ заметно снижается. Кривая спектральной плотности шумов, вносимых измерительной платой (рис. 4), помещена рядом с кривыми шумов исследуемой платы

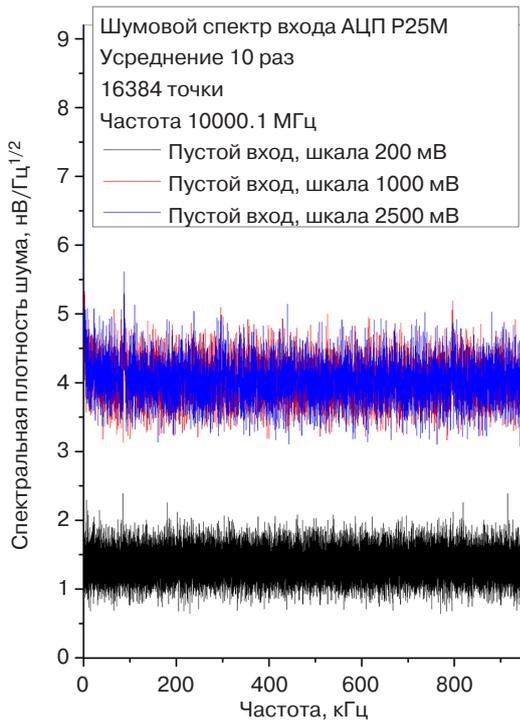


Рис. 4. Спектры шума, записанные с неподключенного входа ADC0 измерительного АЦП, полученные при различном размахе его входной шкалы

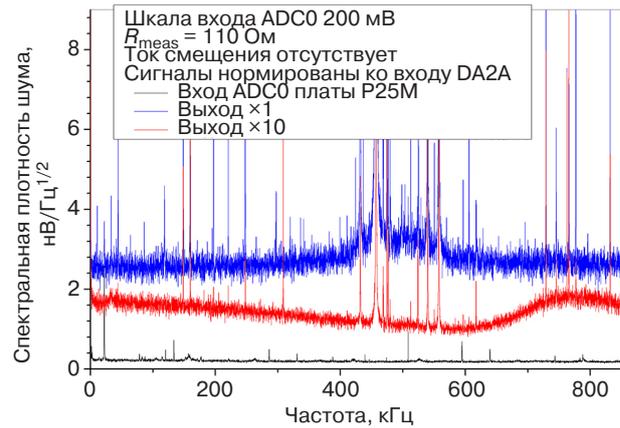


Рис. 5. Кривые спектральной плотности шума, записанные с выхода $\times 1$ платы (общий коэффициент усиления 200), выхода $\times 10$ (общий коэффициент усиления 2000), неподключенного входа ADC0 измерительного АЦП

большого усиления исследуемой схемы роль шумов входных каскадов измерительной платы P25M пренебрежимо мала, даже если измеренное среднеквадратичное значение шумового сигнала на неподключенном входе АЦП делить на относительно небольшое число $G_{OUT \times 1} = 200$.

Зависимость шума входа от величины входного резистора

предусилителя на рис. 5. Для визуальной совместности кривых на одном рисунке, эти данные (рис. 4) поделены на коэффициент усиления $G_{OUT \times 1} = 200$, соответствующий меньшему из двух возможных значений, используемых для пересчета измеренной на выходе OUT плотности шума ко входу исследуемого усилителя. Из рис. 5 видно, что с учетом

С целью проверки, являются ли записанные спектры входного шума усилителя физической величиной или артефактом программного алгоритма, была измерена зависимость спектральной плотности шума, приведенной ко входу, от величины сопротивления R_{meas} , соединяющего вход с «землей» платы (рис. 6).

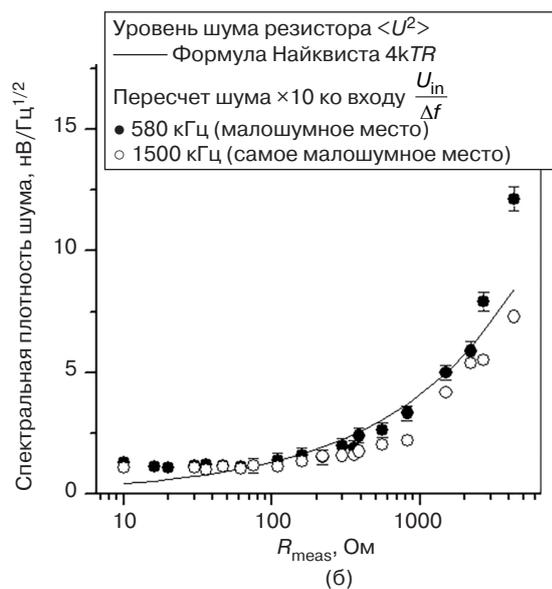
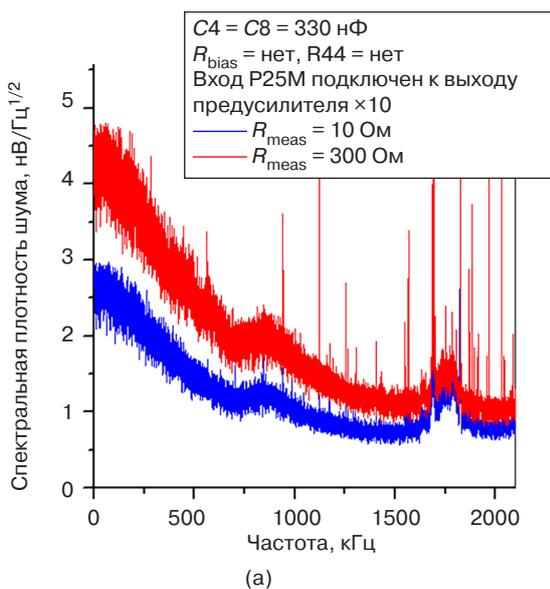


Рис. 6. (а) Спектральная плотность шума, измеренная при частоте дискретизации 4 МГц при соединении входа с «землей» через резистор $R_{meas} = 10$ Ом; (б) зависимость плотности шума в «тихих» участках от сопротивления резистора R_{meas} . Для сравнения приведена кривая, построенная с помощью формулы Найквиста

Величина спектральной плотности собираемого с помощью АЦП сигнала была поделена на коэффициент усиления двух каскадов $G_{\text{OUT} \times 10} = 40 \times 50 = 2000$ для канала усиления с выходом на разъем $\text{OUT} \times 10$. В целом, масштаб уровня шума $(0.8...5) \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ соответствует величине, указанной в справочном листке⁷ на микросхему ADA4898-2 ($0.9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$). Как можно видеть на графике, спектральная плотность шума далека от воображаемого идеала: в спектре лабораторного эфира присутствует много острых линий, соответствующих, по-видимому, работе многочисленных ключевых блоков питания. Кроме того, спектральная плотность шума и в среднем не является плоской кривой: на низких частотах уровень шума несколько выше, что, по всей вероятности, обусловлено хаотическими сдвигами среднего уровня смещения входных радиокомпонентов (flicker noise) с его характерным спектром $1/f^\alpha$.

Тем не менее, измеренный уровень шума неплохо соответствует зависимости плотности шума от сопротивления источника сигнала (резистора R_{meas}), ожидаемой из формулы Найквиста (3), что показано на рис. 6б. Регистрируемая плотность шума на частотах выше 700–1000 кГц оказывается для резисторов с сопротивлением больше 1 кОм даже чуть ниже, чем предсказывает статистическая физика. Однако эта плотность шума получена путем деления выходного сигнала на коэффициент усиления двух последовательных каскадов (на 2000), а с частоты 800–1000 кГц как раз начинается спад АЧХ-усилителя. Задаваемый резисторами обратной связи коэффициент усиления каждого каскада составляет около 50, и такая величина для использованных нами ОУ с частотой единичного усиления $f_T \approx 50\text{--}60 \text{ МГц}$ уже является задачей на пределе возможностей в области частот порядка 1 МГц и выше. Это означает, что изображенные на рис. 6 графики для плотности шума ниже найквистова уровня являются в области частот 1500 кГц лишь иллюзией.

Уровень входных шумов при работе от резистора смещения

Спектр шумового сигнала, измеренного при подаче тока смещения через резистор $R_{\text{bias}} = 820 \text{ Ом}$ от источника регулируемого опорного напряжения DA1 LT3009, показан на рис. 7. В качестве нагрузки для тока смещения использован вместо фотоприемника резистор $R_{\text{meas}} = 110 \text{ Ом}$ (обозначения компонентов даны на рис. 3). Напряжение смещения $V_{\text{bias}} = 2.8 \text{ В}$. При таком включении на частотах до 200 кГц преобладающую роль в спектре

начинает играть шум вида $1/f^\alpha$, вносимый генератором LT3009 напряжения смещения V_{bias} .

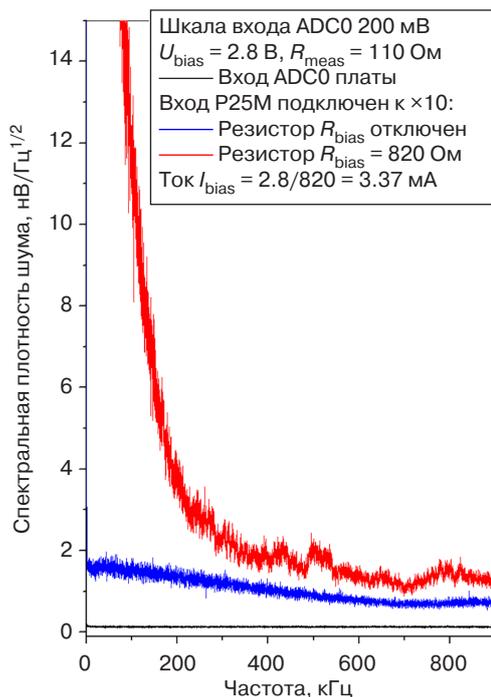


Рис. 7. Спектры шума, записанные при подаче тока смещения через резистор $R_{\text{bias}} = 820 \text{ Ом}$ от стабилизированного напряжения $V_{\text{bias}} = 2.8 \text{ В}$

Уровень шумов со спектром вида $1/f^\alpha$ в стабилизированном микросхемой LT3009 напряжении, заметно высокий по сравнению с белым найквистовым шумом входного резистора R_{meas} и первого каскада отборной (по шумам) модели ОУ ADA4898-2, не должен удивлять. В справочном листке⁸ на микросхему регулируемого стабилизатора LT3009 утверждается, что типичное среднеквадратичное напряжение выходных шумов для этой модели составляет 150 мкВ при величине фильтрующей емкости $C3 = 1.0 \text{ мкФ}$. Интегрирование наблюдаемого в эксперименте уровня шума в диапазоне 0–200 кГц как раз и дает приблизительно это значение. Емкость фильтрующего конденсатора незначительно помогает стабилизации выходного напряжения каскада на интересующих нас низких частотах.

Уровень входных шумов при работе от источника стабилизированного тока

Присутствие значительной компоненты вида $1/f^\alpha$ в спектре сигнала при использовании резистора смещения, работающего от стабилизатора напряжения LT3009, побудило подать ток смещения

⁷ <https://www.analog.com/ADA4898-2/datasheet>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

⁸ <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3009fd.pdf>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

от генератора стабильного тока (рис. 8). При разработке печатной платы была предусмотрена такая возможность, а именно, гнезда для установки резистора R44. В таком включении стабилизацию тока, протекающего через КРТ-фоторезистор, осуществляет микросхема DA4B (рис. 3), сравнивающая падение напряжения на токоизмерительном резисторе R39 с напряжением на «стабилитроне» DA5 (микросхема ADR510). Величина R39 для этого измерения была уменьшена до 620 Ом.

Представленные на рис. 8 спектры шума входного сигнала, собираемого при такой конфигурации электронной схемы, показывают, что такой способ подачи тока смещения на светочувствительный элемент фотоприемника не приносит выигрыша в среднеквадратичном уровне шумов аппаратуры, пересчитанном ко входу устройства.

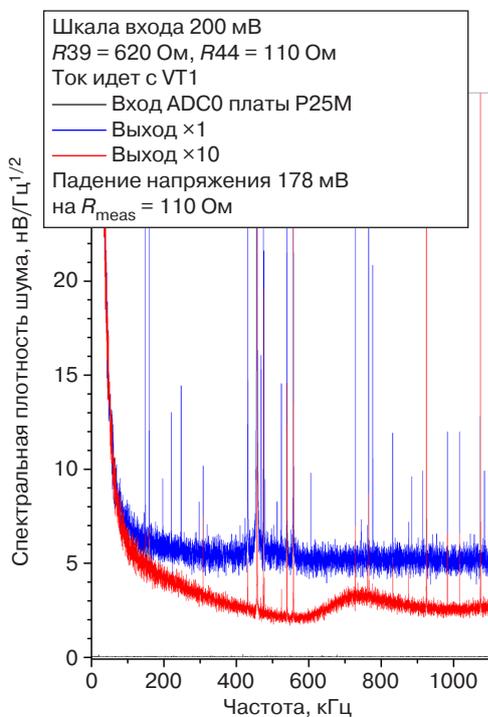


Рис. 8. Спектры шума, записанные при подаче тока смещения через резистор R44

Шумы в данном случае определяются уровнями шумов самой микросхемы AD8034, генератором опорного напряжения ADR510 и также (в последнюю очередь) утечкой через затвор VT1. Ожидания, что установка отборного малошумящего ОУ в качестве DA4B должна обеспечить низкий уровень шума, не оправдались. Основной вклад в появление шумов дает микросхема «стабилитрона» ADR510: RMS-среднее⁹ ее шумов составляет 4 мкВ в диапазоне 0–10 Гц на фоне напряжения стабилизации 1 В.

⁹ Root mean square – среднеквадратичное значение.

Спектр шумов предварительного усилителя, подключенного к фотоприемнику

Спектры шумов, записанные при подключении фотоприемника ко входу исследуемого предварительного усилителя, приведены на рис. 9. Следует отметить, что в нашем случае пришлось скорее понижать оптическую чувствительность фотоприемника, чем бороться за ее повышение. В рабочем режиме, когда луч CO₂ лазера мощностью 17 мВт на линии $\nu = 934.93 \text{ см}^{-1}$ подается на вход схемы Майкельсона, используемой для детектирования сигнала, рассеянного зондирующей иглой ANSMO, приходится уменьшать электрический сигнал, чтобы выходной каскад предварительного усилителя и используемая шкала АЦП не вошли в режим отсечки по напряжению. Спектр собираемого электрического сигнала над поверхностью кристаллического образца SiC при нормальной к поверхности амплитуде колебаний иглы 70 нм представлен на рис. 9. При получении этих данных ток смещения КРТ-датчика установлен равным 1.5 мА, вместо 2.5 мА, как рекомендовано изготовителем для достижения максимального отношения сигнал/шум (в нашем случае светочувствительный элемент имел площадь $100 \times 100 \text{ мкм}^2$). Для этого смещение подается на КРТ-датчик от выхода регулируемого источника напряжения DA1 LT3009 $V_{\text{bias}} = 2.8 \text{ В}$ через резистор $R_{\text{bias}} = 1.8 \text{ кОм}$. При измерениях спектра шумов реального фототока (рис. 9) для обеспечения рабочей температуры фотоприемника был налит жидкий азот. Электрический сигнал снимался с выхода $\times 1$ предварительного усилителя, а не с выхода $\times 10$, что (см. рис. 4) соответствует несколько худшим шумовым свойствам фотоприемника с предварительным усилителем, чем при использовании выхода $\times 10$ электроники в пересчете ко входу схемы.

Как видно из рис. 9 (средняя кривая), уровень собственных шумов фотоприемника, пересчитанный ко входу предварительного усилителя, превышает в 3–5 раз измеренные уровни шумов входа исследуемой схемы (для сравнения нижняя кривая на рис. 9 содержит спектр входных шумов предварительного усилителя в случае, когда фотодетектор заменен резистором 11 Ом). Это означает, что с практической точки зрения дальнейшие попытки снизить уровень шумов лишены смысла. Спектр оптического сигнала, собираемого в рабочем режиме ANSMO (амплитуда нормальных колебаний острия иглы 70 нм, частота 55 кГц, образец SiC), представлен на верхнем графике рис. 9. Видно, что область повышенных шумов вида $1/f^\alpha$, вносимых использованными при разработке схемы источниками напряжения, кончается уже к частоте второй (110 кГц)

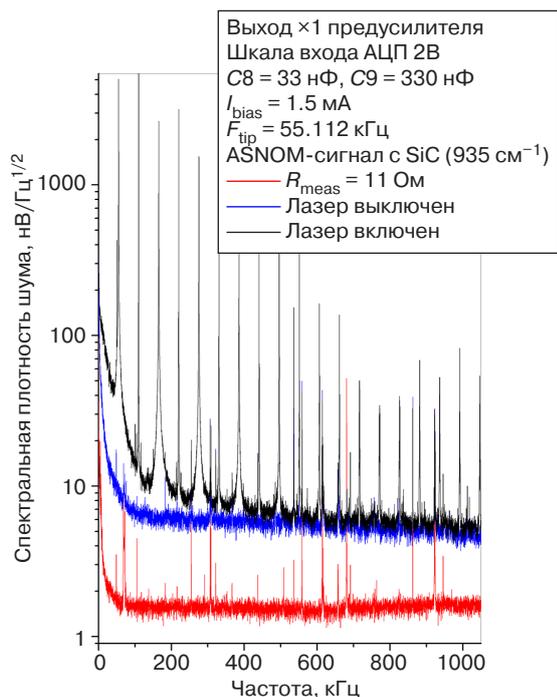


Рис. 9. Спектры шума, записанные при подключении азотно-охлаждаемого КРТ-фотоприемника к исследуемому усилителю.

F_{tip} – частота колебаний кантилевера

и тем более высоких гармоник частоты модуляции «игла-поверхность» (165 кГц, 220 кГц...), представляющих для экспериментатора интерес в методике ANOM. Одновременно с этим можно утверждать, что шумы со спектром вида $1/f^\alpha$, вносимые самим КРТ-фотоприемником, заметно превышают в области частот до 100 кГц уровень шумов использованных в эксперименте микросхем.

ВЫВОДЫ

Использование малошумящих ОУ ADA4898-2 в первом каскаде схемы предварительного усилителя,

предназначенного для работы с КРТ-фотоприемником с площадью активного элемента 100×100 мкм² позволило получить в диапазоне частот 0–1 МГц спектральную плотность шума ниже $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ в пересчете на его вход. Обнаружено, однако, что микросхема LT3009, использованная в качестве источника регулируемого опорного напряжения, при формировании тока смещения через резистор по традиционной для КРТ-фотоприемников схеме вносит шум вида $1/f^\alpha$, заметный на частотах до 100 кГц. Источник тока на полевом транзисторе с использованием «стабилитрона» ADR510 в качестве «идеала» напряжения и не очень малошумящего AD8034 в качестве регулятора тока тоже вносит шумы вида $1/f^\alpha$, заметные до 150–200 кГц. Между тем, измеренный спектр шума самого фотоприемника в рабочем режиме (при температуре жидкого азота) имеет типичную амплитуду порядка $5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Рабочие частоты, на которых и в дальнейших экспериментах предполагается проводить измерения, являются гармониками частоты механических колебаний кантилевера ANOM. Для используемой модели кантилевера FMG01/Pt эта частота составляет 60–80 кГц, и тогда частоты высших гармоник начинаются со 120 кГц. Это означает, с практической точки зрения, что замеченные дрейфовые шумы источников тока смещения не играют определяющей роли. Тем не менее, при разработке электронных схем для совместной работы с КРТ-фотоприемниками следует серьезно относиться к шумовым свойствам источников стабилизированного напряжения.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Norton P. HgCdTe infrared detectors. *Opto-Electron. Rev.* 2002;10(3):159–174.
2. Kopytko M., Rogalski A. New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2022;339:113511. <https://www.doi.org/10.1016/j.sna.2022.113511>
3. Józwiłowska A., Józwiłowski K., Rogalski A. Performance of mercury cadmium telluride photoconductive detectors. *Infrared Phys.* 1991;31(6):543–554. [https://www.doi.org/10.1016/0020-0891\(91\)90141-2](https://www.doi.org/10.1016/0020-0891(91)90141-2)
4. Rogalski A. Commentary on the Record-Breaking Performance of Low-Dimensional Solid Photodetectors. *ACS Photonics.* 2023;10(3):647–653. <https://www.doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c01672>
5. Кульчицкий Н.А., Наумов А.Б., Старцев В.В. Охлаждаемые фотоприемные устройства ИК-диапазона на кадмий-ртуть-теллуре: состояние и перспективы развития. *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2020;6(197):114–121. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.197.6.114.121>
6. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg_{1-x}Cd_xTe. *J. App. Phys.* 1982;53(10):7099–7101. <https://www.doi.org/10.1063/1.330018>

7. Lawson W., Nielsen S., Putley E., Young A. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe–CdTe. *J. Phys. Chem. Solids*. 1959;9(3–4):325–329. [https://www.doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90110-6](https://www.doi.org/10.1016/0022-3697(59)90110-6)
8. Schmit J.L., Stelzer E.L. Temperature and Alloy Compositional Dependences of the Energy Gap of Hg_{1-x}Cd_xTe. *J. Appl. Phys.* 1969;40(12):4865–4869. <https://www.doi.org/10.1063/1.1657304>
9. Scott M.W. Energy Gap in Hg_{1-x}Cd_xTe by Optical Absorption. *J. Appl. Phys.* 1969;40(10):4077–4081. <https://www.doi.org/10.1063/1.1657147>
10. Elliott C., Melngailis J., Harman T., Kafalas J., Kernan W. Pressure Dependence of the Carrier Concentrations in p-Type Alloys of Hg_{1-x}Cd_xTe at 4.2 and 77°K. *Phys. Rev. B*. 1972;5(8):2985. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.5.2985>
11. McCombe B.D., Wagner R.J., Prinz G.A. Far-Infrared Observation of Electric-Dipole-Excited Electron-Spin Resonance in Hg_{1-x}Cd_xTe. *Phys. Rev. Lett.* 1970;25(2):87–90. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.25.87>
12. Xin W., Zhong W., Shi Y., Shi Y., Jing J., Xu T., Guo J., Liu W., Li Y., Liang Z., Xin X., Cheng J., Hu W., Xu H., Liu Y. Low-Dimensional-Materials-Based Photodetectors for Next-Generation Polarized Detection and Imaging. *Adv. Mater.* 2024;36(7):2306772. <https://doi.org/10.1002/adma.202306772>
13. Xue X., Chen M., Luo Y., Qin T., Tang X., Hao Q. High-operating-temperature mid-infrared photodetectors via quantum dot gradient homojunction. *Light: Sci. Appl.* 2023;12(1):2. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-01014-0>
14. Agarwal H., Nowakowski K., Forrer A., Principi A., Bertini R., Battlle-Porro S., Reserbat-Plantey A., Prasad P., Vistoli L., Watanabe K., Taniguchi T., Bachtold A., Scalari G., Krishna Kumar R., Koppens F.H.L. Ultra-broadband photoconductivity in twisted graphene heterostructures with large responsivity. *Nat. Photon.* 2023;17(12):1047–1053. <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01291-0>
15. Lau J.A., Verma V.B., Schwarzer D., Wodtke A.M. Superconducting single-photon detectors in the mid-infrared for physical chemistry and spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2023;52:921–941. <https://doi.org/10.1039/d1cs00434d>
16. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook. *Rep. Prog. Phys.* 2005;68(10):2267. <http://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01>
17. Kimchi J., Frederick J.R., Wong T.T.S. Low-frequency noise in photoconductive HgCdTe detectors. *Proc. SPIE*. 1996;2812. 12 p. <https://doi.org/10.1117/12.254098>
18. Johnson J.B. The Schottky Effect in Low Frequency Circuits. *Phys. Rev.* 1925;26(1):71–85. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.26.71>
19. Schottky W. Small-Shot Effect and Flicker Effect. *Phys. Rev.* 1926;28(1):74–103. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.74>
20. Dutta P., Horn P.M. Low-frequency fluctuations in solids: 1/f noise. *Rev. Mod. Phys.* 1981;53(3):497–516. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.53.497>
21. Voss R.F., Clarke J. 1/f noise in music and speech. *Nature*. 1975;258(5533):317. <https://doi.org/10.1038/258317a0>
22. Press W.H. Flicker noises in astronomy and elsewhere. *Comments Astrophys.* 1978;7(4):103–119.
23. Milotti E. 1/f noise: a pedagogical review. 2002; *ArXiv_0204033v1*. <https://arxiv.org/pdf/physics/0204033>
24. Рыгов С.М. *Введение в статистическую радиофизику. Часть I. Случайные процессы*. М.: Наука; 1976. 496 с.
25. Morikawa M., Nakamichi A. A simple model for pink noise from amplitude modulations. *Sci. Rep.* 2023;13(1):8364. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34816-2>
26. Zenhausern F., O'Boyle M.P., Wickramasinghe H.K. Apertureless near-field optical microscope. *Appl. Phys. Lett.* 1994;65(13):1623–1625. <http://doi.org/10.1063/1.112931>
27. Zenhausern F., Martin Y., Wickramasinghe H.K. Scanning Interferometric Apertureless Microscopy: Optical Imaging at 10 Angstrom Resolution. *Science*. 1995;269(5227):1083–1085. <https://doi.org/10.1126/science.269.5227.1083>
28. Keilmann F., Hillenbrand R. Near-Field Microscopy by Elastic Light Scattering from a Tip. *Philos. Trans.: Math., Phys. Eng. Sci.* 2004;362(1817):787–805. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1347>
29. Казанцев Д.В., Казанцева Е.А. Предусилитель для CdHgTe-фотодетектора. *Приборы и техника эксперимента*. 2020;1:144–150. <https://doi.org/10.31857/S0032816220010218>
30. Shockley W. The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell System Tech. J.* 1949;28(3):435–489. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x>
31. Казанцев Д.В., Казанцева Е.А. Цифровое детектирование оптического сигнала в микроскопе ближнего оптического поля. *Приборы и техника эксперимента*. 2022;2:79–98. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=pribory&y=2022&v=0&n=2&a=Pribory2202014Kazantsev>
32. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comp.* 1965;19(90):297–301. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>
33. Stephens D.R., Diggins C., Turkanis J., Cogswell J. *C++ Cookbook*. O'Reilly Media, Inc.; 2005. 592 p. ISBN 978-059-600-761-4

REFERENCES

1. Norton P. HgCdTe infrared detectors. *Opto-Electron. Rev.* 2002;10(3):159–174.
2. Kopytko M., Rogalski A. New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022;339:113511. <https://www.doi.org/10.1016/j.sna.2022.113511>
3. Józwickowska A., Józwickowski K., Rogalski A. Performance of mercury cadmium telluride photoconductive detectors. *Infrared Phys.* 1991;31(6):543–554. [https://www.doi.org/10.1016/0020-0891\(91\)90141-2](https://www.doi.org/10.1016/0020-0891(91)90141-2)

4. Rogalski A. Commentary on the Record-Breaking Performance of Low-Dimensional Solid Photodetectors. *ACS Photonics*. 2023;10(3):647–653. <https://www.doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c01672>
5. Kulchitsky N.A., Naumov A.B., Startsev V.V. Cooled IR photodetectors based on cadmium-mercury-tellurium: current status and development prospects. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2020;6(197):114–121 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.197.6.114.121>
6. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg_{1-x}Cd_xTe. *J. Appl. Phys.* 1982;53(10):7099–7101. <https://www.doi.org/10.1063/1.330018>
7. Lawson W., Nielsen S., Putley E., Young A. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe–CdTe. *J. Phys. Chem. Solids*. 1959;9(3–4):325–329. [https://www.doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90110-6](https://www.doi.org/10.1016/0022-3697(59)90110-6)
8. Schmit J.L., Stelzer E.L. Temperature and Alloy Compositional Dependences of the Energy Gap of Hg_{1-x}Cd_xTe. *J. Appl. Phys.* 1969;40(12):4865–4869. <https://www.doi.org/10.1063/1.1657304>
9. Scott M.W. Energy Gap in Hg_{1-x}Cd_xTe by Optical Absorption. *J. Appl. Phys.* 1969;40(10):4077–4081. <https://www.doi.org/10.1063/1.1657147>
10. Elliott C., Melngailis J., Harman T., Kafalas J., Kernan W. Pressure Dependence of the Carrier Concentrations in p-Type Alloys of Hg_{1-x}Cd_xTe at 4.2 and 77°K. *Phys. Rev. B*. 1972;5(8):2985. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.5.2985>
11. McCombe B.D., Wagner R.J., Prinz G.A. Far-Infrared Observation of Electric-Dipole-Excited Electron-Spin Resonance in Hg_{1-x}Cd_xTe. *Phys. Rev. Lett.* 1970;25(2):87–90. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.25.87>
12. Xin W., Zhong W., Shi Y., Shi Y., Jing J., Xu T., Guo J., Liu W., Li Y., Liang Z., Xin X., Cheng J., Hu W., Xu H., Liu Y. Low-Dimensional-Materials-Based Photodetectors for Next-Generation Polarized Detection and Imaging. *Adv. Mater.* 2024;36(7):2306772. <https://doi.org/10.1002/adma.202306772>
13. Xue X., Chen M., Luo Y., Qin T., Tang X., Hao Q. High-operating-temperature mid-infrared photodetectors via quantum dot gradient homojunction. *Light: Sci. Appl.* 2023;12(1):2. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-01014-0>
14. Agarwal H., Nowakowski K., Forrer A., Principi A., Bertini R., Battle-Porro S., Reserbat-Plantey A., Prasad P., Vistoli L., Watanabe K., Taniguchi T., Bachtold A., Scalari G., Krishna Kumar R., Koppens F.H.L. Ultra-broadband photoconductivity in twisted graphene heterostructures with large responsivity. *Nat. Photon.* 2023;17(12):1047–1053. <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01291-0>
15. Lau J.A., Verma V.B., Schwarzer D., Wodtke A.M. Superconducting single-photon detectors in the mid-infrared for physical chemistry and spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2023;52:921–941. <https://doi.org/10.1039/d1cs00434d>
16. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook. *Rep. Prog. Phys.* 2005;68(10):2267. <http://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01>
17. Kimchi J., Frederick J.R., Wong T.T.S. Low-frequency noise in photoconductive HgCdTe detectors. *Proc. SPIE*. 1996;2812. 12 p. <https://doi.org/10.1117/12.254098>
18. Johnson J.B. The Schottky Effect in Low Frequency Circuits. *Phys. Rev.* 1925;26(1):71–85. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.26.71>
19. Schottky W. Small-Shot Effect and Flicker Effect. *Phys. Rev.* 1926;28(1):74–103. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.74>
20. Dutta P., Horn P.M. Low-frequency fluctuations in solids: 1/f noise. *Rev. Mod. Phys.* 1981;53(3):497–516. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.53.497>
21. Voss R.F., Clarke J. 1/f noise in music and speech. *Nature*. 1975;258(5533):317. <https://doi.org/10.1038/258317a0>
22. Press W.H. Flicker noises in astronomy and elsewhere. *Comments Astrophys.* 1978;7(4):103–119.
23. Milotti E. 1/f noise: a pedagogical review. 2002; *ArXiv_0204033v1*. <https://arxiv.org/pdf/physics/0204033>
24. Rytov S.M. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Chast' I. Sluchainye protsessy (Introduction to Statistical Radiophysics. Part I. Random Processes)*. Moscow: Nauka; 1976. 496 p. (in Russ.).
25. Morikawa M., Nakamichi A. A simple model for pink noise from amplitude modulations. *Sci. Rep.* 2023;13(1):8364. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34816-2>
26. Zenhausern F., O'Boyle M.P., Wickramasinghe H.K. Apertureless near-field optical microscope. *Appl. Phys. Lett.* 1994;65(13):1623–1625. <http://doi.org/10.1063/1.112931>
27. Zenhausern F., Martin Y., Wickramasinghe H.K. Scanning Interferometric Apertureless Microscopy: Optical Imaging at 10 Angstrom Resolution. *Science*. 1995;269(5227):1083–1085. <https://doi.org/10.1126/science.269.5227.1083>
28. Keilmann F., Hillenbrand R. Near-Field Microscopy by Elastic Light Scattering from a Tip. *Philos. Trans.: Math., Phys. Eng. Sci.* 2004;362(1817):787–805. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1347>
29. Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. A Preamplifier for a CdHgTe Photodetector. *Instrum. Exp. Tech.* 2020;63(1):133–138. <https://doi.org/10.1134/S0020441220010194>
[Original Russian Text: Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. A Preamplifier for a CdHgTe Photodetector. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2020;1:144–150 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032816220010218>]
30. Shockley W. The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell System Tech. J.* 1949;28(3):435–489. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x>
31. Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. Digital Detection of Optical Signals in a Near-Optical-Field Microscope. *Instrum. Exp. Tech.* 2022;65(2):273–291. <https://doi.org/10.1134/S0020441222020130>
[Original Russian Text: Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. Digital Detection of Optical Signals in a Near-Optical-Field Microscope. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2022;2:79–98 (in Russ.). Available from URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=pribory&y=2022&v=0&n=2&a=Pribory2202014Kazantsev>]

32. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comp.* 1965;19(90): 297–301. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>
33. Stephens D.R., Diggins C., Turkanis J., Cogswell J. *C++ Cookbook*. O'Reilly Media, Inc.; 2005. 592 p. ISBN 978-059-600-761-4

Об авторах

Казанцев Дмитрий Всеволодович, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН «Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН) (119991, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 53); профессор, факультет физики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Россия, Москва, Старая Басманная ул., д. 21/5). E-mail: kaza@itep.ru. Scopus Author ID 6603178750, <https://orcid.org/0000-0002-0547-3785>

Казанцева Елена Адольфовна, старший преподаватель, кафедра высшей математики, Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kanele19@gmail.com. Scopus Author ID 57219932826, <https://orcid.org/0009-0004-2019-3310>

About the authors

Dmitry V. Kazantsev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (53, Leninskii pr., Moscow, 119991 Russia); Professor, Faculty of Physics, HSE University (21/5, Staraya Basmannaya ul., Moscow, 101000 Russia). E-mail: kaza@itep.ru. Scopus Author ID 6603178750, <https://orcid.org/0000-0002-0547-3785>

Elena A. Kazantseva, Senior Lecturer, Higher Mathematics Department, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kanele19@gmail.com. Scopus Author ID 57219932826, <https://orcid.org/0009-0004-2019-3310>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 536.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-136-143>
EDN XIFHYB



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование работы трубчатых теплообменников методом сглаженных частиц

А.Е. Коренченко[®], А.В. Сухов

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

Резюме

Цели. В работе теплообменных аппаратов ключевую роль играет скорость теплопередачи в условиях ограниченного пространства. Форма сечения труб может повлиять на характеристики теплообмена. Хотя производство труб кругового сечения проще и обходится дешевле, теплообмен в аппаратах с трубами других поперечных сечений может происходить с большей скоростью, так, чтобы это давало экономические преимущества. Поэтому проведение математического моделирования гидродинамики и теплообмена в трубчатом теплообменном аппарате актуально и интересно как теоретически, так и с прикладной точки зрения. Цель исследования – определение влияния формы сечения труб на интенсивность теплопередачи.

Методы. Численные исследования выполнены методом гидродинамики сглаженных частиц. Продемонстрированы возможности метода сглаженных частиц для решения задач промышленного теплообмена.

Результаты. Анализ интенсивности теплопередачи проведен для труб круглых и прямоугольных сечений. В случаях, когда поперечные сечения труб в теплообменнике являются вытянутыми вдоль некоторого направления, исследовано влияние расположения труб по отношению к набегающему потоку: длинной стороной вдоль потока или поперек его. Исследовано влияние на теплообмен выступов на поверхности труб. Проведен анализ обтекания труб с различными формами поперечных сечений. Выявлены особенности обтекания, найдены поля скоростей и температуры в объеме теплообменника. Найдены значения безразмерного теплового потока (числа Нуссельта) для каждого случая.

Выводы. Сделан вывод о малом влиянии ребрения труб при ламинарном режиме протекания нагреваемой жидкости через пучок труб-теплоносителей. Наибольшее значение теплового потока наблюдалось для труб прямоугольного сечения, расположенных длинной стороной поперек потока, причем различие с данными, полученными для стандартных круглых труб, составило более 15%.

Ключевые слова: теплопередача, теплообменные аппараты, численное моделирование, гидродинамика сглаженных частиц, несжимаемая жидкость, периодические граничные условия

• Поступила: 06.03.2024 • Доработана: 02.09.2024 • Принята к опубликованию: 19.11.2024

Для цитирования: Коренченко А.Е., Сухов А.В. Моделирование работы трубчатых теплообменников методом сглаженных частиц. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):136–143. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-136-143>, <https://elibrary.ru/XIFHYB>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

A smoothed particle hydrodynamics approach for numerical simulation of tube heat exchangers

Anna E. Korenchenko[@], Anton V. Sukhov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. In the confined space of heat exchangers, heat transfer rate plays a key role. The cross-sectional shape of the tubes can affect the heat transfer characteristics. Although circular tubes are easier and less expensive to manufacture, heat transfer in heat exchangers with tubes of other cross-sections can take place at higher rates, thus providing economic advantages. This makes the mathematical modeling of hydrodynamics and heat exchange in a tube apparatus relevant and interesting both from the theoretical and applied point of view. The aim of this study is to determine the influence of the shape of the tube cross-section on the heat transfer intensity.

Methods. Numerical investigations were carried out using smoothed particle hydrodynamics. The possibilities of the smoothed particle method for resolving industrial heat transfer problems were demonstrated.

Results. Heat transfer intensity was analyzed for tubes of circular and rectangular cross-sections. In cases where the cross sections of tubes in the heat exchanger are elongated in a given direction, the influence of the tube position in relation to the oncoming flow was studied. This was performed either with the long side along the flow or across it. The influence of tube surface protrusions on heat exchange was investigated. The flow around tubes with different cross-sectional shapes was also analyzed. The features of the flow around the tubes were established, and the velocity and temperature fields in the heat exchanger volume were defined. The values of the dimensionless heat flux (Nusselt number) for each case were also found.

Conclusions. The influence of finned tubes in the laminar flow regime of heated fluid through the bundle of heat transfer tubes is insignificant. The highest value of the heat flux was observed for tubes of rectangular cross section with the long side transverse to the flow, and the difference with the data obtained for standard round tubes was found to be more than 15%.

Keywords: heat transfer, heat exchanger, numerical modeling, smoothed particle hydrodynamics, incompressible fluid, periodic boundary conditions

• Submitted: 06.03.2024 • Revised: 02.09.2024 • Accepted: 19.11.2024

For citation: Korenchenko A.E., Sukhov A.V. A smoothed particle hydrodynamics approach for numerical simulation of tube heat exchangers. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):136–143. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-136-143>, <https://elibrary.ru/XIFHYB>

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 современном техническом обществе потребность в теплообменных аппаратах крайне велика. Теплообменники используются на предприятиях нефтехимической, металлургической и пищевой промышленности, в судостроении, в жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ). В частности, в ЖКХ на основе теплообменников построены системы отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования. Основную массу теплообменного

оборудования в ЖКХ составляют водоводяные и пароводяные трубчатые теплообменники. Такой теплообменник состоит из блока трубок, погруженных в поток жидкости. По трубкам пропускают жидкость или газ, причем текучие среды, находящиеся в трубках и в потоке, имеют различные начальные температуры. Характеристики теплообменных аппаратов представляют важный практический интерес, поэтому являются предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [1–5]. Разработаны способы интенсификации

теплоотдачи: за счет усложнения формы труб теплообменников ребрением поверхности [6, 7], путем установки турбулизаторов [8], за счет вращения теплообменных труб [8]. В [9] численно рассмотрены характеристики плавления галлия в теплообменнике кожухотрубного типа, имеющего трубы круглого, прямоугольного или эллиптического сечения. Здесь скорость перехода галлия в жидкое состояние зависела от интенсивности передачи тепла от труб. Результаты этого исследования показывают, что наименьшее время плавления достигается при использовании теплообменника с трубами прямоугольного сечения, а использование труб кругового сечения дает самую низкую интенсивность теплопередачи. В [10] показана энергетическая целесообразность применения труб эллиптического сечения в системах аккумулирования тепловой энергии.

Однако из анализа литературы можно заключить, что возможность увеличения теплоотдачи за счет изменения формы поперечного сечения труб с теплоносителем рассмотрена недостаточно и должна быть исследована дополнительно.

Метод сглаженных частиц (smoothed particles hydrodynamics) является бессеточным лагранжевым методом решения задач гидро- и аэродинамики. Суть метода состоит в аппроксимации полей физических величин дискретной системой частиц [11–13]. Метод корректно описывает процессы теплообмена в жидких и газовых средах, показал хорошую производительность и может применяться для решения задач теплопередачи в промышленном производстве.

Целью настоящего исследования является моделирование теплопередачи в трубчатом теплообменнике и анализ интенсивности теплообмена в зависимости от формы поперечного сечения труб с теплоносителем.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В настоящей работе моделируется схема (рис. 1), когда поток холодной воды ($T_0 = 283$ К), ограниченный сверху и снизу плоскими поверхностями, набегает

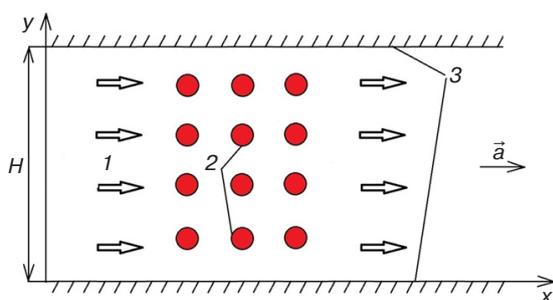


Рис. 1. Схема эксперимента. H – величина зазора теплообменника; 1 – поток жидкости; 2 – трубы; 3 – ограничивающие плоскости

на блок нагретых параллельных трубок, температура которых поддерживается равной ($T_H = 363$ К). Направление скорости в потоке перпендикулярно трубкам. Жидкость в потоке предполагается несжимаемой и ньютоновской. Влиянием силы тяжести пренебрегаем. Задача рассмотрена в двумерной постановке, допустимой при условии, что длина труб намного превышает расстояние между ограничивающими плоскостями.

Уравнения сохранения для жидкости в потоке записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{a}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (T \vec{V}) = \frac{\kappa}{\rho c} \nabla^2 T. \quad (3)$$

Здесь (1) представляет собой закон сохранения количества движения, (2) – уравнение непрерывности и (3) – уравнение теплового баланса в пренебрежении вязкой диссипацией и обозначено: P – давление в жидкости, $\vec{V} = \{V_x, V_y\}$ и T – скорость и температура, \vec{a} – ускорение, связанное с внешней силой. Теплофизические характеристики жидкости (вода) обозначены: ρ – плотность, ν – коэффициент кинематической вязкости, κ – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоемкость, их значения приведены в табл. 1. Граничные условия выбраны следующим образом: плоские поверхности и трубы являются изотермическими, на твердых стенках выполнены условия непротекания и непроницаемости для частиц потока.

Таблица 1. Физико-химические свойства воды

ρ	1000 кг/м ³
κ	0.55 Вт/(м · К)
ν	10 ⁻⁶ м ² /с
c	4200 Дж/(кг · К)

2. МЕТОД СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Для расчета системы (1–3) использован метод гидродинамики сглаженных частиц [11–13]. В этом методе производится замена значения физической величины $f(r)$ в точке пространства на сумму взвешенных значений этой переменной для частиц,

расположенных вблизи. Вес определяется функцией-ядром

$$f(\vec{r}) \approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j W(\vec{r} - \vec{r}_j, h). \quad (4)$$

Здесь m_j , ρ_j – масса и плотность j -й частицы, $W(\vec{r} - \vec{r}_j, h)$ – функция-ядро, h – радиус сглаживания. Суммирование проводится по частицам, попавшим внутрь сферы, радиуса h . Аппроксимации для градиента, дивергенции и оператора Лапласа определяются как [11, 12]:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} f(\vec{r}) &\approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j \vec{\nabla} W(\vec{r} - \vec{r}_j, h), \\ \vec{\nabla} \vec{F}(\vec{r}) &\approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \vec{F}_j \vec{\nabla} W(\vec{r} - \vec{r}_j, h), \\ \Delta f(\vec{r}) &\approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j \Delta W(\vec{r} - \vec{r}_j, h). \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения (1)–(3), записанные для i -й лагранжевой частицы, имеют вид

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\vec{V}_i}{dt} &= -\frac{1}{\rho_i} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} P_j \vec{\nabla} W(\vec{r} - \vec{r}_j, h) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_i} + \\ &+ \nu \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \vec{V}_j \Delta W(\vec{r} - \vec{r}_j, h) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_i} + \vec{a}, \\ \frac{d\rho_i}{dt} &= -\sum_{j=1}^N m_j \vec{V}_j \vec{\nabla} W(\vec{r} - \vec{r}_j, h) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_i}, \\ \frac{dT_i}{dt} &= \frac{\kappa}{\rho_i c} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} T_j \Delta W(\vec{r} - \vec{r}_j, h) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_i}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Функция-ядро $W(\vec{r} - \vec{r}_j, h)$ была выбрана в виде [14]:

$$\begin{aligned} W(\vec{r} - \vec{r}_j, h) &= \frac{7}{4\pi h^2} \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1), \\ q &= \left| \vec{r} - \vec{r}_j \right|, \quad 0 \leq q \leq 2. \end{aligned}$$

Система (6) дополняется уравнением состояния воды [11]:

$$P = \frac{\rho_0 c_{зв}^2}{7} \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^7 - 1 \right), \quad (7)$$

где $c_{зв} = 1500$ м/с – скорость распространения звука в жидкости, ρ_0 – плотность невозмущенной среды.

В [11] утверждается, что уравнение (7) обеспечивает значение сжимаемости, не превышающее реальную сжимаемость воды, составляющую около 0.1%.

Для обеспечения условий проскальзывания и непроницаемости на твердых границах использовался метод зеркальных частиц, предложенный в [13]. Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (6) проводилось методом Рунге – Кутты 3-го порядка точности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Течение Пуазейля между двумя параллельными плоскостями

Для проверки точности расчетов была решена тестовая задача о протекании вязкой жидкости через зазор между двумя твердыми плоскими поверхностями. Схема эксперимента с поправкой на отсутствие труб в вычислительной области показана на рис. 1.

В начальный момент времени жидкость находится в покое, заполняя зазор, и в момент $t = 0$ на нее начинает действовать силовое поле с напряженностью \vec{a} . Жидкость и ограничивающие плоскости имеют одинаковую температуру и полагаются изотермическими. Для моделирования течения следует решить систему уравнений (6), исключив уравнение теплового баланса. В направлении потока заданы периодические граничные условия [14, 15]. В двумерной постановке и в отсутствии силы тяжести задача имеет аналитическое решение, согласно которому зависимость составляющих скорости жидкости от расстояния y от нижней плоскости выражается формулой:

$$V_x(y) = \frac{a}{2\nu} (Hy - y^2), \quad V_y = 0. \quad (8)$$

Таким образом, скорость движения в потоке параллельна ограничивающим плоскостям и описывается параболической зависимостью от поперечной координаты y , причем наибольшее значение достигается при $y = H/2$ и выражается формулой

$$V_{x \max} = aH^2/(8\nu). \quad (9)$$

Решение проводилось для $a = 0.1$ м/с², $H = 2.5$ мм. Число Рейнольдса $Re = V_{x \max} H/\nu$ в этом случае не превышает 1500, что соответствует ламинарному режиму протекания. Результаты расчета показаны на рис. 2 и 3. На рис. 2 изображены профили скорости в зазоре в различные моменты времени. В течение переходного интервала времени ~ 10 с в зазоре устанавливается распределение скорости,

которое отличается от аналитического решения (8) менее чем на 0.1%. На рис. 3 показана зависимость наибольшей скорости в потоке от ширины зазора. Как видно из рисунка, численные и аналитические результаты близки между собой, что демонстрирует возможности метода сглаженных частиц для решения задач гидродинамики.

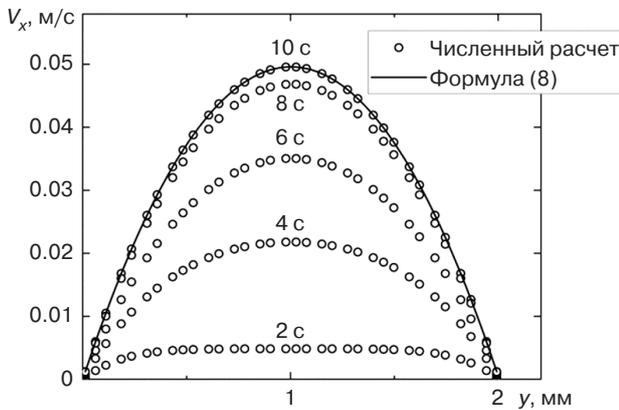


Рис. 2. Результаты расчета скорости в выходном сечении зазора в различные моменты времени и аналитический расчет установившегося профиля скорости: $H = 2$ мм, $a = 0.1$ м/с²

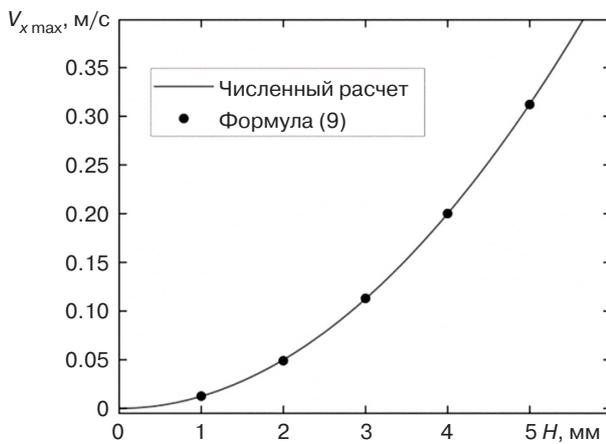


Рис. 3. Численная и аналитическая зависимости наибольшей скорости в зазоре от ширины зазора

3.2. Нагревание воды в трубчатом теплообменнике

Схематичное изображение теплообменника с поперечным потоком показано на рис. 1. Жидкость втекает в теплообменник слева направо под действием силового поля и встречает пучок труб, расположенных под прямым углом к потоку (на рисунке показаны поперечные сечения). Расстояние между центрами труб составляет 4 см как в вертикальных, так и в горизонтальных рядах. Численные расчеты проведены для $H = 0.2$ м, длина теплообменника составляет $L_H = 1$ м. Напряженность силового поля выбрана

равной $a = 10^{-3}$ м/с². Это дает значение максимальной скорости, оцененное «сверху» по формуле (9), $V_{x \max} \approx 2$ м/с, и позволяет утверждать, что протекание будет происходить в ламинарном режиме ($Re < 2000$). Рассмотрены трубы с различными поперечными сечениями (рис. 4): (а) круглые; (б) прямоугольные с вертикальным расположением длинной стороны (поперек потока); (в) прямоугольные с расположением длинной стороны вдоль потока; (г) модель оребренной поверхности, когда вдоль поверхности трубы расположены прямоугольные выступы, размеры выступов 1 мм × 2 мм. На начало расчета жидкость заполняет теплообменник и находится в покое при температуре $T_0 = 283$ К, в момент $t = 0$ включается силовое поле напряженностью \vec{a} . Температура труб составляет $T_H = 363$ К и не изменяется в процессе теплообмена. Задача решена в двумерной постановке, смысл меры площади источника тепла S_H в этом случае несет периметр сечения трубы.

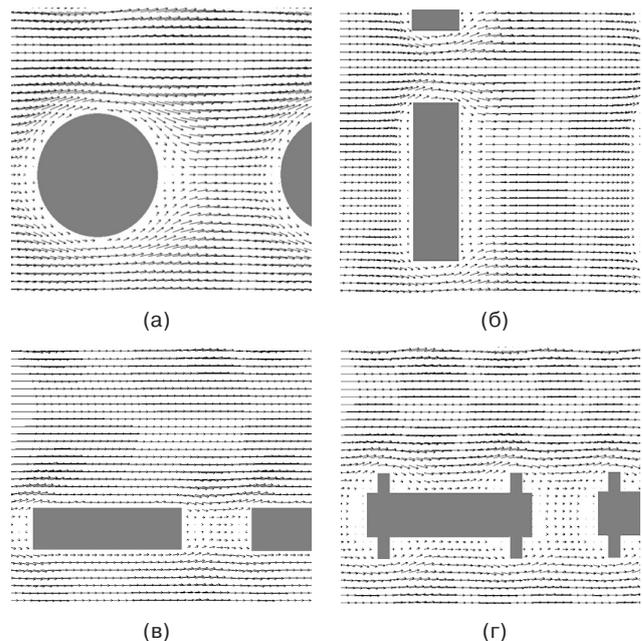


Рис. 4. Распределение скоростей в потоке при обтекании труб с различными поперечными сечениями

На рис. 4 показаны поля распределений скорости при обтекании труб. Длина вектора скорости пропорциональна ее величине, все рисунки сделаны в едином масштабе. Периметры сечения для труб на 4 (а)–(в) равны 6.28 см. Обтекание происходит в ламинарном режиме, вихри и отрывные течения не образуются, режим протекания, раз установившись, более не нарушается. Как видно из рисунка, в случаях (в) и (г) в промежутках между трубами движение жидкости практически отсутствует, и скорости в объеме строго горизонтальны,

т.е. конвективное распространение тепла в поперечном потоке направлении отсутствует.

На рис. 5 показаны зависимости безразмерного теплового потока – числа Нуссельта

$$Nu = \int_{S_H} \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} d\sigma \cdot \frac{L_H}{S_H (T_1 - T_0)}$$

– от периметра сечения для труб различной формы (рис. 4). Изменение периметра труб кругового сечения происходило за счет изменения радиуса. Для труб прямоугольного сечения длина короткой стороны была фиксирована и составляла 0.5 см. Изменение периметра происходило за счет изменения длины другой стороны или за счет оребрения трубы.

Графики на рис. 5 позволяют выявить следующие закономерности.

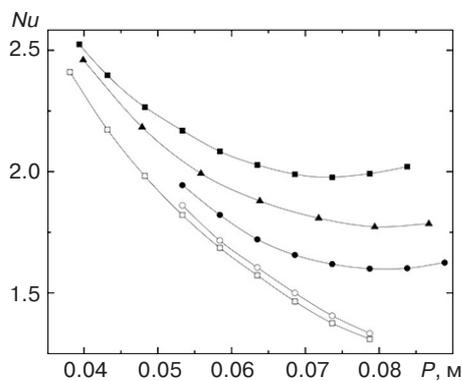


Рис. 5. Зависимость безразмерного теплового потока от периметра сечения для труб с различными формами поперечного сечения: ▲ – круговое сечение (а); ■ – вертикальный прямоугольник без выступов (б); ● – вертикальный прямоугольник с 4 выступами 1 мм × 2 мм; □ – горизонтальный прямоугольник без выступов (в); ○ – горизонтальный прямоугольник с 4 выступами 1 мм × 2 мм (г)

При увеличении площади поверхности труб число Нуссельта уменьшается. Исключение составляет поток, рассчитанный для круглых труб (а) и труб с сечением в виде вертикального прямоугольника (б). Как видно из рисунка, в этих случаях при некотором значении периметра поток начинает увеличиваться при увеличении периметра. Это связано, по-видимому, с тем, что увеличение размеров труб в перпендикулярном потоку направлении приводит к перекрытию зазоров между ними, и весь поток направляется вдоль стенок аппарата, что незначительно интенсифицирует теплоперенос.

Зависимости теплового потока от периметра труб сближаются при уменьшении периметра, это связано с тем, что при уменьшении размеров труб форма их сечения становится несущественным фактором.

Оребрение труб в рассмотренных условиях не приводит к интенсификации теплообмена.

Выступы на трубах горизонтально вытянутого прямоугольного сечения (г) вызывают несущественное увеличение теплового потока (~2%) в сравнении с трубами без выступов, однако в случае сечения (б) выступы приводят к заметному уменьшению потока тепла (~25%), видимо, из-за торможения и застоя жидкости. При турбулентном режиме течений выступы вызывают появление отрывных течений вихрей, что приводит к увеличению интенсивности теплопереноса [16]. Однако в ламинарном режиме, как показали расчеты, это может привести к уменьшению потока тепла от теплоносителя.

Как показывают графики зависимостей Nu от формы поперечного сечения и размеров теплоносителя, в случае (в) преобладает механизм молекулярной теплопроводности, и число Нуссельта имеет самое низкое значение. Наибольшее значение числа Нуссельта наблюдалось для труб с сечением в виде вертикального прямоугольника, причем различие теплового потока со значениями, полученными для труб кругового сечения, составило ~15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено математическое моделирование теплообмена в трубчатом теплообменном аппарате при поперечном обтекании труб. Численные исследования проведены для ламинарного режима течений и для труб с различными формами и периметрами поперечных сечений и позволяют сделать следующие выводы.

1. Оребрение внешней поверхности труб не вызывает существенного увеличения теплового потока. При турбулентном режиме течений выступы порождают вихри и отрывные течения, что приводит к интенсификации теплопереноса. Однако в ламинарном режиме это может привести к уменьшению потока тепла от теплоносителя за счет торможения жидкости возле трубы при обтекании выступов.
2. При условии равенства периметров наибольшую интенсивность нагрева дают трубы вытянутого поперек потока сечения, причем увеличение теплового потока по сравнению с значениями, полученными для труб стандартного вида, составило ~15%.
3. Явления, приводящие к торможению или застою жидкости, вызывают уменьшение интенсивности теплообмена.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All the authors have equally contributed to the scientific work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотонос Я.Д., Багуддинова А.Г., Золотонос А.Я. *Трубчатые теплообменники. Моделирование, расчет*. М.: Лань; 2021. 272 с. URL: <https://lanbook.com/catalog/energetika/trubchatye-teploobmenniki-modelirovanie-raschet/>
2. Головин В.А., Тюрина С.А., Щелков В.А. Современные подходы к снижению накипеобразования в теплообменном оборудовании. *Russian Technological Journal*. 2022;10(3):93–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102>
3. Cui P., Yang W., Zhang W., Zhu K., Spitler J.D., Yu M. Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives. *Energy and Built Environment*. 2024;5(2):255–269. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.10.002>
4. Luo J., Lu P., Chen K., Luo X., Chen J., Liang Y., Yang Z., Chen Y. Experimental and simulation investigation on the heat exchangers in an ORC under various heat source/sink conditions. *Energy*. 2023;264:126189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126189>
5. Сафронова Е.В., Спиридонов А.В., Молоток Е.В., Трус В.А. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов теплообмена в программе ANSYS на примере теплообменного аппарата установки «НАФТАН». *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2024;49(1):95–100. <https://doi.org/10.52928/2070-1616-2024-49-1-95-100>
6. Артемьев Д.В., Зайцев А.В., Санавбаров Р.И. Моделирование процесса теплопередачи в кожухотрубном теплообменном аппарате. *Вестник Международной Академии Холода*. 2021;3:5–14. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-3-5-14>
7. Романова Е.В., Колиух А.Н., Лебедев Е.А. Применение пакета ANSYS при исследовании гидравлического сопротивления оребренного рекуператора. *Вестник ТГТУ*. 2017;23(3):420–427. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.420-427>
8. Кустов Б.О., Бальчугов А.В., Бадеников А.В., Герасимчук М.В., Захаров К.Д. Экспериментальные исследования перспективных способов интенсификации теплопередачи в трубчатом теплообменнике. *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(3):174–183. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/3/2560>
9. Rana S., Zunaid M., Kumar R. CFD analysis for heat transfer comparison in circular, rectangular and elliptical tube heat exchangers filled with PCM. *Mater. Today Proc.* 2022;56(2):637–644. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.412>
10. Khuda M.A., Sarunac N. A comparative study of latent heat thermal energy storage (LTES) system using cylindrical and elliptical tubes in a staggered tube arrangement. *J. Energy Storage*. 2024;87:111333. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111333>
11. Monaghan J.J. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics*. 2005;68(8):1703. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01>
12. Lucy L.B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astron. J.* 1977;82:1013–1024. <https://doi.org/10.1086/112164>
13. Morris J.P., Fox P.J., Zhu Y. Modeling Low Reynolds Number Incompressible Flows Using SPH. *J. Comput. Phys.* 1997;136(1):214–226. <https://doi.org/10.1006/jcph.1997.5776>
14. Hosain M.L., Dominguez J.M., Bel Fdhila R., Kyprianidis K. Smoothed particle hydrodynamics modeling of industrial processes involving heat transfer. *Appl. Energy*. 2019;252:113441. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113441>
15. Jonsson P., Andreasson P., Hellström J.G.I., Jonsén P., Lundström T.S. Smoothed Particle Hydrodynamic simulation of hydraulic jump using periodic open boundaries. *Appl. Math. Model.* 2016;40(19–20):8391–8405. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.04.028>
16. Афанасьев В.Н., Кон Дехай, Егоров К.С. Верификация моделей для турбулентных тепловых потоков при обтекании прямоугольного выступа на пластине. *Известия вузов. Машиностроение*. 2019;1(706):58–71. <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-1-58-71>

REFERENCES

1. Zolotonosov Ya.D., Bagoutdinova A.G., Zolotonosov A.Ya. *Trubchatye teploobmenniki. Modelirovanie, raschet (Tubular Heat Exchangers. Modeling, Calculation)*. Moscow: Lan; 2021. 272 p. (in Russ.). Available from URL: <https://lanbook.com/catalog/energetika/trubchatye-teploobmenniki-modelirovanie-raschet/>
2. Golovin V.A., Tyurina S.A., Shchelkov V.A. Contemporary approaches to reducing scale formation in heat-exchange equipment. *Russian Technological Journal*. 2022;10(3):93–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102>
3. Cui P., Yang W., Zhang W., Zhu K., Spitler J.D., Yu M. Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives. *Energy and Built Environment*. 2024;5(2):255–269. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.10.002>
4. Luo J., Lu P., Chen K., Luo X., Chen J., Liang Y., Yang Z., Chen Y. Experimental and simulation investigation on the heat exchangers in an ORC under various heat source/sink conditions. *Energy*. 2023;264:126189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126189>
5. Safronova E.V., Spiridonov A.V., Molotok E.V., Trus V.A. Computer simulation and optimization of heat transfer processes in ANSYS software using the example of a heat exchanger installation AVT-2 JSC “NAFTAN”. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Series B*. 2024;49(1):95–100 (in Russ.). <https://doi.org/10.52928/2070-1616-2024-49-1-95-100>
6. Artemyev D.V., Zaitsev A.V., Sanavbarov R.I. Simulation of heat transfer process in shell-and-tube heat exchanger. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda = Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2021;3:5–14 (in Russ.). <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-3-5-14>

7. Romanova E.V., Koliukh A.N., Lebedev E.A. Application of ANSYS package in research of hydraulic resistance of finned heat exchanger. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transactions of Tambov State Technical University*. 2017;23(3):420–427 (in Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.420-427>
8. Kustov B.O., Balchugov A.V., Badenikov A.V., Gerasimchuk M.V., Zakharov K.D. Experimental studies of promising methods of heat transfer intensification in a tubular heat exchanger. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta (Izvestiya TPU). Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(3): 174–183 (in Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/3/2560>
9. Rana S., Zunaid M., Kumar R. CFD analysis for heat transfer comparison in circular, rectangular and elliptical tube heat exchangers filled with PCM. *Mater. Today Proc.* 2022;56(2):637–644. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.412>
10. Khuda M.A., Sarunac N. A comparative study of latent heat thermal energy storage (LTES) system using cylindrical and elliptical tubes in a staggered tube arrangement. *J. Energy Storage*. 2024;87:111333. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111333>
11. Monaghan J.J. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics*. 2005;68(8):1703. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01>
12. Lucy L.B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astron. J.* 1977;82:1013–1024. <https://doi.org/10.1086/112164>
13. Morris J.P., Fox P.J., Zhu Y. Modeling Low Reynolds Number Incompressible Flows Using SPH. *J. Comput. Phys.* 1997;136(1):214–226. <https://doi.org/10.1006/jcph.1997.5776>
14. Hosain M.L., Dominguez J.M., Bel Fdhila R., Kyprianidis K. Smoothed particle hydrodynamics modeling of industrial processes involving heat transfer. *Appl. Energy*. 2019;252:113441. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113441>
15. Jonsson P., Andreasson P., Hellström J.G.I., Jonsén P., Lundström T.S. Smoothed Particle Hydrodynamic simulation of hydraulic jump using periodic open boundaries. *Appl. Math. Model.* 2016;40(19–20):8391–8405. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.04.028>
16. Afanasiev V.N., Kon Dehai, Egorov K.S. Verification of models for turbulent heat fluxes in the flow over rectangular rib on a plate. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU J. Mechan. Eng.* 2019;1(706):58–71 (in Russ.). <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-1-58-71>

Об авторах

Коренченко Анна Евгеньевна, д.ф.-м.н., профессор, кафедра высшей математики, Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: korenchenko@mirea.ru. Scopus Author ID 10043443100, SPIN-код РИНЦ 9908-9198, <https://orcid.org/0000-0002-3413-8855>

Сухов Антон Владимирович, студент, Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tosha.sukhov@inbox.ru. <https://orcid.org/0009-0006-0812-6099>

About the authors

Anna E. Korenchenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Higher Mathematics Department, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: korenchenko@mirea.ru. Scopus Author ID 10043443100, RSCI SPIN-code 9908-9198, <https://orcid.org/0000-0002-3413-8855>

Anton V. Sukhov, Student, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tosha.sukhov@inbox.ru. <https://orcid.org/0009-0006-0812-6099>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 51.7

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-144-156>

EDN WPRKRW



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Многофакторный дискриминантный анализ электрокардиограммы

П.А. Сахарова[®],
В.А. Баландин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: polinka6777@gmail.com

Резюме

Цели. Статья посвящена исследованию variability сердечного ритма с помощью многофакторно-дискриминантного анализа. Дискриминантный анализ является эффективным статистическим методом классификации, позволяющим разбивать объекты на группы исходя из различий между характеризующими эти объекты параметрами. Эффективность многофакторного дискриминантного анализа, который активно используется в медицине для диагностики сердечно-сосудистых патологий, обусловлена широким набором анализируемых параметров: статистических, спектральных и автокорреляционных. Цель работы – выявление методом дискриминантного анализа параметров вариационной пульсометрии, которые обеспечивают наилучшее различение между здоровыми пациентами и пациентами с аритмией.

Методы. В качестве исходных данных использовались длительности кардиоинтервалов пациентов возраста 63–72 лет, размещенные в открытой базе биомедицинских сигналов PhysioNet.org. При выборе аргументов дискриминантной функции преимущество отдавалось слабо коррелирующим между собой параметрам, имеющим нормальное распределение и различающимся у здоровых и больных пациентов. Статистическая значимость различий между параметрами двух групп проверялась с помощью *t*-критерия Стьюдента и *U*-критерия Манна – Уитни.

Результаты. Получены две дискриминантные функции: первая зависела от трех временных параметров; вторая, помимо временных, включала один спектральный и один автокорреляционный. В обоих случаях были рассчитаны средние значения дискриминантной функции для здоровых и больных пациентов. Статистическая значимость различий средних значений дискриминантной функции в двух группах исследовалась с помощью *t*-критерия Стьюдента.

Выводы. Показано, что значения первой дискриминантной функции незначительно различаются у здоровых и больных пациентов, в то время как включение автокорреляционного и спектрального параметров в число аргументов дискриминантной функции обеспечивает выраженные и статистически значимые различия между пациентами двух групп. Тем самым продемонстрирована высокая значимость спектральных и автокорреляционных параметров в диагностике аритмии.

Ключевые слова: variability сердечного ритма, вариационная пульсометрия, спектральный анализ, автокорреляционный анализ, RR-интервалы, многофакторный дискриминантный анализ, дискриминантная функция

• Поступила: 26.03.2024 • Доработана: 09.06.2024 • Принята к опубликованию: 10.12.2024

Для цитирования: Сахарова П.А., Баландин В.А. Многофакторный дискриминантный анализ электрокардиограммы. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):144–156. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-144-156>, <https://elibrary.ru/WPRKRW>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Multivariate discriminant analysis of the electrocardiogram

Polina A. Sakharova[@],
Vyacheslav A. Balandin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: polinka6777@gmail.com

Abstract

Objectives. The article presents a study of heart rate variability using multivariate discriminant analysis. Representing an effective statistical method of classification, discriminant analysis can be used to divide objects into groups based on differences in the parameters characterizing these objects. The effectiveness of multivariate discriminant analysis, which is actively used in medicine to diagnose cardiovascular pathologies, is due to the wide range of analyzed parameters: statistical, spectral, and autocorrelation. The aim of the work is to identify the parameters of variational pulsometry, which provide the best distinction between healthy patients and patients with arrhythmia, by means of discriminant analysis.

Methods. The durations of cardiac intervals of patients aged 63–72 years, which had been placed in the open database of biomedical signals PhysioNet.org, were used as initial data. When selecting the arguments of the discriminant function, priority was given to parameters that were weakly correlated with each other, had a normal distribution, and differed between healthy and ill patients. The statistical significance of differences between the parameters of the two groups was tested using Student's *t*-test and Mann–Whitney *U* test.

Results. Two discriminant functions were obtained: the first depended on three time-domain parameters, while the second included one spectral and one autocorrelation parameter in addition to time-domain parameters. In both cases, the average values of the discriminant function for healthy and sick patients were calculated. The statistical significance of differences in the average values of the discriminant function in the two groups was investigated using Student's *t*-test.

Conclusions. The values of the first discriminant function are shown to differ insignificantly between healthy and sick patients, while the inclusion of autocorrelation and spectral parameters in the number of arguments of the discriminant function provides pronounced and statistically significant differences between patients of the two groups. Thus, the high significance of spectral and autocorrelation parameters in arrhythmia diagnosis was demonstrated.

Keywords: heart rate variability, variational pulsometry, spectral analysis, autocorrelation analysis, RR-intervals, multivariate discriminant analysis, discriminant function

• Submitted: 26.03.2024 • Revised: 09.06.2024 • Accepted: 10.12.2024

For citation: Sakharova P.A., Balandin V.A. Multivariate discriminant analysis of the electrocardiogram. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):144–156. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-144-156>, <https://elibrary.ru/WPRKRW>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются основной причиной смерти людей во всем мире [1]. Среди них особое место занимают заболевания, связанные с нарушениями ритма сердца – различные аритмии [2]. По статистике около трети людей, имеющих ССЗ, страдают аритмией [3]. Ввиду высоких показателей смертности от ССЗ становится особенно актуальной своевременная диагностика нарушений работы сердечно-сосудистой системы.

Основным способом диагностики ССЗ наряду с традиционным амплитудно-временным анализом является изучение variability сердечного ритма (ВСР) [4]. Для количественного определения показателей ВСР используются различные методы, из которых можно выделить следующие [5]:

- 1) методы, в основе которых лежат статистические преобразования: к ним относится временной анализ ВСР, числовыми характеристиками которого являются среднее значение длительности кардиоинтервалов (RR normal-to-normal interval, RRNN); среднее квадратичное отклонение (СКО) сердечного цикла (standard deviation of normal-to-normal intervals, SDNN); процент числа пар последовательных кардиоинтервалов, отличающихся более чем на 50 мс (percentage of consecutive normal-to-normal intervals that differ by more than 50 ms, pNN50); квадратный корень из средней суммы квадратов разности величин последовательных пар кардиоинтервалов (root mean square of the successive differences, RMSSD);
- 2) геометрические методы, включающие скаттерграфию и гистографический анализ, объектами которого являются: мода (Мо) – значение длительности кардиоинтервала, которое встречается наиболее часто в выборке; амплитуда моды (АМо) – доля кардиоинтервалов (в %), которые попадают в модальный интервал; коэффициент вариации (в %) $CV = \frac{СКО}{RRNN}$, вариационный размах (delta RR interval, dRR) – разница между максимальным и минимальным значениями кардиоинтервалов, а также набор индексов, из которых наибольшее распространение получил индекс напряжения регуляторных систем Баевского $ИН = \frac{АМо}{2Мо \cdot dRR}$;

- 3) методы анализа волновой структуры:

- спектральный метод, анализирующий мощность спектра RR-интервалов в области очень низких частот 0.004–0.03 Гц (very low frequency, VLF), низких частот 0.04–0.15 Гц (low frequency, LF), высоких частот 0.15–0.40 Гц (high frequency, HF),

нормализованные значения последних двух параметров (LF_{norm} , HF_{norm}), индекс централизации ИЦ = $(HF + LF)/VLF$ и индекс вагосимпатического взаимодействия LF/HF ;

- автокорреляционный метод, рассчитывающий номер сдвига, при котором автокорреляционная функция впервые становится отрицательной (C0), и значение автокорреляционной функции при первом сдвиге (C1).

Описание параметров и их диагностическая значимость подробно даны в работе [6].

Данные параметры рассчитываются по ритмограммам, которые получают из электрокардиограммы (ЭКГ) как временные разности между появлением последовательных R-зубцов. На рис. 1¹ показано, как интервалы между появлением R-зубцов на ЭКГ откладываются на ритмограмме по оси ординат и нумеруются по оси абсцисс.

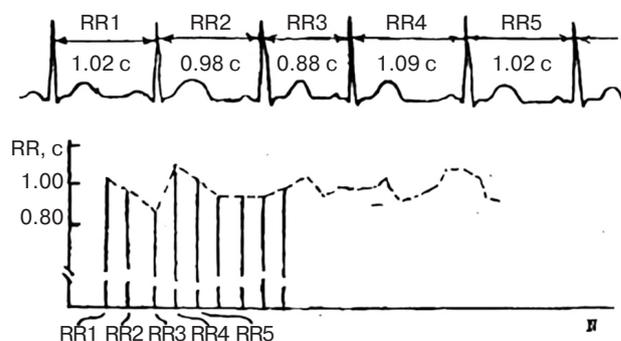


Рис. 1. Получение ритмограммы из исходной ЭКГ

Полученные значения показателей анализируются рядом статистических методов для установления значимых отличий у здоровых и больных пациентов. Среди таких методов важное место занимает многофакторный дискриминантный анализ (МДА), заключающийся в построении линейной комбинации наиболее информативных признаков, которая наилучшим образом обеспечивала бы различие между группами. Эффективность применения МДА в кардиологии продемонстрирована, в частности, в работе [7], результатом которой стала модель распределения детей и подростков по группам с различными состояниями сердечно-сосудистой системы, обеспечивающая точность 98.1%.

В работе [8] показано, что значимость МДА на основе только статистических параметров вариационной пульсометрии существенно зависит от вида

¹ Методическая разработка практического занятия по патофизиологии для студентов 3 курса лечебного и педиатрического факультетов. <https://patfizo.narod.ru/read/heartprakt.htm>. Дата обращения 05.06.2024. [Methodical development of practical training on pathophysiology for 3rd year students of general medicine and pediatrics departments. <https://patfizo.narod.ru/read/heartprakt.htm> (in Russ.). Accessed June 05, 2024.]

Таблица 1. Показатели ВСП здорового пациента при различных длительностях записи ЭКГ

Параметр	Продолжительность							
	1 мин	2 мин	5 мин	10 мин	15 мин	20 мин	30 мин	Норма [8]
ЧСС*, уд/мин	82	82	79	78	79	80	81	60–90
RRNN, мс	736	734	760	773	764	751	744	660–937
dRR, мс	125	172	250	250	289	312	312	310–450
SDNN, мс	26	32	46	42	49	52	54	40–80
Mo, мс	750	750	750	789	789	750	750	870–930
AMo, %	59	48	45	45	40	37	35	32–38
CV, %	3.5	4.4	6	5.5	6.4	6.9	7.2	3–12
pNN50, %	7.2	6.7	6.1	5.4	4.7	4.6	5.6	1–9
RMSSD, мс	27.7	26.1	26.5	25.6	24.7	24.7	25.7	20–50
ИН, у.е.	315	186	120	115	87	78	75	80–150

* ЧСС – частота сердечных сокращений.

патологии сердечной деятельности. В частности, при аритмии различие между значениями дискриминантной функции (ДФ) здоровых и больных пациентов составляет ~25%, что существенно ниже, чем, например, для хронической сердечной недостаточности.

Цель данного исследования состоит в выявлении из вышеперечисленных признаков наиболее информативных, которые бы существенно увеличили различия ДФ при наличии или отсутствии аритмии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными материалами для работы явились фрагменты результатов ЭКГ-обследования, а именно – длительности RR-интервалов. Эти записи были получены из открытой базы биомедицинских сигналов PhysioBank портала PhysioNet². Данные о здоровых пациентах взяты из базы сигналов Normal Sinus Rhythm RR Interval Database. Записи больных пациентов с диагнозом «аритмия» были взяты из базы MIT-BIH Arrhythmia Database, которая содержит записи ЭКГ с различными нарушениями ритма сердца. Следует отметить, что в этой базе отсутствует дифференциация больных пациентов по видам аритмии. В связи с этим в данном исследовании выбор пациентов был случайным с точки зрения конкретного вида аритмии.

Из приведенных баз в настоящей работе были отобраны 10 здоровых пациентов и 10 пациентов с диагнозом «аритмия». Возраст пациентов составляет 63–72 лет.

Для оценки эффективной длительности записи ЭКГ предварительно были рассчитаны статистические параметры ВСП здорового пациента по ритмограммам продолжительностью 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 мин. Значения наиболее распространенных временных и гистографических показателей приведены в табл. 1.

В колонке «Норма» табл. 1 приведены диапазоны значений параметров ВСП, которые, по мнению авторов [5, 9], соответствуют клинической норме³.

В рамках задачи данной работы записи длительностью 1 и 2 мин рассматривать нецелесообразно, поскольку для них значения некоторых показателей (SDNN, AMo, pNN50, dRR) и индекса ИН существенно отличаются от средних значений.

В работе [10] отмечается, что независимо от длительности регистрации при анализе данных в качестве базовых выборок целесообразно использовать 5-минутные сегменты записи. Рассмотрение 2–3 таких последовательных сегментов подтверждает условия стабильности физиологического статуса. При этом для случая нарушений ритма (аритмия) лучше рассматривать запись длительностью не менее 10 мин.

Как видно из табл. 1, параметры SDNN, ИН стабилизируются только при длительности записи 15 мин.

Таким образом, в данной работе для расчета статистических параметров использовались записи длительностью 15 мин.

² The Research Resource for Complex Physiologic Signals. <https://physionet.org>. Дата обращения 24.03.2024. [The Research Resource for Complex Physiologic Signals. <https://physionet.org>. Accessed March 24, 2024.]

³ Анализ variability сердечного ритма. <http://protein.bio.msu.ru/~akula/varCI/VarCI.htm>. Дата обращения 24.03.2024. [Analysis of heart rate variability. <http://protein.bio.msu.ru/~akula/varCI/VarCI.htm> (in Russ.). Accessed March 24, 2024.]

Выбор этой длительности аргументирован также тем, что, как показано в работе [8], при пятиминутных записях, используемых для экспресс-диагностики ССЗ, различия между здоровыми пациентами и больными с аритмией не столь значительны.

Что касается спектральных и автокорреляционных параметров, то их рекомендуется оценивать при коротких записях ЭКГ (длительностью около 5 мин), поскольку они достаточно быстро стабилизируются [11], и на этом интервале их изменения могут рассматриваться как стационарные процессы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 представлены параметры ВСР для здоровых пациентов, в табл. 3 – для больных с аритмией. Доверительные интервалы рассчитаны по стандартной методике для малых выборок с использованием критерия Стьюдента для доверительной вероятности 95%.

Более наглядно различия между показателями в группах демонстрирует диаграмма на рис. 2, где показаны p -значения теста Стьюдента (в случаях нормального распределения признака в обеих группах) и теста Манна – Уитни (в случаях, где хотя бы в одной выборке распределение признака

отлично от нормального). Штриховая линия соответствует выбранному уровню доверительной вероятности $p = 0.05$.

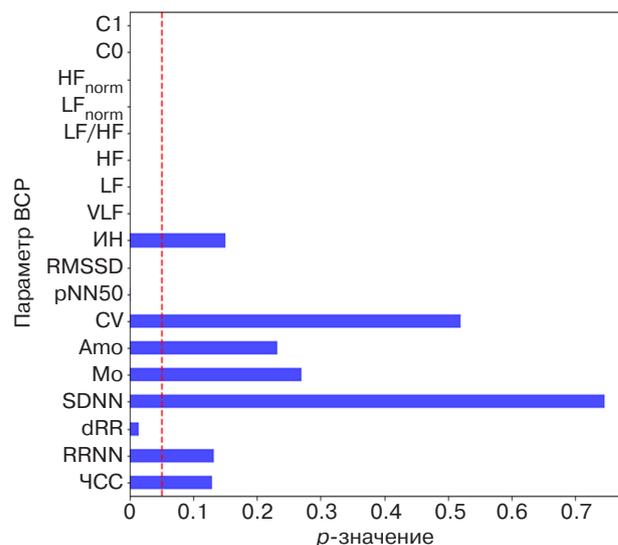


Рис. 2. Диаграмма p -значений для параметров ВСР

Анализируя показатели табл. 2 и 3 и p -значения диаграммы на рис. 2, можно сделать вывод, что наибольшую различающую способность для данной патологии имеют спектральные и автокорреляционные параметры. Следовательно, включение этих

Таблица 2. Значения параметров ВСР здоровых пациентов

Параметр \ Пациент	Пациент										Среднее	Норма [8]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
ЧСС, уд/мин	75	82	75	89	108	76	87	77	79	77	82.5 ± 7.3	60–90
RRNN, мс	795	728	805	674	553	789	689	784	762	779	735.8 ± 56.1	660–937
dRR, мс	282	305	398	343	227	375	368	391	422	329	344 ± 43	310–450
SDNN, мс	49	61	41	80	54	76	78	64	73	64	64 ± 9	40–80
Mo, мс	828	727	797	742	594	773	633	797	711	812	741.4 ± 55.5	870–930
АМо, %	41	34	54	27	45	25	41	42	26	40	37.5 ± 6.7	32–38
CV, %	6.1	8.4	5.1	11.8	10	9.6	11.6	8.1	9.6	8.2	8.9 ± 1.5	3–12
pNN50, %	3.9	1.6	2.1	0.7	0.2	13.6	3.1	3.2	8.1	0.5	3.7 ± 3.0	1–9
RMSSD, мс	24	19	20	15	10	41	21	24	31	16	22.1 ± 6.3	20–50
IH, у.е.	88	77	85	53	167	44	88	67	43	74	78.6 ± 25.3	80–150
VLF, %	51	61	74.3	69	53.5	49	72.5	60.4	49.8	40.4	58.1 ± 8.0	15–30
LF, %	35.8	34.5	19.8	23.8	37.9	32	23.1	30.6	34.1	54.6	32.6 ± 7.0	15–40
HF, %	13.2	4.6	5.9	7.2	8.6	19	4.4	9	16.1	5	9.3 ± 3.7	15–25
LF/HF	2.7	7.6	3.3	3.3	4.4	1.6	5.3	3.4	2.1	11	4.5 ± 2.1	1.5–2
LFnorm	73.1	88.3	77	76.9	81.6	62.2	84	77.2	67.9	91.7	78.0 ± 6.4	41.2–60
HFnorm	26.9	11.7	23	23.1	18.4	37.8	16	22.8	32.1	8.3	22.0 ± 6.4	40–58.8
C0	16	31	81	46	44	37	51	28	52	25	41.1 ± 13.1	–
C1	0.72	0.94	0.86	0.93	0.77	0.51	0.87	0.88	0.7	0.89	0.81 ± 0.10	–

параметров в состав ДФ увеличит дифференциацию между больными и здоровыми пациентами. Для подтверждения данного предположения в работе сравниваются две ДФ:

- зависимая только от статистических параметров ВСП (1-й этап);
- зависимая от комплекса параметров ВСП: статистических, автокорреляционных и спектральных (2-й этап).

Решение о том, какая из функций наиболее адекватно разделяет пациентов на два кластера, будет выноситься на основании результатов *t*-критерия Стьюдента, оценивающего значимость различий средних значений в двух выборках.

Этап 1. Дискриминантная функция статистических показателей

1.1. Отбор параметров для дискриминантного анализа

Параметры эффективной ДФ, несущие разную информацию и не повторяющие друг друга, должны удовлетворять следующим требованиям:

- желательно, чтобы они имели нормальное распределение;
- параметры не должны существенно коррелировать между собой;

- параметры должны хорошо различаться у представителей двух групп (отличия средних значений в группе здоровых и группе больных должны быть статистически значимы).

Анализ табл. 2 и 3 говорит о том, что значения показателей dRR, RMSSD и pNN50 сильно отличаются у здоровых и больных пациентов: значения показателя dRR в среднем выше в группе больных на 65%, чем в группе здоровых; показатель RMSSD, соответственно, выше на 349% в группе больных пациентов, и показатель pNN50 выше в группе больных на 600%. Ввиду того, что показатели RMSSD и pNN50 сильно коррелируют друг с другом [12], т.е. являются взаимозаменяемыми, в дальнейшем для анализа использован RMSSD.

Параметр АМо обычно обладает хорошей прогностической значимостью: превышение этим показателем значения 50% расценивается как наличие заболевания сердечно-сосудистой системы [5], поэтому, несмотря на то, что амплитуда моды у больных в среднем выше, чем у здоровых, только на 18%, принято решение о включении амплитуды моды в набор аргументов ДФ.

Все статистические тесты проводились на уровне значимости $\alpha = 0.05$.

Гипотеза о нормальности распределения параметров проверялась с помощью критерия

Таблица 3. Значения параметров ВСП больных пациентов

Пациент \ Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее	Норма [8]
ЧСС, уд/мин	76	74	71	83	66	79	82	74	88	73	76.6 ± 4.6	60–90
RRNN, мс	789	808	841	720	905	759	735	811	680	820	786.8 ± 46.7	660–937
dRR, мс	500	403	342	405	281	711	673	775	997	575	566 ± 160	310–450
SDNN, мс	46	39	46	32	56	83	79	71	147	78	67.7 ± 23.8	40–80
Мо, мс	792	825	869	731	903	761	712	842	581	836	785.2 ± 66.9	870–930
АМо, %	50	50	47	58	32	69	39	37	17	43	44.2 ± 10.2	32–38
CV, %	5.8	4.8	5.4	4.4	6.2	11	10.8	8.8	21.6	9.6	8.8 ± 3.7	3–12
pNN50, %	7.1	26.2	13.2	7.2	26.4	15.7	33.9	14.7	80.4	34.5	25.9 ± 15.4	1–9
RMSSD, мс	54	55	56	45	47	141	126	101	258	110	99.3 ± 47.2	20–50
ИН, у.е.	63	75	80	98	63	64	41	28	15	44	57 ± 18	80–150
VLF, %	4.8	4.5	2.1	3.7	9.7	4.1	19.7	14.2	12.3	11	8.6 ± 4.1	15–30
LF, %	6.5	9.6	25.3	3.6	8	8.6	12.3	10.2	15	17.4	11.7 ± 4.5	15–40
HF, %	88.7	85.9	72.6	92.7	82.2	87.3	68	75.6	72.7	71.7	79.7 ± 6.2	15–25
LF/HF	0.07	0.11	0.35	0.04	0.1	0.1	0.18	0.14	0.21	0.24	0.15 ± 0.07	1.5–2
LFnorm	6.8	10	25.8	3.7	8.9	9	15.3	11.9	17.1	19.6	12.8 ± 4.7	41.2–60
HFnorm	93.2	90	74.2	96.3	91.1	91	84.7	88.1	82.9	80.4	87.2 ± 4.7	40–58.8
C0	1	1	2	2	4	1	1	1	1	1	1.5 ± 0.7	–
C1	–0.04	–0.09	0.28	0.05	0.34	–0.5	–0.4	–0.3	–0.22	–0.06	–0.09 ± 0.20	–

Шапиро – Уилка, подходящего для малых выборок. Результаты приведены в табл. 4. Статистика критерия Шапиро – Уилка обозначена буквой W . В качестве нулевой гипотезы H_0 принимается предположение о том, что данное распределение не противоречит нормальному.

Стоит отметить, что у больных пациентов вследствие неравномерных нарушений ритма распределение RR-интервалов не стремится к нормальному, поэтому закон распределения показателей ВСП также может отличаться от нормального.

Так как $W > W_{\text{крит}}$ нулевая гипотеза не отклоняется, тем самым нет оснований полагать, что в группе здоровых пациентов распределение параметров АМо, dRR, RMSSD отличается от нормального.

При применении критерия Стьюдента для выявления значимости различий средних по каждому параметру в группе больных и здоровых необходимо, чтобы распределение в обеих выборках соответствовало нормальному. Из табл. 4 следует, что распределение параметра RMSSD в группе пациентов с аритмией отличается от нормального. В этом случае

t -тест был заменен непараметрическим аналогом – расчетом U -критерия Манна – Уитни, который менее чувствителен к отклонениям распределения от нормального и позволяет сравнить выраженность показателя в двух выборках.

Результаты t -теста и теста Манна – Уитни приведены в табл. 5. В качестве нулевой гипотезы H_0 в случае t -критерия выступает предположение о том, что различия средних значений в группах здоровых и больных незначимы (или распределение признака в двух группах одинаково в случае U -критерия).

Из табл. 5 следует, что параметры RMSSD и dRR заметно отличаются у больных и здоровых пациентов, поскольку значение t -статистики для dRR превышает табличное, а значение U , которое интерпретируется иначе, для RMSSD не превышает табличное, но амплитуда моды в данном случае показала плохую дискриминирующую способность. Скорее всего, это обусловлено недостаточным объемом выборки, а также тем, что у больных с аритмией экстрасистолы сильно влияют на такие показатели, как ИИ и АМо, и в результате их значения мало

Таблица 4. Результаты проверки гипотезы о нормальности распределения параметров ВСП

Группа	Параметр ВСП	Критическое значение $W_{\text{крит}}$	Рассчитанное значение W	Принятая гипотеза
Здоровые	АМо	0.842	0.9224	H_0
	RMSSD	0.842	0.9194	H_0
	dRR	0.842	0.9576	H_0
	LF/HF	0.842	0.835	H_0
	С0	0.842	0.9249	H_0
Больные	АМо	0.842	0.9850	H_0
	RMSSD	0.842	0.7976	H_1
	dRR	0.842	0.9533	H_0
	LF/HF	0.842	0.9277	H_0
	С0	0.842	0.6033	H_1

Таблица 5. Результаты t -теста и теста Манна – Уитни

Параметры ВСП, имеющие нормальное распределение	Критическое значение $t_{\text{крит}}$	Рассчитанное значение t	Принятая гипотеза
АМо	2.101	1.237	H_0
LF/HF	2.101	4.757	H_1
dRR	2.101	3.035	H_1
Параметры ВСП, распределение которых отличается от нормального	Критическое значение $U_{\text{крит}}$	Рассчитанное значение U	Принятая гипотеза
RMSSD	23	0	H_1
С0	23	0	H_1

отличаются от нормальных. Тем не менее, в данной работе этот показатель оставлен, поскольку обычно он обладает высокой прогностической значимостью и слабо коррелирует с другими параметрами ВСП. Эффективность ДФ можно дополнительно оценивать по значению коэффициента перед параметром АМо: он не должен быть больше, чем у наиболее информативных признаков.

Коэффициенты корреляции рассчитаны по правилу Пирсона и содержатся в табл. 6 (первые 3 строки и первые 3 столбца).

Таблица 6. Корреляция между статистическими параметрами ВСП

Параметр \ Параметр	АМо	RMSSD	dRR	LF/HF	С0
АМо	1	-0.52	-0.22	0.22	0.28
RMSSD	-0.52	1	0.58	-0.53	-0.06
dRR	-0.22	0.58	1	-0.30	0.44
LF/HF	0.22	-0.53	-0.30	1	-0.29
С0	0.28	-0.06	0.44	-0.29	1

Как следует из табл. 6, корреляция между параметрами слабая или умеренная (по классификации Чеддока).

1.2. Стандартизация и нормировка

В литературе, посвященной методам классификации, часто прибегают к стандартизации [13, 14] или нормировке по минимаксу [15, 16] для устранения различий между единицами измерения параметров. В противном случае весовые коэффициенты ДФ могут ввести в заблуждение относительно значимости параметров.

На рис. 3 представлен характерный вид участка 15-минутной ритмограммы длительностью 1 мин, а также значения параметров ВСП, рассчитанные по полной (15-минутной) ритмограмме. Из-за больших различий в значениях параметров для получения адекватных результатов необходимо провести нормализацию.

Не существует единого мнения о том, какому методу приведения величин к одному масштабу следует отдавать предпочтение. С целью изучения различий между двумя методами и выявления наиболее эффективного применительно к данному исследованию было решено построить две ДФ, параметры которых:

- 1) предварительно подверглись стандартизации;
- 2) предварительно подверглись нормировке.

Стандартизация осуществлялась по формуле $\frac{x - x_{\text{сред}}}{\sigma}$, где σ – это СКО, $x_{\text{сред}}$ – среднее значение параметра.

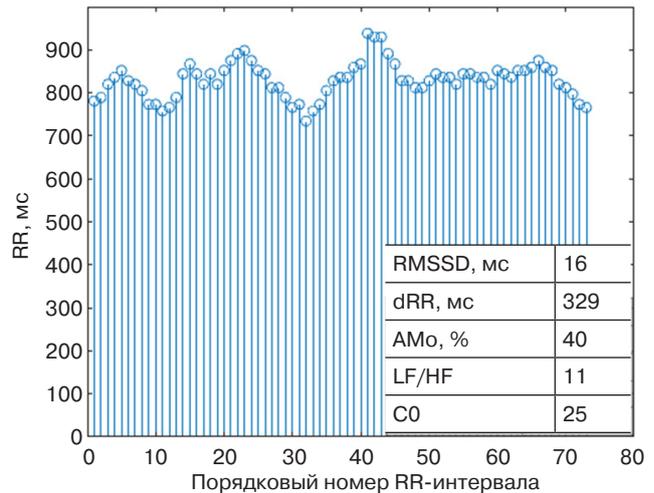


Рис. 3. Участок ритмограммы здорового пациента и параметры ВСП

Нормировка осуществлялась по формуле $\frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}$, где x_{min} – минимальное значение признака, x_{max} – максимальное значение признака.

1.3. Дискриминантный анализ

Многофакторный дискриминантный анализ осуществлялся по методике, подробно изложенной в работе [17].

Исходные данные представляются в матричной форме. Для каждого признака и каждого класса формируется вектор средних значений. Затем рассчитываются центрированные и ковариационные матрицы. На основе ковариационных матриц для двух классов (здоровых и больных) рассчитывается общая ковариационная матрица и матрица, обратная к ней. Чтобы найти вектор коэффициентов ДФ, необходимо умножить матрицу, обратную к общей ковариационной матрице, на разницу двух центрированных матриц.

В случае стандартизации ДФ имеет вид:

$$DF_s = 1.27 \cdot dRR - 1.73 \cdot \text{АМо} - 4.28 \cdot \text{RMSSD}. \quad (1)$$

В случае нормировки ДФ имеет вид:

$$DF_n = 4.85 \cdot dRR - 7.217 \cdot \text{АМо} - 17.397 \cdot \text{RMSSD}. \quad (2)$$

В табл. 7 приведены результаты проверки соответствия распределения значений ДФ нормальному закону.

Согласно критерию Шапиро – Уилка, распределение значений двух ДФ в обеих группах не противоречит нормальному. Следовательно, для оценки значимости различий средних применим *t*-критерий Стьюдента.

Рассчитанные значения критерия Стьюдента в случае классификации как по DF_s , так и по DF_n

Таблица 7. Результаты проверки гипотезы о нормальности распределения значений ДФ

Группа	ДФ	Критическое значение $W_{\text{крит}}$	Рассчитанное значение W	Принятая гипотеза
Здоровые	DF_s	0.842	0.9170	H_0
	DF_n	0.842	0.9157	H_0
Больные	DF_s	0.842	0.8573	H_0
	DF_n	0.842	0.8745	H_0

(1.44 и 1.94 соответственно) оказались меньше критического значения $t_{\text{крит}}$, равного 2.26. Следовательно, нет оснований отвергать гипотезу о том, что средние значения ДФ у здоровых и больных людей не различаются.

На рис. 4 показано точечное распределение значений ДФ для здоровых и больных пациентов в случае стандартизации (а) и нормировки (б). Средние значения ДФ показаны сплошной линией, доверительные интервалы значений ДФ показаны штриховыми линиями (короткие пунктирные линии – для здоровых пациентов, длинные – для больных). Вывод о низкой эффективности дискриминации становится очевиден: доверительные интервалы значений ДФ для обеих групп пересекаются, и надежно разделить два кластера не представляется возможным.

Низкая эффективность функций DF_s и DF_n подтверждает предположение о недостаточности статистических параметров для надежного выявления аритмии. Данный вывод подтверждается результатами работы [8], в которой значения ДФ, зависящей от пяти статистических параметров, отличались не более чем на 25% у здоровых пациентов и больных с аритмией.

Стоит отметить, что оба метода масштабирования присвоили одинаковый «ранг» признакам по уровню их вклада в ДФ: RMSSD, AMo, dRR (в порядке убывания значимости).

Этап 2. Дискриминантная функция временных, спектральных и автокорреляционных показателей

2.1. Отбор параметров для дискриминантного анализа

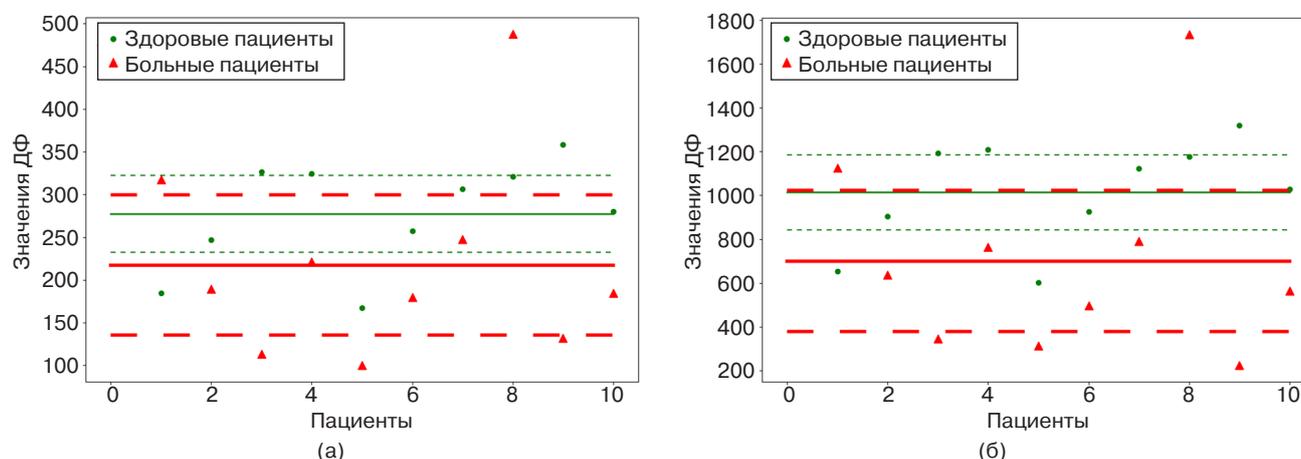
К ранее отобранному статистическим параметрам добавлены два параметра из числа наиболее различающихся у больных и здоровых пациентов: C0 и LF/HF.

Из табл. 4 следует, что значение W -статистики в группе больных пациентов в случае C0 не превышает критическое табличное значение, поэтому распределение этого параметра противоречит нормальному, а для LF/HF статистика в пределах погрешности соответствует табличному значению, поэтому распределение этого показателя можно считать непротиворечащим нормальному.

Значимость различий параметров в двух группах проверена с помощью t -критерия Стьюдента (LF/HF) и U -критерия (C0). Результаты тестов представлены в табл. 5.

В обоих случаях подтвердилась альтернативная гипотеза о статистически значимом различии значений параметров в двух группах.

Новые параметры слабо или умеренно коррелируют с введенными ранее. Коэффициенты корреляции между всеми параметрами содержит табл. 6.

**Рис. 4.** Значения ДФ в случае стандартизации (а) и нормировки (б) (3 параметра) ($p = 0.95$)

2.2. Стандартизация и нормировка новых параметров

Стандартизация и нормировка LF/HF и C0 проводилась по расчетным формулам, приведенным в п. 1.2.

2.3. Дискриминантный анализ

Для стандартизованных параметров ДФ выглядит следующим образом:

$$DF_s = 0.804 \cdot dRR + 2.732 \cdot AMo + 2.381 \times \\ \times RMSSD - 8.242 \cdot C0 - 5.194 \cdot LF/HF. \quad (3)$$

Для нормированных параметров ДФ принимает вид:

$$DF_n = 3.357 \cdot dRR + 11.418 \cdot AMo + 9.623 \times \\ \times RMSSD - 27.568 \cdot C0 - 19.162 \cdot LF/HF. \quad (4)$$

Гипотеза о нормальном распределении значений ДФ подтвердилась (рассчитанные значения *W*-статистики приведены в табл. 8), поэтому для определения эффективности дискриминации применим *t*-критерий.

Тест по критерию Стьюдента подтвердил статистическую значимость различий средних в двух выборках: значение *t*-статистики в случае дискриминации по DF_s равно 6.67, по DF_n равно 6.27, т.е.

в обоих случаях превышает критическое значение, равное 2.26.

На рис. 5 показано точечное распределение значений ДФ для здоровых и больных пациентов в случае стандартизации (а) и нормировки (б). Средние значения ДФ показаны сплошной линией, доверительные интервалы значений ДФ показаны сплошными полосами (более темный цвет – больные пациенты, светлый – здоровые пациенты).

Видно, что доверительные интервалы не пересекаются, и группы здоровых пациентов и пациентов с аритмией надежно различаются.

Обе функции расположили параметры в одинаковом порядке по убыванию их значимости: C0, LF/HF, AMo, RMSSD, dRR. Также следует отметить, что разброс значений ДФ относительно среднего значения идентичен для обоих видов масштабирования, что свидетельствует о соответствии результатов, полученных методами стандартизации и нормирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассчитаны значения показателей вариационной пульсометрии для 10 здоровых пациентов и 10 пациентов с аритмией.

Проведен отбор информативных признаков для МДА. Приоритет отдавался признакам, которые обладают высокой прогностической значимостью и тем, которые отвечают критериям: имеют нормальное

Таблица 8. Результаты проверки гипотезы о нормальности распределения значений ДФ

Группа	ДФ	Критическое значение $W_{крит}$	Рассчитанное значение W	Принятая гипотеза
Здоровые	DF_s	0.842	0.9688	H_0
	DF_n	0.842	0.9682	H_0
Больные	DF_s	0.842	0.9393	H_0
	DF_n	0.842	0.9395	H_0

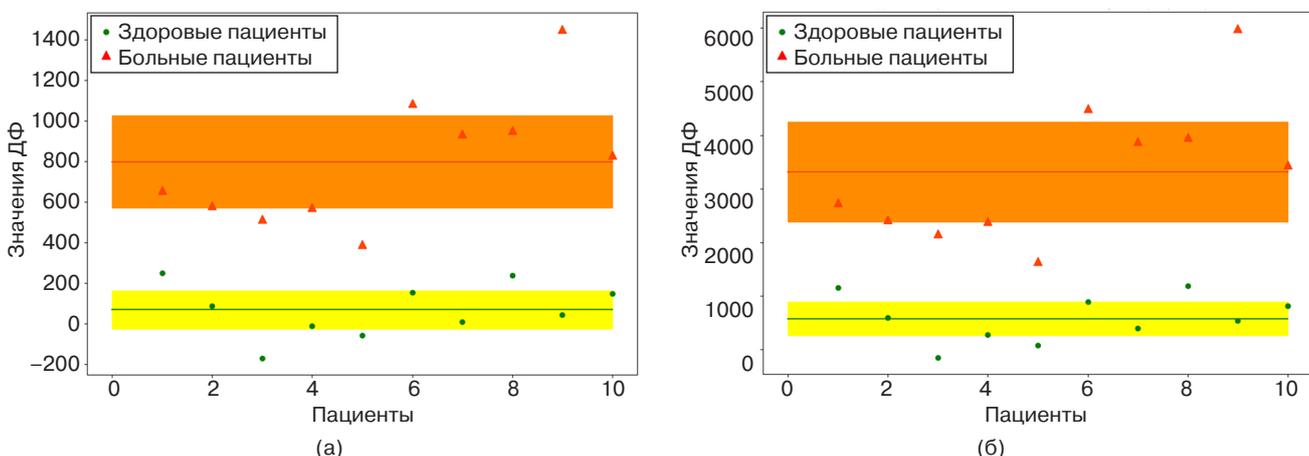


Рис. 5. Значения ДФ в случае стандартизации (а) и нормировки (б) (5 параметров)

распределение, слабо коррелируют друг с другом и значимо различаются у больных и здоровых пациентов. Были сформированы 2 группы признаков: группа статистических параметров (RMSSD, dRR, AMo) и более представительная группа, включившая дополнительно один спектральный и один автокорреляционный параметры (RMSSD, dRR, AMo, LF/HF, C0).

Для обеих групп построены ДФ с использованием различных подходов к масштабированию значений информативных признаков. Показано, что стандартизация и нормировка приводят к одинаковым результатам: совпадению различающей способности функций и одинаковой оценке вкладов параметров в ДФ.

t-Критерий Стьюдента наглядно продемонстрировал высокую классифицирующую способность ДФ в случае добавления параметров LF/HF и C0 к статистическим параметрам, при этом как в случае стандартизации, так и в случае нормировки

значения ДФ для больных и здоровых пациентов не пересекаются. Таким образом, показано, что МДА может эффективно идентифицировать различия между пациентами с аритмией и здоровыми пациентами. Следует отметить, что исследование проводилось на небольших выборках (10 здоровых и 10 больных пациентов), поэтому данные выводы подлежат уточнению на выборках большего объема.

Вклад авторов

П.А. Сахарова – обработка исходных данных, расчет параметров, анализ результатов.

В.А. Баландин – постановка задачи, разработка программы исследования, анализ результатов.

Authors' contributions

P.A. Sakharova – processing initial data, calculation of parameters, and analysis of the results.

V.A. Balandin – problem statement, development of the research program, analysis of the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермошкин В.И. Предполагаемый механизм возникновения аритмии сердца человека. *Образовательный вестник «Сознание»*. 2013;15(6):4–15.
2. Гетман С.И. Распространенность нарушений ритма сердца и проводимости среди обратившихся за медицинской помощью к кардиологу на амбулаторном этапе. *Кардиология*. 2018;58(6):20–28. <https://doi.org/10.18087/cardio.2018.6.10130>
3. Арзыкулов Ж.А., Омаров А.А., Китуев Б.Б., Турсунова Ф.А., Ештай А.А., Павлова Н.Г. Инновации в лечении аритмии сердца. *Вестник хирургии Казахстана*. 2012;4(32):4–5.
4. Зиеп Б.М., Таратухин Е.О. Возможности методики вариабельности сердечного ритма. *Российский кардиологический журнал*. 2011;6:69–75.
5. Бабунц И.В., Мириджанян Э.М., Машаех Ю.А. *Азбука анализа вариабельности сердечного ритма*. Ставрополь: Принт-мастер; 2002. 112 р.
6. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Гаврилушкин А.П. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (часть 1). *Вестник аритмологии*. 2002;24:65–86.
7. Бых А.И., Высоцкая Е.В., Порван А.П., Рак Л.И. и др. Использование дискриминантного анализа для диагностики хронической сердечной недостаточности у подростков. *Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование*. 2010;31:16–22.
8. Силкина У.И., Баландин В.А. Дискриминантный анализ параметров вариационной пульсометрии. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):81–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-81-91>
9. Новиков А.А., Смоленский А.В., Михайлова А.В. Подходы к оценке показателей вариабельности сердечного ритма (обзор литературы). *Вестник новых медицинских технологий*. 2023;17(3):85–94. <https://doi.org/10.24412/2075-4094-2023-3-3-3>
10. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. *Ультразвуковая и функциональная диагностика*. 2001;3:108–127.
11. Алейникова Т.В. Вариабельность сердечного ритма (обзор литературы). *Проблемы здоровья и экологии*. 2012;1:17–23. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2012-9-1-3>
12. Беседина С.А., Баландин В.А. Корреляция показателей вариабельности сердечного ритма. *Научный диалог: Молодой ученый*. 2017. С. 33–37. <https://doi.org/10.18411/spc-22-11-2017-11>
13. Куликов А.Л., Бездушный Д.И., Осокин В.Ю. Применение линейного дискриминантного анализа для классификации аварийных режимов электрической сети. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2020;5:38–47. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.5.038-047>
14. Сукиасян А.Г., Маркина В.С., Митрофанов Д.П., Шабалина У.М. Кластеризация подразделений интегрированной группы предприятий по уровню риска на основе методов многомерного статистического анализа. *Фундаментальные исследования*. 2019;5:115–125.
15. Будько О.Н., Сенько Е.В. Классификационные функции для экспресс-диагностики степени заболевания артериальной гипертензией. В сб.: *BIG DATA и анализ высокого уровня: материалы Четвертой Международной научно-практической конференции*. 2018. С. 360–365. URL: <https://elibr.grsu.by/doc/48339>

16. Павленков М.Н., Смирнова Н.А. Разработка технологии оценки устойчивости предприятия химического комплекса. *Статистика и Экономика*. 2013;3:66–69.
17. Сизых Д.С., Сизых Н.В. Особенности преподавания методов дискриминантного анализа для подготовки специалистов по направлению «Бизнес-информатика». В кн.: *Образование: опыт и перспективы развития*; под ред. Ю.Н. Исаева, И.В. Павлова. Чебоксары: ИД «Среда»; 2019. С. 107–133. <https://doi.org/10.31483/r-33128>

REFERENCES

1. Ermoshkin V.I. The proposed mechanism of arrhythmia human heart. *Obrazovatel'nyi vestnik "Soznanie" = Educational Bulletin "Consciousness"*. 2013;15(6):4–15 (in Russ.).
2. Getman S.I. Characteristics of Disturbances of Heart Rhythm and Conduction Among Patients Attending Consultation of a Cardiologist at Ambulatory Stage. *Kardiologiya*. 2018;58(6):20–28 (in Russ.). <https://doi.org/10.18087/cardio.2018.6.10130>
3. Arzykulov Zh.A., Omarov A.A., Kituev B.B., Tursunova F.A., Eshtai A.A., Pavlova N.G. Innovations in the treatment of cardiac arrhythmia. *Vestnik khirurgii Kazakhstana = Bulletin of Surgery in Kazakhstan*. 2012;4(32):4–5 (in Russ.).
4. Ziep B.M., Taratukhin E.O. Heart rate variability assessment and its potential. *Rossiiskii kardiologicheskii zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2011;6:69–75 (in Russ.).
5. Babunts I.V., Miridzhanyan E.M., Mashaekh Yu.A. *Azbuka analiza variabel'nosti serdechnogo ritma (The ABC of Heart Rate Variability Analysis)*. Stavropol: Print-Master; 2002. 112 p. (in Russ.).
6. Baevskii R.M., Ivanov G.G., Gavrilushkin A.P., et al. Analysis of heart rate variability using various electrocardiographic systems (Part 1). *Vestnik aritmologii = Journal of Arrhythmology*. 2002;24:65–86 (in Russ.).
7. Bykh A.I., Vysotskaya E.V., Porvan A.P., et al. Using of discriminant analysis for diagnosis chronic cardiac insufficiency on teenagers. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Khar'kovskii politekhnicheskii institut. Seriya: Informatika i modelirovanie = Bulletin of the National Technical University Kharkov Polytechnic Institute. Series: Informatics and Modeling*. 2010;31:16–22 (in Russ.).
8. Silkina U.I., Balandin V.A. Discriminant analysis of variational pulsometry parameters. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*. 2020;8(3):81–91 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-81-91>
9. Novikov A.A., Smolensky A.V., Mikhailova A.V. Approaches to assessing heart rate variability (literature review). *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii. Elektronnoe izdanie = J. New Medical Technologies*. 2023;17(3):85–94 (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2075-4094-2023-3-3-3>
10. Baevsky R.M., Ivanov G.G. Cardiac Rhythm variability: theoretical aspects and opportunities of clinical application. *Ul'trazvukovaya i funktsional'naya diagnostika = Ultrasonnd & Functional Diagnostics*. 2001;3:108–127 (in Russ.).
11. Alejnikova T.V. Heart rate variability (literature review). *Problemy zdorov'ya i ekologii = Health and Ecology Issues*. 2012;1:17–23 (in Russ.). <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2012-9-1-3>
12. Besedina S.A., Balandin V.A. Correlation of heart rhythm variability parameters. *Nauchnyi dialog: Molodoi uchenyi = Scientific Dialog: Young Scientist*. 2017. P. 33–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.18411/spc-22-11-2017-11>
13. Kulikov A.L., Bezdushnii D.I., Osokin V.Yu. Application of linear discriminant analysis for classification of emergency grid emergency states. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2020;5:38–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.5.038-047>
14. Sukiasyan A.G., Markina V.S., Mitrofanov D.P., Shabalina U.M. Clustering departments of integrated groups of enterprises according to level of risk based on methods of multivariate statistical analysis. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2019;5:115–125 (in Russ.).
15. Budko O.N., Senko E.V. Classification functions for express diagnostics of the degree of disease with arterial hypertension. In: *BIG DATA Advanced Analytics: Collection of Materials of the Fourth International Scientific and Practical Conference*. 2018. P. 360–365 (in Russ.). Available from URL: <https://elib.grsu.by/doc/48339>
16. Pavlenkov M.N., Smirnova N.A. Development of technology for the assessment of stability of an enterprise of the chemical complex. *Statistika i Ekonomika = Statistics and Economics*. 2013;3:66–69 (in Russ.).
17. Sizykh D.S., Sizykh N.V. Features of teaching methods of discriminant analysis for training specialists in the direction of “Business Informatics”. In: Isaev Y.N., Pavlov I.V. (Eds). *Obrazovanie: opyt i perspektivy razvitiya (Education: Experience and Development Prospects)*. Cheboksary: Sreda; 2019. P. 107–133 (in Russ.). <https://doi.org/10.31483/r-33128>

Об авторах

Сахарова Полина Александровна, бакалавр, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: polinka6777@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0008-1323-9308>

Баландин Вячеслав Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедра биокибернетических систем и технологий, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: admiral49@mail.ru. Scopus Author ID 7003691025, SPIN-код РИНЦ 1288-9918

About the authors

Polina A. Sakharova, Bachelor, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: polinka6777@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0008-1323-9308>

Vyacheslav A. Balandin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant Professor, Department of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: admiral49@mail.ru. Scopus Author ID 7003691025, RSCI SPIN-code 1288-9918

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 30.01.2025 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 19.5.

Тираж 100 экз. Заказ № 2177.

Подписку на печатную версию
Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print January 30, 2025.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 19.5.

100 copies. Order No. 2177.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

