

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

12+

www.rtg-mirea.ru



11(5) 2023



ISSN 2782-3210 (Print)
ISSN 2500-316X (Online)

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 non-destructive 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
2023, том 11, № 5

Russian Technological Journal
2023, Vol. 11, No. 5

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



Russian Technological Journal 2023, том 11, № 5

Дата опубликования 30 сентября 2023 г.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радио-технических, 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, индексируется в РГБ, РИНЦ, eLibrary, Соционет, 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 (ПТУ 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.rtlj-mirea.ru>

Russian Technological Journal 2023, Vol. 11, No. 5

Publication date September 30, 2023.

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 State Library (RSL), Russian Science Citation Index, eLibrary, Socionet, 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.banyas@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, заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем 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, директор 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, 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, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, 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, Director 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** *Н.Г. Бабак, Л.Ю. Белорыбкин, Ш.А. Оцоков, А.А. Теренин, А.И. Шаброва*
Автоматическое обезличивание конфиденциальной информации
- С.В. Зувев*
- 19** Геометрические свойства квантовой запутанности
и машинное обучение

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- Д.С. Воруничев, М.С. Костин*
- 34** Исследование профилограммной структуры микрополосковых СВЧ-модулей,
изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати
- Т.Э. Гельфман, А.П. Пирхавка*
- 45** Оценка эффективности скользящего резервирования радиоэлектронных
средств

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

- Е.С. Лепёшкина, Н.Д. Кустов, В.Х. Ханов*
- 54** Применение кодов с исправлением двух ошибок для защиты
конфигурационной памяти программируемой логики от действия
космической радиации
- В.И. Мусатов, Ф.А. Федулов, Д.В. Савельев, Е.В. Болотина, Л.Ю. Фетисов*
- 63** Нелинейный магнитоэлектрический эффект в кольцевой композитной
гетероструктуре
- А.С. Сигов, Е.Р. Лазаренко, Н.Б. Голованова, О.А. Минаева, С.И. Аневский,
Р.В. Минаев, П.Ю. Пушкин*
- 71** Использование синхротронного излучения отдельного электрона
для спектродиагностики оптического диапазона

Аналитическое приборостроение и технологии

- 81** *М.Ю. Никольшин, А.В. Фрунзе, В.К. Битюков*
DC/DC-преобразователь для питания спектральных ламп

Математическое моделирование

- 94** *Н.Н. Карабутов*
Об адаптивной идентификации систем с несколькими нелинейностями
- Э.М. Карташов*
- 106** Новый энергетический эффект в областях нецилиндрического типа
с термоизолированной движущейся границей

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Nikita G. Babak, Leonid Yu. Belorybkin, Shamil A. Otsokov, Alexey A. Terenin, Anastasia I. Shabrova*
Automatic depersonalization of confidential information

- 19** *Sergei V. Zuev*
Geometric properties of quantum entanglement and machine learning

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 34** *Dmitry S. Vorunichev, Mikhail S. Kostin*
Investigation of the profilogram structure of microstrip microwave modules manufactured using additive 3D-printing technology
- 45** *Tatyana E. Gelfman, Alexey P. Pirkhavka*
Evaluation of the effectiveness of sliding redundancy of radioelectronic facilities

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 54** *Ekaterina S. Lepeshkina, Nikita D. Kustov, Vladislav Kh. Khanov*
Application of double-error correction codes to protect configuration programmable logic memory against space radiation
- 63** *Vladimir I. Musatov, Fedor A. Fedulov, Dmitrii V. Savelev, Ekaterina V. Bolotina, Leonid Y. Fetisov*
Nonlinear magnetoelectric effect in a ring composite heterostructure
- 71** *Alexander S. Sigov, Evgenij R. Lazarenko, Natalia B. Golovanova, Olga A. Minaeva, Sergei I. Anevsky, Roman V. Minaev, Pavel Yu. Pushkin*
Synchrotron radiation of a single electron application for optical spectroradiometry

Analytical instrument engineering and technology

- 81** *Mikhail Yu. Nikolshin, Alexander V. Frunze, Vladimir K. Bitukov*
DC/DC converter to power spectral lamps

Mathematical modeling

- 94** *Nikolay N. Karabutov*
On adaptive identification of systems having multiple nonlinearities
- 106** *Eduard M. Kartashov*
New energy effect in non-cylindrical domains with a thermally insulated moving boundary

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

УДК 004.41, 004.89
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-7-18>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Автоматическое обезличивание конфиденциальной информации

Н.Г. Бабак^{@, 1, 2},
Л.Ю. Белорыбкин²,
Ш.А. Оцоков³,
А.А. Теренин²,
А.И. Шаброва²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250 Россия

² Публичное акционерное общество «Сбербанк России», Москва, 117312 Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: nikita.enrollee@gmail.com

Резюме

Цели. В то время как объем персональных данных, передаваемых по сети, продолжает расти, законодательные органы все более жестко регулируют процессы хранения и обработки цифровой информации. В работе рассматривается проблема защиты персональных данных и другой конфиденциальной информации (КИ), например, банковской или врачебной тайны, физических лиц. Одним из способов защиты конфиденциальных данных является их обезличивание – преобразование, в результате которого становится невозможно установить принадлежность этих данных конкретному субъекту. Цель работы – построение автоматической системы, позволяющей быстро и безопасно обезличивать данные с помощью технологий машинного обучения.

Методы. Предлагается использовать модели искусственного интеллекта для реализации системы автоматического обезличивания КИ, т.к. это дает возможность распознавать КИ даже в неструктурированных данных с достаточно высокой точностью без привлечения человеческого труда. Для повышения точности всей системы обезличивания предлагается использовать алгоритмы на основе правил.

Результаты. На конфиденциальных данных, размеченных авторами для решения данной задачи, обучена модель распознавания именованных сущностей, которая в связке с алгоритмами на основе правил в результате имеет значение F_1 -меры больше, чем 0.9. Реализовано несколько вариаций алгоритмов обезличивания, что позволяет выбирать между ними для каждой конкретной задачи.

Выводы. Разработанная система решает задачу автоматического обезличивания КИ. Это открывает возможность для безопасной обработки и передачи КИ во многих областях, например, в банковской деятельности, государственном управлении, рекламных кампаниях. Также автоматизация процесса обезличивания делает возможной передачу КИ в тех случаях, когда это необходимо, но невозможно в силу правовых ограничений. Отличительная особенность разработанного решения заключается в том, что обезличиваются как структурированные данные, так и неструктурированные, в т.ч. с сохранением контекста.

Ключевые слова: автоматизированная система, анонимизация, защита информации, кибербезопасность, конфиденциальная информация, машинное обучение, нейросети, обезличивание, персональные данные, распознавание именованных сущностей

• Поступила: 10.02.2023 • Доработана: 14.06.2023 • Принята к опубликованию: 13.07.2023

Для цитирования: Бабак Н.Г., Белорыбкин Л.Ю., Оцоков Ш.А., Теренин А.А., Шаброва А.И. Автоматическое обезличивание конфиденциальной информации. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):7–18. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-7-18>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Automatic depersonalization of confidential information

Nikita G. Babak^{@, 1, 2},
Leonid Yu. Belorybkin²,
Shamil A. Otsokov³,
Alexey A. Terenin²,
Anastasia I. Shabrova²

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute," Moscow, 111250 Russia

² Sberbank of Russia, Moscow, 117312 Russia

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: nikita.enrollee@gmail.com

Abstract

Objectives. As the scope of personal data transmitted online continues to grow, national legislatures are increasingly regulating the storage and processing of digital information. This paper raises the problem of protecting personal data and other confidential information such as bank secrecy or medical confidentiality of individuals. One approach to the protection of confidential data is to depersonalize it, i.e., to transform it so that it becomes impossible to identify the specific subject to whom the data belongs. The aim of the work is to develop a method for the rapid and safe automation of the depersonalization process using machine learning technologies.

Methods. The authors propose the use of artificial intelligence models to implement a system for the automatic depersonalization of personal data without the use of human labor to preclude the possibility of recognizing confidential information even in unstructured data with sufficient accuracy. Rule-based algorithms for improving the precision of the depersonalization system are described.

Results. In order to solve this problem, a model of named entity recognition is trained on confidential data provided by the authors. In conjunction with rule-based algorithms, an F_1 score greater than 0.9 is achieved. For solving specific depersonalization problems, a choice between several implemented anonymization algorithm variants can be made.

Conclusions. The developed system solves the problem of automatic anonymization of confidential data. This opens an opportunity to ensure the secure processing and transmission of confidential information in many areas, such as banking, government administration, and advertising campaigns. The automation of the depersonalization process makes it possible to transfer confidential information in cases where it is necessary, but not currently possible due to legal restrictions. The distinctive feature of the developed solution is that both structured data and unstructured data are depersonalized, including the preservation of context.

Keywords: automated system, anonymization, information protection, cybersecurity, sensitive information, machine learning, neural networks, depersonalization, personal data, named entity recognition

• Submitted: 10.02.2023 • Revised: 14.06.2023 • Accepted: 13.07.2023

For citation: Babak N.G., Belorybkin L.Yu., Otsokov Sh.A., Terenin A.A., Shabrova A.I. Automatic depersonalization of confidential information. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):7–18. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-7-18>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире объем хранимых и обрабатываемых данных постоянно растет, а сами данные нуждаются все в более надежной защите. Особенно актуален вопрос защиты персональных данных, передаваемых через компьютерные сети и хранимых в информационных системах. Перечень и порядок обработки персональных данных зафиксирован в Федеральном законе № 152 «О персональных данных». Персональные данные – это любая информация, относящаяся к прямо или косвенно определенному или определяемому физическому лицу¹.

В настоящее время технические средства позволяют организациям проводить сбор и обработку больших объемов данных, необходимых для эффективного развития. Стремительное развитие информационных технологий дает возможность получать доступ к различным данным, что в свою очередь повышает риск утечки информации [1]. Высокий риск незаконного доступа к конфиденциальной информации (КИ) делает задачу обеспечения ее защиты особенно актуальной и востребованной.

Одной из мер, направленных на минимизацию рисков причинения вреда человеку в случае утечки его персональных данных из автоматизированных систем (АС), является обезличивание согласно требованиям законодательства. Обезличивание персональных данных – это действия, в результате которых становится невозможным без использования дополнительной информации определить принадлежность персональных данных конкретному субъекту этих данных. Анонимизация позволяет снизить требования, устанавливаемые законом, к АС, обрабатывающим эти данные, что в свою очередь приводит к снижению затрат организаций на разработку таких систем. Таким образом, обезличивание персональных данных не только защищает людей от киберугроз, но и несет положительный экономический эффект. Данная проблема рассматривалась в некоторых работах [2–5], но при этом не были учтены особенности обработки данных на русском языке,

имеющем более сложную морфологию. Также в этих работах не осуществлялась достаточная детализация распознаваемых сущностей КИ, что снижает качество обезличенных данных.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Чтобы перейти к обезличиванию, необходимо понять, что конкретно должно быть скрыто в данных. Поэтому можно сказать, что предварительным этапом обезличивания КИ (в частности персональных данных) является ее выделение из всей информации. Ручное выделение определенного вида информации не только сильно замедляет процесс, но и все еще подвержено риску человеческой ошибки.

Исходя из вышесказанного, возникает задача автоматического распознавания и последующего обезличивания КИ в данных, обрабатываемых и передаваемых в АС. Данные могут передаваться в виде файлов, информационного потока и т.д. В связи с этим необходимо предусмотреть возможность извлечения информации из файлов разного расширения и байтового представления.

2. РАСПОЗНАВАНИЕ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Существует несколько основных автоматизированных способов распознать информацию – это поиск по словарю, регулярные выражения и алгоритмы машинного обучения. Если распознавание какого-либо вида информации в структурированных данных довольно часто решается с помощью систем, построенных на правилах (rule-based), то с неструктурированными данными не все так однозначно. Более того, существует большое количество разнообразных данных, прямо или косвенно идентифицирующих человека, например, фамилия, имя и отчество, серия и номер паспорта, номер телефона. Для каждого вида данных придется составлять и постоянно актуализировать большие словари, а также сложные правила.

Решить эти проблемы можно, воспользовавшись алгоритмами машинного обучения для распознавания персональных данных в структурированной и неструктурированной информации. В частности, задача распознавания персональных данных сводится к задаче распознавания именованных сущностей (named entity recognition, NER) [6].

¹ Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных». [Federal Law No. 152-FZ dated July 27, 2006 “On Personal Data.” (in Russ.).] <https://docs.cntd.ru/document/901990046>. Дата обращения 09.02.2023. / Accessed February 09, 2023.

Существует несколько основных способов решения этой задачи:

- с помощью статистических методов, например, по количеству определенных символов;
- с помощью правил на основе словарей и регулярных выражений;
- с помощью нейросетей.

Статистические методы не обеспечивают достаточного качества распознавания в данной задаче, особенно в неструктурированных данных. Системы на основе правил хоть и работают сравнительно быстро, но требуют более частой актуализации и подвержены ошибкам в более сложных данных, например, в названиях организаций, фамилиях и именах. Кроме того, подходы на основе статистических методов и правил не учитывают контекст. Справиться с этими недостатками позволяют нейросети. Для задач обработки естественного языка, и, в частности, распознавания именованных сущностей, наиболее передовыми являются нейросети с архитектурой типа трансформеров (transformer) [7]. Трансформеры преобразуют естественный язык в эмбединги – числовые вектора, которые в свою очередь можно обрабатывать машинным способом. Эмбединги, в отличие от классических векторов, учитывают семантическую близость слов-токенов.

Для распознавания некоторых видов конфиденциальной информации, в особенности в структурированных данных, нет необходимости использовать нейросети, а достаточно воспользоваться правилами и статистическими методами. Предварительный анализ и разделение данных на структурированные и неструктурированные позволяет подобрать подходящий алгоритм распознавания. Для распознавания числовых данных больше подходят регулярные выражения с проверкой контрольных разрядов, особенно в структурированных данных. Но стоит заметить, что при достаточно большом наборе неструктурированных данных некоторые числовые персональные данные довольно хорошо распознаются нейросетями. Чтобы воспользоваться алгоритмами машинного обучения, необходимо подготовить обучающую выборку.

2.1. Разметка данных

Обучающая выборка состоит из данных, представленных определенным образом и размеченных на различные атрибуты КИ. Текст разбивается на токены, представленные словами, которым в соответствие ставится тег (метка), обозначающий принадлежность к определенному виду информации.

Теги могут проставляться по одной из следующих схем:

- BIO/IOB, где B (begin) – начало сущности, I (inside) – продолжение сущности, O (outside) – не относится к сущности;

- BILUO/BILOU [8], где L (last) – конец сущности, U (unit) – сущность из одного токена, а B, I и O расшифровываются так же, как и в схеме BIO/IOB.

Схема BIO является более распространенной, поэтому в данной работе используется именно она.

Разметка токенов тегами может различаться в зависимости от решаемой задачи. В задаче распознавания вложенных именованных сущностей (nested NER) [9, 10] каждому токеноу в соответствие ставится два тега – сводный и вложенный. Пример разметки представлен в табл. 1. Теги при разметке проставляются вручную квалифицированным в данной области экспертом и чаще всего содержат в названии сокращенное, осмысленное описание информации, содержащейся в размечаемом токене. Например, тег B-SNM получен сокращением фамилии на английском языке – Surname.

Таблица 1. Разметка токенов для распознавания вложенных именованных сущностей

Токен	Сводный тег	Вложенный тег
Сидоров	B-PERSON	B-SNM
Иван	I-PERSON	B-FNM
Петрович	I-PERSON	B-PNM
заключил	O	O
договор	O	O
с	O	O
ООО	B-ORG	B-OPF
Ромашка	I-ORG	B-ORG_NAME

При распознавании прерывистых именованных сущностей (discontinuous NER) [11] разметка тегами может быть представлена в виде таблицы, где количество колонок зависит от максимального количества разрывов для прерывистой сущности. Таким образом, первому слову в прерывистой сущности ставится тег с префиксом B, а все последующие теги смещаются на одну колонку вправо при каждом разрыве и имеют префикс I в случае использования схемы BIO.

В статье решается классическая задача распознавания именованных сущностей, поэтому обучающая выборка разбивается по словам. Каждому слову ставится в соответствие метка, означающая принадлежность к тому или иному виду КИ. Используемый набор данных содержит различные нормативные документы, служебные записки и прочие документы, участвующие в производственной деятельности организации, в которой в последующем будет осуществляться обезличивание.

Разметив данные и обучив модель искусственного интеллекта (ИИ), можно автоматически распознавать КИ, что, в свою очередь, открывает возможность для последующего автоматического обезличивания.

3. ОБЕЗЛИЧИВАНИЕ

После обнаружения в тексте КИ ее можно обезличить обратимым или необратимым способом. В большинстве случаев под обезличиванием понимается необратимая реализация, но при необходимости возможно сохранить таблицу замен в защищенном контуре, чтобы получить обратимое обезличивание.

При любой реализации возможны следующие алгоритмы обезличивания:

- обнуление – удаление всего исходного значения или его значимой части;
- замена константой – замена исходного значения ненулевой константой;
- замена значением из справочника – замена исходного значения случайным отличным значением из справочника, соответствующего заменяемому типу данных;
- замена набором символов – преобразование каждого символа исходного значения в случайный символ, соответствующий типу данных;
- перемешивание – перестановка отдельных значений или групп значений атрибутов персональных данных в массиве персональных данных;
- размытие суммы и даты – замена исходного значения случайным значением, близким к обезличиваемому;
- преобразование на основе заданного выражения – преобразование исходного значения по выражению, содержащему как константы, так и переменные величины;
- маскирование – замена части исходного значения специальным символом или набором символов (маской);
- замена случайным значением – замена исходного значения случайно сгенерированным значением;
- генерация псевдоосмысленных значений – создание текста на основе языковой модели или заданных выражений, позволяющее получить корректный текст с точки зрения основных языковых норм и параметров данных. Также к этому методу можно отнести генерацию фотографий, учитывающую пол и возраст человека.

При выборе подхода к обезличиванию персональных данных целесообразно учитывать рекомендации Роскомнадзора², в соответствии с которыми к основным методам обезличивания относятся: метод введения идентификаторов – замена части сведений идентификаторами с созданием таблицы

соответствия идентификаторов исходным данным; метод изменения состава или семантики персональных данных путем их замены результатами статистической обработки, преобразования, обобщения или удаления части сведений; метод декомпозиции – разделение множества персональных данных на несколько подмножеств с последующим раздельным хранением подмножеств.

С учетом рекомендаций Роскомнадзора наиболее подходящими являются алгоритмы генерации псевдоосмысленных значений и замены константой. Для реализации обратимого обезличивания необходимо создавать таблицу соответствия исходным данным, при этом следует отметить, что сама таблица должна храниться отдельно от деперсонифицированных данных, а доступ к ней должен быть только у лиц, имеющих право работать с персональными данными в открытом виде.

В зависимости от решаемой задачи могут применяться различные алгоритмы. Например, если необходимо однозначно определить, что было произведено обезличивание и понять, какой вид информации удален, то лучше подойдет алгоритм замены константой. Если необходимо сохранить длину заменяемого значения и также определить, что была произведена анонимизация, то с этой задачей хорошо справится алгоритм частичного маскирования. В случае, когда обезличенные данные необходимо использовать практически также как исходные, например, для обучения моделей ИИ, оптимальным выбором будет алгоритм генерации псевдоосмысленных значений.

4. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБЕЗЛИЧИВАНИЯ

Чтобы работа с КИ осуществлялась максимально безопасно, необходимо разработать систему автоматического обезличивания. Процесс автоматического обезличивания с помощью реализованной авторами системы состоит из следующих задач (рис. 1):

- 1.1 Запрос к системе на обезличивание по API от сторонней автоматизированной системы (АС).
- 1.2 Запрос к системе на обезличивание через интерфейс от пользователя.
- 2 Определение типа данных и их предобработка.
- 3.1 Распознавание КИ в структурированных данных.
- 3.2 Распознавание КИ в неструктурированных данных.
- 4 Обезличивание распознанной КИ наиболее подходящим алгоритмом.
- 5 Возврат обезличенного документа или потока данных.

² Приказ Роскомнадзора от 05.09.2013 № 996 «Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных». [Order of Roskomnadzor dated September 05, 2013 No. 996 “On approval of requirements and methods for depersonalization of personal data” (in Russ.)]. https://rkn.gov.ru/docs/6_Trebovaniya_i_metody_po_obezlichivaniyu_personalnykh_dannykh.docx. Дата обращения 09.02.2023. / Accessed February 09, 2023.

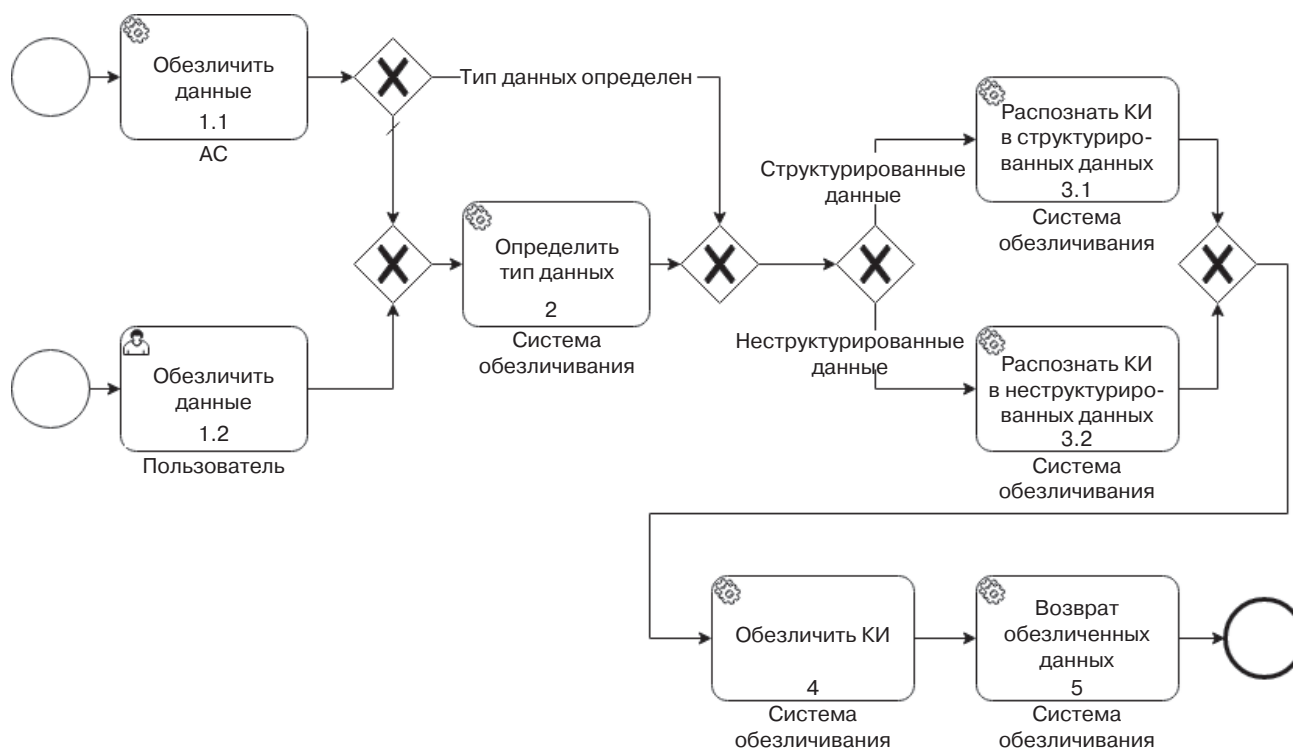


Рис. 1. Процесс обезличивания KI

Необходимость выделения в системе отдельно распознавания персональных данных в структурированной и неструктурированной информации вызвана тем, что используются различные алгоритмы машинного обучения, в частности учитывающие и не учитывающие синтаксические особенности.

4.1. Подготовка данных

Всего для обучения моделей авторами вручную размечено около миллиона токенов, представленных отдельными словами. Для разметки использованы служебные документы, содержащие персональные данные, банковскую тайну и другую KI. В качестве схемы разметки выбрана ВЮ-схема, где первый токен в рамках конфиденциальной сущности имеет префикс В, а все последующие – I. Такой подход позволяет сравнивать и использовать большинство предобученных архитектур, что упрощает процесс создания модели ИИ, как минимум с точки зрения сокращения времени на ее обучение.

Полученный набор размеченных данных разделен на 3 части, где 80% данных используется для обучения модели, 10% – для ее валидации и 10% – для расчета метрик обученной модели. Используется именно такое соотношение, а не 60/20/20, потому что некоторых видов KI в наборе данных мало, и будет нерационально еще сильнее уменьшать их количество в обучающем наборе.

При разделении текста на токены необходимо сохранить индексы границ разбиения, чтобы в последующем после распознавания KI обезличить ее строго в пределах заданных границ.

4.2. Обучение модели

Самые передовые результаты в задачах распознавания именованных сущностей показывают нейросети на основе архитектуры трансформеров. Трансформеры, предварительно обученные (pretrained) на большом корпусе данных, хорошо переиспользуются в задачах обработки естественного языка [12]. Для этого достаточно произвести дообучение (fine-tuning) модели на собственных данных, тем самым скорректировав веса для того, чтобы лучше учитывать семантику входных данных.

В качестве основы используется предобученная модель rubert-base-cased [13], использование других подходящих архитектур существенно не влияет на показатели работы модели. В первую очередь это объясняется схожестью различных трансформеров, используемых для решения задачи NER, например, BERT [13], RoBERTa [14] и spaCy [15]. Предобученная модель представляет из себя токенизатор (tokenizer) и кодировщик (encoder), к которым добавлен NER-классификатор. Также для повышения точности и уменьшения ложно положительных срабатываний используются алгоритмы распознавания

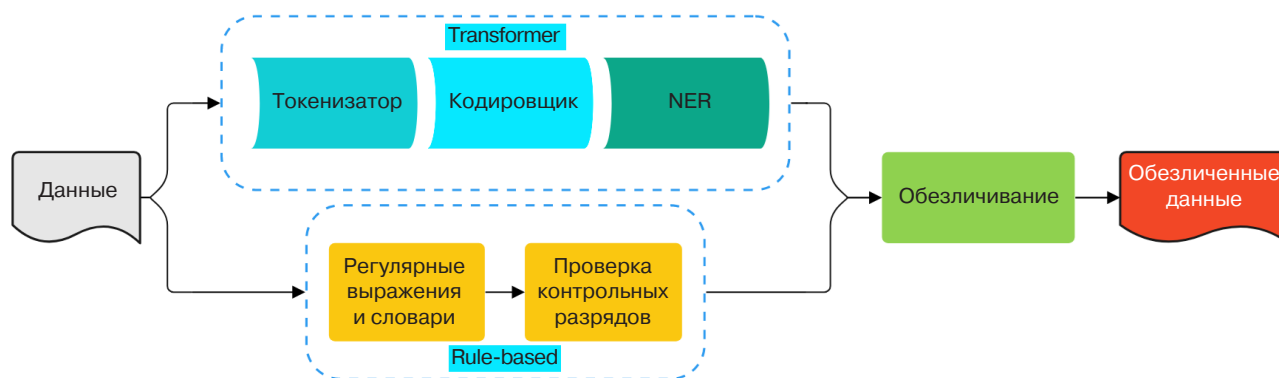


Рис. 2. Обработка данных системой обезличивания

на основе правил (rule-based), в частности, регулярные выражения и проверка контрольных разрядов [16]. Затем результаты обработки данных нейросетями и правилами сводятся в общее предположение о принадлежности текста к одному из видов конфиденциальной информации. Схематическое изображение процесса обезличивания данных предлагаемой системой представлено на рис. 2.

При обработке структурированных данных предпочтение отдается модулю распознавания по правилам, т.к. контекст в таких данных практически отсутствует.

Также в системе обезличивания для сравнения реализована модель распознавания КИ на основе правил без нейросетей и модель PyTorch на основе рекуррентной нейронной сети (RNN, recurrent neural network) [17].

Поскольку большинство существующих систем обезличивания работают на основе правил и имеют сходную между собой реализацию, модель по распознаванию КИ на основе правил без нейросетей служит для получения базовой метрики, с которой можно сравнивать остальные решения. Сравнение реализованной системы обезличивания с другими реализациями будет заведомо представлять предлагаемое решение в более выгодном свете, т.к. сторонние реализации разрабатывались под другой, чаще всего структурированный, набор данных [18–20]. Например, некоторые сторонние системы работают только с персональными данными и не поддерживают обезличивание банковской тайны.

В контексте данной задачи метрика полноты (recall) важна, т.к. необходимо распознать и обезличить все персональные данные, но также важна точность (precision), чтобы количество ложных срабатываний не подрывало доверие к системе. Именно поэтому используется F_1 -мера, которая учитывает обе эти метрики и вычисляется по формуле

$$F_1 = \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}}.$$

Расчет метрик осуществляется по тестовой части размеченного набора данных, описанного в п. 4.1. Для начала строится матрица ошибок (confusion matrix), в которой по горизонтали располагаются истинные теги из разметки, а по вертикали – теги, предсказанные моделью ИИ. Затем по матрице ошибок подсчитывается количество истинно распознанных атрибутов конфиденциальной информации (TP, true positive), количество истинно нераспознанных атрибутов (TN, true negative), количество ложно распознанных атрибутов (FP, false positive) и количество ложно нераспознанных атрибутов (FN, false negative). После этого по формулам

$$\text{recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}$$

и

$$\text{precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}$$

вычисляются полнота и точность, а затем определяется их среднее гармоническое – F_1 -мера [21].

В табл. 2 приведены основные атрибуты КИ и рассчитанная средневзвешенная F_1 -мера по разным моделям: модель на основе правил, рекуррентная нейросеть и модель BERT. Стоит отметить, что реализация rule-based работает только на основе правил, а все остальные используют нейросети вместе с регулярными выражениями и другими алгоритмами на основе правил.

Таблица 2. Значения метрики F_1 -меры моделей ИИ

Атрибут КИ	F_1 (rule-based)	F_1 (RNN)	F_1 (BERT)
Фамилия	0.804	0.911	0.931
Имя	0.819	0.876	0.929
Отчество	0.874	0.883	0.943
Серия и номер паспорта	0.883	0.907	0.906

Таблица 2. Окончание

Атрибут КИ	F_1 (rule-based)	F_1 (RNN)	F_1 (BERT)
Орган, выдавший паспорт	0.701	0.794	0.899
Номер телефона	0.959	0.969	0.967
E-mail	0.955	0.959	0.964
IP-адрес	0.929	0.932	0.930
Геолокация	0.904	0.919	0.922
Адрес	0.809	0.810	0.912
Дата рождения	0.813	0.837	0.915
ИНН	0.918	0.915	0.919
СНИЛС	0.931	0.935	0.934
Номер полиса ОМС	0.921	0.914	0.921
Номер банковского счета	0.937	0.929	0.936
Номер банковской карты	0.967	0.959	0.965
Номер военного билета	0.892	0.880	0.889
Номер ОГРНИП	0.910	0.909	0.919
Должность	0.812	0.820	0.873
Название организации	0.817	0.899	0.951
Средневзвешенная F_1-мера	0.878	0.898	0.926

Кроме того, проводилось сравнение моделей RoBERTa и spaCy, но они показали метрики аналогичные модели BERT с разбросом значений F_1 -меры менее 0.01. В связи с этим выбрана именно модель BERT, т.к. она меньше модели RoBERTa по размеру и имеет более гибкую настройку, чем модель spaCy, что важно для внедрения промышленной версии модели в систему.

Как видно из табл. 2, решение на основе правил значительно уступает моделям машинного обучения по значениям метрики F_1 -меры. Особенно эффект заметен в строковых типах данных, где значительную роль играет контекст. Из-за разнородного набора документов рекуррентная нейросеть RNN также справляется с задачей хуже, чем BERT. Исходя из значений метрики F_1 -меры, представленных в табл. 2, и того, что модели-трансформеры имеют широкий потенциал развития и переиспользования, в качестве финального решения выбрана модель BERT, которая превосходит остальные решения в среднем на 4%.

Преимущество системы обезличивания с использованием модели BERT перед другими решениями заключается в использовании механизма внимания на себя (self-attention), который позволяет лучше обнаруживать КИ благодаря анализу контекста и важности слов в тексте. Применяемый в модели механизм внимания можно выразить формулой

$$\text{attention} = \text{softmax} \left(\frac{\mathbf{Q}\mathbf{K}^T}{\sqrt{d_k}} \right) \mathbf{V},$$

где $\mathbf{Q}$ – вектор запроса, $\mathbf{K}$ – вектор ключа, $\mathbf{V}$ – вектор значения, d_k – размерность векторов. Векторы $\mathbf{Q}$, $\mathbf{K}$ и $\mathbf{V}$ получаются путем перемножения эмбединга токена на соответствующие матрицы, полученные при предварительном обучении взятой за основу модели rubert-base-cased. Поскольку в действительности вычисления производятся над векторными представлениями нескольких токенов, то $\mathbf{Q}$, $\mathbf{K}$ и $\mathbf{V}$ являются матрицами, и перед расчетом произведения $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{K}$ матрицу $\mathbf{K}$ необходимо транспонировать [7]. В практической реализации вектор ключа и вектор значения являются одним и тем же вектором и служат для представления токена, а вектор запроса показывает значимость данного токена относительно других.

Функция softmax, выраженная формулой

$$\sigma(\mathbf{Z})_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^N e^{z_j}},$$

где i и j – индексы элемента вектора в диапазоне от 1 до N , служит для нормализации, т.е. преобразует вектор $\mathbf{z}$ размерности N к вектору σ той же размерности, где все координаты нормированного вектора σ_i выражены числом в интервале от 0 до 1, а их сумма равна единице.

Распознавание КИ в неструктурированных данных, представленных изображениями и аудиозаписями, сводится к обработке неструктурированных текстов. Для этого предварительно решается задача OCR (optical character recognition) – оптического распознавания символов [22], а также задача ASR (automatic speech recognition) – автоматического распознавания речи [23].

4.3. Обезличивание

Распознав КИ, система ее обезличивает одним из выбранных алгоритмов. Причем выбор алгоритма возможен как для всего документа или набора данных, так и для отдельного вида КИ. В системе, представленной авторами, реализованы алгоритмы обезличивания, работающие на основе следующих методов:

- замена константой (плейсхолдером) вида {Атрибут_КИ};
- маскирование на символ «*»;
- генерация псевдоосмысленных значений, включающая в себя замену значением из справочника, преобразование на основе заданного выражения и размытие даты.

Например, распознав моделью ИИ в предложении «Сидоров Александр Викторович (ИНН 503199560259) получил перевод на карту 4561 2612 1234 5467» конфиденциальную информацию, представленную фамилией, именем, отчеством, идентификационным номером налогоплательщика (ИНН) и номером банковской карты, пользователю системы можно выбрать один из описанных выше алгоритмов обезличивания. При замене на плейсхолдер рассматриваемое предложение примет следующий вид: «{Фамилия} {Имя} {Отчество} (ИНН {ИНН}) получил перевод на карту {Номер банковской карты}», где КИ заменена на константы, показывающие, какой вид информации ранее находился в предложении. При частичном маскировании КИ заменится на маску, и рассматриваемое предложение примет следующий вид: «С***** ***** (ИНН 50*****) получил перевод 4561 26** **** 5467», где сохранены части слов, не представляющие опасности для идентификации субъекта данных, но позволяющие определить косвенные признаки, например, банк, выдавший карту. При замене на псевдоосмысленные значения рассматриваемое предложение примет следующий вид: «Лазарев Владислав Алексеевич (ИНН 503195234624) получил перевод на карту 4561 2698 5513 5467». Последний алгоритм в отличие от двух предыдущих работает медленнее, т.к. генерируются псевдоосмысленные данные, но формирует полностью осмысленный текст, который можно применять, например, в задачах машинного обучения.

Используемый алгоритм обезличивания зависит от решаемой задачи и его выбор остается за пользователем или АС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всего для обучения модели ИИ размечено около миллиона токенов, благодаря чему покрыто большое количество способов представления данных, содержащих КИ. В случае, когда количество типов обезличиваемых документов невелико, для дообучения модели достаточно разметить небольшой набор данных, который включает все необходимые виды КИ. Кроме того, благодаря использованию моделей-трансформеров в большинстве случаев дообучение модели не требуется, что позволяет переиспользовать разработанную систему в различных организациях «как есть» или с корректировкой на небольшом объеме данных. Использование нейросетей позволяет избавиться от составления огромных справочников фамилий и имен, а также других сущностей, идентифицирующих человека. Регулярные выражения в свою очередь учитывают особенности структуры, например, существующие

серии, коды и банковские идентификационные номера, что позволяет обнаруживать даже те данные, на которых модель ранее не обучалась.

Отличительным преимуществом представленной авторами системы обезличивания от существующих является поддержка как структурированных, так и неструктурированных данных. Кроме того, в большинстве известных систем обезличивание осуществляется разрушающим способом, после чего данные становятся непригодными для многих задач, например, для машинного обучения.

Средняя взвешенная F_1 -мера реализованной модели распознавания КИ превысила 0.9, что говорит о высоком качестве системы обезличивания. Благодаря этому исчезает потребность в привлечении человеческого труда для обнаружения КИ.

Реализованные алгоритмы обезличивания, основанные на методе замены константой, маскирования и генерации псевдоосмысленных значений, покрывают все основные задачи обезличивания: обезличивание с возможностью однозначного определения факта маскирования, синонимическое обезличивание, необратимое и обратимое обезличивание и другие. Также указанные алгоритмы позволяют автоматически обезличивать распознанные конфиденциальные данные. Практическая ценность разработанной авторами системы автоматического обезличивания заключается в том, что обезличенные с ее помощью конфиденциальные данные можно использовать аналогично исходным данным, но без риска нарушения требований кибербезопасности. При этом затраты на процедуры обезличивания практически отсутствуют, т.к. процесс автоматизирован.

Система обезличивания конфиденциальных данных содержит, по меньшей мере, один процессор и одну память, соединенную с процессором, которая содержит машиночитаемые инструкции. Кроме того, система обезличивания может выполняться на сервере программируемым логическим контроллером и любыми другими устройствами, способными выполнять заданную последовательность инструкций.

Предложенную систему автоматического обезличивания можно встроить практически в любой цикл, связанный с передачей и обработкой КИ, что позволит автоматически распознавать ее и обезличивать. Благодаря этому снижается риск раскрытия личности в случае утечки данных. Например, автоматическое обезличивание может применяться в банковской сфере, государственных услугах, Data Science сообществе [24] и прочей деятельности, связанной с обработкой КИ, в частности – персональных данных.

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

REFERENCES

1. Шаброва А.И., Теренин А.А., Бабак Н.Г. Методика оценки риска от разглашения конфиденциальной информации в источниках данных с использованием интеллектуального анализа данных. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2022;18(3):666–679. <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.666-679>
2. Столбов А.П. Обезличивание персональных данных в здравоохранении. *Врач и информационные технологии*. 2017;3:76–91. URL: <https://elibrary.ru/zgyvot>
3. Спеваков А.Г., Калущкий И.В., Никулин Д.А., Шумайлова В.А. Обезличивание персональных данных при обработке в автоматизированных информационных системах. *Телекоммуникации*. 2016;10:16–20. URL: <https://www.elibrary.ru/wwwvmt>
4. Oleksy M., Ropiak N., Walkowiak T. Automated anonymization of text documents in Polish. *Procedia Computer Science*. 2021;192(1):1323–1333. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.136>
5. Saluja B., Kumar G., Sedoc J., Callison-Burch C. Anonymization of Sensitive Information in Medical Health Records. In: *CEUR Workshop Proceedings*. 2019;2421:647–653. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2421/MEDDOCAN_paper_2.pdf
6. Roy A. *Recent Trends in Named Entity Recognition (NER)*. arXiv. 2021. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2101.11420>
7. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser L., Polosukhin I. Attention is all you need. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
8. Ratnov L., Roth D. Design Challenges and Misconceptions in Named Entity Recognition. In: *Proceedings of the Thirteenth Conference on Computational Natural Language Learning (CoNLL 2009)*. 2009. P. 147–155. URL: <https://aclanthology.org/W09-1119.pdf>
9. Fisher J., Vlachos A. *Merge and label: A novel neural network architecture for nested NER*. arXiv. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.00464>
10. Fu Y., Tan C., Chen M., Huang S., Huang F. Nested named entity recognition with partially-observed TreeCRFs. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021;35(14):12839–12847. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i14.17519>
11. Dai X., Karimi S., Hachey B., Paris C. *An effective transition-based model for discontinuous NER*. arXiv. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.13454>
12. Lothritz C., Allix K., Veiber L., Klein J., Bissyande T.F.D.A. Evaluating pretrained transformer-based models on the task of fine-grained named entity recognition. In: *Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics*. 2020. P. 3750–3760. <http://doi.org/10.18653/v1/2020.coling-main.334>
13. Kuratov Y., Arkhipov M. *Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for Russian language*. arXiv. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.07213>
14. Conneau A., Khandelwal K., Goyal N., Chaudhary V., Wenzek G., Guzman F., Grave E., Ott M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. *Unsupervised cross-lingual representation learning at scale*. arXiv. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.02116>
15. Patel A.A., Arasanipalai A.U. *Applied Natural Language*
1. Shabrova A.I., Terenin A.A., Babak N.G. Methodology for risk assessment from confidential information disclosure in data sources using data mining. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022;18(3):666–679 (in Russ.). <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.666-679>
2. Stolbov A.P. De-identification of personal data in health care. *Vrach i informacionnye tehnologii = Medical Doctor and Information Technologies*. 2017;3:76–91 (in Russ.). Available from URL: <https://elibrary.ru/zgyvot>
3. Spevakov A.G., Kalutskiy I.V., Nikulin D.A., Shumailova V.A. Depersonalization of personal data during processing of information in automated systems. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2016;10:16–20 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/wwwvmt>
4. Oleksy M., Ropiak N., Walkowiak T. Automated anonymization of text documents in Polish. *Procedia Computer Science*. 2021;192(1):1323–1333. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.136>
5. Saluja B., Kumar G., Sedoc J., Callison-Burch C. Anonymization of Sensitive Information in Medical Health Records. In: *CEUR Workshop Proceedings*. 2019;2421:647–653. Available from URL: https://ceur-ws.org/Vol-2421/MEDDOCAN_paper_2.pdf
6. Roy A. *Recent Trends in Named Entity Recognition (NER)*. arXiv. 2021. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2101.11420>
7. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser L., Polosukhin I. Attention is all you need. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
8. Ratnov L., Roth D. Design Challenges and Misconceptions in Named Entity Recognition. In: *Proceedings of the Thirteenth Conference on Computational Natural Language Learning (CoNLL 2009)*. 2009. P. 147–155. Available from URL: <https://aclanthology.org/W09-1119.pdf>
9. Fisher J., Vlachos A. *Merge and label: A novel neural network architecture for nested NER*. arXiv. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.00464>
10. Fu Y., Tan C., Chen M., Huang S., Huang F. Nested named entity recognition with partially-observed TreeCRFs. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021;35(14):12839–12847. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i14.17519>
11. Dai X., Karimi S., Hachey B., Paris C. *An effective transition-based model for discontinuous NER*. arXiv. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.13454>
12. Lothritz C., Allix K., Veiber L., Klein J., Bissyande T.F.D.A. Evaluating pretrained transformer-based models on the task of fine-grained named entity recognition. In: *Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics*. 2020. P. 3750–3760. <http://doi.org/10.18653/v1/2020.coling-main.334>
13. Kuratov Y., Arkhipov M. *Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for Russian language*. arXiv. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.07213>

- Processing in the Enterprise*. O'Reilly Media, Inc.; 2021. 336 p. ISBN 978-1-4920-6257-8. URL: <https://spacy.io/universe/project/applied-nlp-in-enterprise/>
16. Singco V.Z., Trillo J., Abalorio C., Bustillo J.C., Bojocan J., Elape M. OCR-based Hybrid Image Text Summarizer using Luhn Algorithm with Finetune Transformer Models for Long Document. *Int. J. Emerging Technol. Adv. Eng.* 2023;13(02):47–56. http://doi.org/10.46338/ijetae0223_07
 17. Soltau H., Shafran I., Wang M., Shafey L.E. *RNN Transducers for Nested Named Entity Recognition with constraints on alignment for long sequences*. arXiv. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.03543>
 18. Абирхаев Е.А., Ерохин А.Ф., Пушкин П.Ю. Методы обезличиваемых данных: обзор и анализ. *НаукоСфера*. 2021;6(2):57–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46561812>
 19. Кротов А.Д., Серышев А.С., Ефанова Н.В. Разработка приложения для обезличивания персональных данных. В сб.: *Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты: сб. материалов III всероссийской научно-практической конференции*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет; 2021. С. 294–297. ISBN 978-5-9074-3005-1. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44891383>
 20. Фот Ю.Д., Коробова Е.О. Обезличивание персональных данных в системе управления персоналом предприятий нефтегазового сектора. В сб.: *Роль нефтегазового сектора в технико-экономическом развитии Оренбуржья: сб. трудов научно-практической конференции*. Саратов: ООО «Амирит»; 2021. С. 161–168. ISBN 978-5-0014-0888-8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48392659>
 21. Williams C.K.I. The effect of class imbalance on Precision-Recall Curves. *Neural Computation*. 2021;33(4): 853–857. https://doi.org/10.1162/neco_a_01362
 22. Du Y., Li C., Guo R., Yin X., Liu W., Zhou J., Bai Y., Yu Z., Yang Y., Dang Q., Wang H. *PP-OCR: A practical ultra lightweight OCR system*. arXiv. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.09941>
 23. Pan J., Shapiro J., Wohlwend J., Han K.J., Lei T., Ma T. *ASAPP-ASR: Multistream CNN and self-attentive SRU for SOTA speech recognition*. arXiv. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.10469>
 24. Ryffel T., Trask A., Dahl M., Wagner B., Mancuso J., Rueckert D., Passerat-Palmbach J. *A generic framework for privacy preserving deep learning*. arXiv. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.04017>
 14. Conneau A., Khandelwal K., Goyal N., Chaudhary V., Wenzek G., Guzman F., Grave E., Ott M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. *Unsupervised cross-lingual representation learning at scale*. arXiv. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.02116>
 15. Patel A.A., Arasanipalai A.U. *Applied Natural Language Processing in the Enterprise*. O'Reilly Media, Inc.; 2021. 336 p. ISBN 978-1-4920-6257-8. Available from URL: <https://spacy.io/universe/project/applied-nlp-in-enterprise/>
 16. Singco V.Z., Trillo J., Abalorio C., Bustillo J.C., Bojocan J., Elape M. OCR-based Hybrid Image Text Summarizer using Luhn Algorithm with Finetune Transformer Models for Long Document. *Int. J. Emerging Technol. Adv. Eng.* 2023;13(02):47–56. http://doi.org/10.46338/ijetae0223_07
 17. Soltau H., Shafran I., Wang M., Shafey L.E. *RNN Transducers for Nested Named Entity Recognition with constraints on alignment for long sequences*. arXiv. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.03543>
 18. Abirkhaev E.A., Erokhin A.F., Pushkin P.Yu. Methods of depersonalizing data: overview and analysis. *Naukosfera*. 2021;6(2):57–31 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46561812>
 19. Seryshev A.S., Krotov A.D., Efanova N.V. Development of an application for personal data depersonalization. In: *Digitalization of the Economy: Directions, Methods, Tools: Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2021. P. 294–297 (in Russ.). ISBN 978-5-9074-3005-1. Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44891383>
 20. Fot U.D., Korobova E.O. Depersonalization of personal data in the personnel management system of oil and gas sector enterprises. In: *The Role of the Oil and Gas Sector in the Technical and Economic Development of the Orenburg Region: Proceedings of the scientific-practical conference*. Saratov: Amirit; 2021. P. 161–168 (in Russ.). ISBN 978-5-0014-0888-8. Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48392659>
 21. Williams C.K.I. The effect of class imbalance on Precision-Recall Curves. *Neural Computation*. 2021;33(4): 853–857. https://doi.org/10.1162/neco_a_01362
 22. Du Y., Li C., Guo R., Yin X., Liu W., Zhou J., Bai Y., Yu Z., Yang Y., Dang Q., Wang H. *PP-OCR: A practical ultra lightweight OCR system*. arXiv. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.09941>
 23. Pan J., Shapiro J., Wohlwend J., Han K.J., Lei T., Ma T. *ASAPP-ASR: Multistream CNN and self-attentive SRU for SOTA speech recognition*. arXiv. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.10469>
 24. Ryffel T., Trask A., Dahl M., Wagner B., Mancuso J., Rueckert D., Passerat-Palmbach J. *A generic framework for privacy preserving deep learning*. arXiv. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.04017>

Об авторах

Бабак Никита Григорьевич, аспирант, кафедра вычислительных машин, систем и сетей Института информационных и вычислительных технологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1); главный эксперт по защите данных, Департамент кибербезопасности ПАО «Сбербанк России» (117312, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 19). E-mail: nikita.enrollee@gmail.com. ResearcherID HNY-9372-2022, SPIN-код РИНЦ 3687-6548, <https://orcid.org/0000-0001-7129-1018>

Белорыбкин Леонид Юрьевич, директор проектов по защите данных, Департамент кибербезопасности ПАО «Сбербанк России» (117312, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 19). E-mail: lbelorybkin@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8575-5773>

Оцков Шамиль Алиевич, д.т.н., профессор, кафедра КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: shamil24@mail.ru. Scopus Author ID 57212622267, <https://orcid.org/0000-0001-7451-5443>

Теренин Алексей Алексеевич, к.т.н., управляющий директор, Департамент кибербезопасности ПАО «Сбербанк России» (117312, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 19). E-mail: aaterenin@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0002-6242-6117>

Шаброва Анастасия Игоревна, архитектор по защите данных, Департамент кибербезопасности ПАО «Сбербанк России» (117312, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 19). E-mail: shabrova1113@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4315-3061>

About the authors

Nikita G. Babak, Postgraduate Student, Department of Computing Machines, Systems and Networks, Institute of Information Technologies and Computer Science, National Research University MPEI (14/1, Krasnokazarmennaya ul., Moscow, 111250 Russia); Chief Data Protection Officer, Cybersecurity Department, Sberbank of Russia (19, Vavilova ul., Moscow, 117312 Russia). E-mail: nikita.enrollee@gmail.com. ResearcherID HNY-9372-2022, RSCI SPIN-code 3687-6548, <https://orcid.org/0000-0001-7129-1018>

Leonid Yu. Belorybkin, Director of Data Protection Projects, Cybersecurity Department, Sberbank of Russia (19, Vavilova ul., Moscow, 117312 Russia). E-mail: lbelorybkin@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8575-5773>

Shamil A. Otskov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Intelligent Information Security Systems, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: shamil24@mail.ru. Scopus Author ID 57212622267, <https://orcid.org/0000-0001-7451-5443>

Alexey A. Terenin, Cand. Sci. (Eng.), Managing Director, Cybersecurity Department, Sberbank of Russia (19, Vavilova ul., Moscow, 117312 Russia). E-mail: aaterenin@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0002-6242-6117>

Anastasia I. Shabrova, Data Protection Architect, Cybersecurity Department, Sberbank of Russia (19, Vavilova ul., Moscow, 117312 Russia). E-mail: shabrova1113@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4315-3061>

УДК 004.032.26
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-19-33>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Геометрические свойства квантовой запутанности и машинное обучение

С.В. Зуев[®]

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, 295007 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: zuevsv@cfuv.ru

Резюме

Цели. Быстрая классификация данных на основе имеющихся в них закономерностей является одним из главных вопросов для построения систем адаптивного искусственного интеллекта. Цель работы – предложить и верифицировать метод такой классификации на основе представления данных в виде квантового состояния или (альтернативно) в виде геометрического объекта в пространстве, свойства которого позволяют производить машинное обучение «на лету» (онлайн-обучение).

Методы. В работе используется фейнмановский формализм для представления квантовых состояний и операций над ними, представление квантовых вычислений в виде квантовых схем, геометрические преобразования, топологическая классификация, а также методы классического и квантового машинного обучения. В качестве инструмента разработки использовался язык программирования Python, средства оптимизации для машинного обучения взяты из модуля SciPy. Размеченные данные для анализа взяты из открытых источников. Препроцессинг данных произведен методом отображения признаков в числовые векторы, затем применен метод приведения данных к нужной размерности и далее – отображение данных в квантовое состояние. Используется собственный эмулятор квантовых вычислений (находится в открытом доступе).

Результаты. Результаты вычислительных экспериментов выявили способность очень простых квантовых схем к классификации данных без оптимизации. Получены сравнительные показатели качества классификации без использования оптимизации, а также с ее использованием. Эксперименты проведены с различными датасетами и для различных значений размерности пространств признаков. Работоспособность предложенных в работе моделей и методов машинного обучения, а также методов их объединения в сетевые структуры, подтверждена практически.

Выводы. Предложенный метод машинного обучения и построения квантовых нейронных сетей может быть применен для создания систем адаптивного искусственного интеллекта в составе модуля онлайн-обучения. Отсутствие оптимизации в процессе онлайн-обучения позволяет применять его в потоке данных, т.е., адаптироваться к изменениям среды. Разработанное алгоритмическое обеспечение не требует наличия квантовых компьютеров и может быть применено при разработке программного обеспечения систем искусственного интеллекта на языке Python в качестве импортируемых модулей.

Ключевые слова: онлайн-обучение, адаптивный искусственный интеллект, квантовое машинное обучение, квантовая запутанность

• Поступила: 13.02.2023 • Доработана: 14.06.2023 • Принята к опубликованию: 13.08.2023

Для цитирования: Зуев С.В. Геометрические свойства квантовой запутанности и машинное обучение. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):19–33. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-19-33>

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

Кроме отмеченной аффилиации, автор является сотрудником БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия), но настоящая работа выполнена независимо от этой организации, хотя у автора имеется обязанность указать свою принадлежность к ней.

RESEARCH ARTICLE

Geometric properties of quantum entanglement and machine learning

Sergei V. Zuev [®]

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, 295007 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: zuevsv@cfuv.ru

Abstract

Objectives. Fast data analysis based on hidden patterns is one of the main issues for adaptive artificial intelligence systems development. This paper aims to propose and verify a method of such analysis based on the representation of data in the form of a quantum state, or, alternatively, in the form of a geometric object in a space allowing online machine learning.

Methods. This paper uses Feynman formalism to represent quantum states and operations on them, the representation of quantum computing in the form of quantum circuits, geometric transformations, topological classification, as well as methods of classical and quantum machine learning. The Python programming language is used as a development tool. Optimization tools for machine learning are taken from the SciPy module. The datasets for analysis are taken from open sources. Data preprocessing was performed by the method of mapping features into numerical vectors, then the method of bringing the data to the desired dimension was applied. The data was then displayed in a quantum state. A proprietary quantum computing emulator is used (it is in the public domain).

Results. The results of computational experiments revealed the ability of very simple quantum circuits to classify data without optimization. Comparative indicators of classification quality are obtained without the use of optimization, as well as with its use. Experiments were carried out with different datasets and for different values of the dimension of feature spaces. The efficiency of the models and methods of machine learning proposed in the work, as well as methods of combining them into network structures, is practically confirmed.

Conclusions. The proposed method of machine learning and the model of quantum neural networks can be used to create adaptive artificial intelligence systems as part of an online learning module. Free online optimization learning process allows it to be applied in data streaming, that is, adapting to changes in the environment. The developed software does not require quantum computers and can be used in the development of artificial intelligence systems in Python as imported modules.

Keywords: online learning, adaptive artificial intelligence, quantum machine learning, quantum entanglement

• Submitted: 13.02.2023 • Revised: 14.06.2023 • Accepted: 13.08.2023

For citation: Zuev S.V. Geometric properties of quantum entanglement and machine learning. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):19–33. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-19-33>

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

In addition to the noted affiliation, the author is an employee of the V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (Belgorod, Russia). However, although this study is carried out independently of this organization, the author has an obligation to indicate his affiliation with it.

ВВЕДЕНИЕ

Квантовые алгоритмы привлекают все большее внимание, поскольку ожидается, что квантовые компьютеры скоро можно будет полноценно использовать. С другой стороны, квантовые алгоритмы поиска и факторизации являются одной из основных причин развития квантовых компьютеров. В настоящее время по всему миру доступно несколько таких компьютеров. Однако их мощность сравнительно невелика (самый большой – китайский Jiuzhang с 76 кубитами¹), и они пока используются в демонстрационных и исследовательских целях.

Другой полюс прогресса в информационных технологиях – искусственный интеллект. Как и большинство человеческих знаний, искусственный интеллект основан на естественном явлении, известном как познание, у которого до сих пор нет общепризнанной количественной теории. Квантовые версии таких теорий, среди прочих, не имеют пока доказанных явных преимуществ, хотя результаты этого исследования могут рассматриваться как указание на определенные преимущества квантовых методов в машинном обучении.

Преимуществам квантовых вычислений и квантовых компьютеров в решении задач в области искусственного интеллекта посвящен обзор [1], в котором обоснована актуальность работ в этой области и указаны магистральные направления, в одном из которых написана эта работа. Имеется также обзор 2023 г. [2], который содержит ссылки на все современные продвижения в этой области.

Главным возможным преимуществом квантовой версии искусственного интеллекта является экспоненциальный рост вычислительных возможностей. В то время как классический искусственный нейрон может обрабатывать входные данные N измерений, квантовый нейрон может обрабатывать 2^N -мерные данные. Применение квантовой версии может значительно ускорить выполнение как алгоритмов обучения, так и алгоритмов классификации [3]. В то же время, одна из технических проблем,

возникающих при построении крупномасштабного квантового компьютера, – необходимость обеспечить наличие «кубитов, которые могут быть инициализированы произвольными значениями» [4]. Это проблема актуальна и является значительным препятствием на пути к достижению квантового превосходства.

В работах [5–9] предложены прототипы квантовых нейронных сетей на основе квантовых схем с настраиваемыми параметрами. В настоящей работе показано, как этот подход может быть реализован в связи с предложенной архитектурой нейронной сети и как можно обойтись без такой настройки параметров.

Квантовые варианты наиболее популярных алгоритмов машинного обучения уже разработаны. Упомянутые квантовые нейронные сети работают наравне с традиционными. Квантовые машины опорных векторов (Quantum Support Vector Machine) были предложены в [10] и использовали алгоритм ННЛ [11] для инверсии матрицы с целью генерации гиперплоскости. В 2018 г. была представлена модель классификации изображений [12], основанная на квантовых k -соседах. В статье [13] была предложена квантовая линейная регрессия, использующая квантовые данные. Квантовый аналог дерева решений, разработанный в [14], использует измерение квантовой точности и квантовой энтропии, т.е. разбивает классический алгоритм ID3.

Для кластеризации разработано несколько методов квантового машинного обучения в работе [15]. В частности, квантовая версия алгоритма k -средних в различных вариантах представлена в [16] и [17]. Еще один квантовый алгоритм кластеризации предложен в [18], он использует алгоритм Гровера для определения медианы кластера.

Разработан также квантовый аналог метода главных компонент (Quantum Principal Component Analysis) [19], который идентифицирует собственные векторы, относящиеся к собственным значениям неизвестного состояния, экспоненциально быстрее, чем любое другое решение.

Областью, близкой к теме данной работы, является обучение с подкреплением, т.е. онлайн-обучение с учетом реакции среды. Существует несколько

¹ [https://en.wikipedia.org/wiki/Jiuzhang_\(quantum_computer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Jiuzhang_(quantum_computer)). Дата обращения 01.01.2023. / Accessed January 01, 2023.

квантовых вариантов обучения с подкреплением, например, [20], в котором используется суперпозиция квантовых состояний – за счет этого достигается параллелизм и растет скорость обучения.

Особое место в машинном обучении занимает глубокое обучение. Методы глубокого обучения требуют значительных ресурсов памяти и времени, что делает их развитие в квантовую область привлекательным. Из последних продвижений в этой области можно указать серию работ о квантовых генеративных состязательных сетях (Quantum GAN) [21–23] с реализацией в [24], где используется сверхпроводящий квантовый процессор для генерации и изучения рукописных цифровых изображений квантовыми генеративными состязательными сетями Вассерштейна (Quantum WGAN) [25]. Было показано также, что масштабируемость и стабильность обучения квантовой генеративной состязательной модели улучшается на квантовых машинах Больцмана [26, 27], квантовых автокодерах [28, 29] и квантовых сверточных нейронных сетях [7–9]. Из российских работ в этой области можно указать исследование [6].

Улучшение алгоритмов оптимизации также находится в фокусе исследований квантовых алгоритмов. Имеется квантово-улучшенная оптимизация (Quantum Enhanced Optimization) [30], а также квантовый градиентный спуск [31, 32], которые используются в квантовых нейронных сетях, например, в квантовых машинах Больцмана [27].

Среди последних работ можно отметить экспериментальное исследование [33], в котором показано, что квантовые машины опорных векторов превосходят свои классические аналоги в среднем на 3–4%, квантовые нейронные сети, выполненные на квантовом компьютере, превосходят квантовые машины опорных векторов в среднем на 5%, а классические нейронные сети – на 7%.

Квантовая запутанность в связи с моделью познания была предложена в 2005 г. Это модель для семантики комбинаций понятий, выполненных недекомпозиционным способом. В нем рассматриваются возникающие свойства/ассоциации/умозаключения в связи с комбинациями понятий². В настоящей работе эта идея используется для других целей: чтобы обеспечить способ разделения помеченных данных. Это напрямую не связано с познанием, но эти идеи могут помочь найти лучший способ решения следующих актуальных проблем анализа данных и искусственного интеллекта.

Первая проблема – это онлайн-обучение. Она возникает, когда меняется среда данных и нет

времени и ресурсов для нового обучения в системе. Всеобъемлющая теория онлайн-обучения представлена в курсе Массачусетского технологического института, доступном онлайн³. Основная задача в этой проблеме состоит в том, чтобы найти компромисс между качеством и оперативностью: обучение, основанное на качестве, часто требует больших временных затрат, а обучение, основанное на оперативности, может привести к бесполезным результатам. Лучший выбор – создать систему, которая настраивает себя с учетом содержания получаемого ею потока данных. В этой работе предлагается такая система, основанная на запутанных квантовых состояниях. Обобщая эту идею, можно приблизить системы искусственного интеллекта к живому разуму в смысле адаптации к окружающей среде.

Вторая проблема – быстрое распознавание, особенно для движущихся изображений. Эта проблема была хорошо описана в различных блогах и статьях. Например, Шао и Витарсия в работе [34] представили один из современных подходов к этому вопросу. Это исследование было посвящено применению нейронной сети ВР, т.е. искусственной нейронной сети прямого распространения. Применение квантовых алгоритмов для решения этой проблемы не было обнаружено в литературе, но есть разработанный программный инструмент⁴, предназначенный для сравнения потоковых видеоданных, который уже работает в виде веб-сервиса⁵.

Любой прогресс в решении вышеупомянутых проблем может привести к технологическим решениям в таких отраслях, как самоуправляемые автомобили, беспилотные летательные и подводные аппараты, а также видеонаблюдение и другие области, которые в значительной степени связаны с обнаружением аномалий в изменяющейся среде. Чтобы применить результаты этого исследования, не обязательно применять квантовый компьютер: предлагаемые алгоритмы могут быть выполнены на эмуляторах или переформулированы в классической форме. Конечно, это разрушит квантовое превосходство, но эффективность на данных небольшой размерности может оказаться вполне достаточной.

³ Rakhlin A. Online Methods in Machine Learning. Theory and Applications. TA: Arthur Flajolet. <https://www.mit.edu/~rakhlin/6.883/>. Дата обращения 01.01.2023. / Accessed January 01, 2023.

⁴ Билоушенко И.И., Зуев С.В. *Определение степени схожести видеофрагментов*. 2022. Сертификат 2022685057 выдан Федеральной службой по интеллектуальной собственности 20.12.2022. [Biloushenko I.I., Zuev S.V. *Determining the degree of similarity of video fragments*, 2022; Certificate 2022685057 of 20.12.2022 issued by the Federal Service for Intellectual Property (in Russ.).]

⁵ <https://ais.bstu.ru/services/1>. Дата обращения 05.07.2023. / Accessed July 05, 2023.

² Bruza P.D., Cole R.J. *Quantum Logic of Semantic Space: An Exploratory Investigation of Context Effects in Practical Reasoning*, 2006. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0612178>. Дата обращения 01.01.2023. / Accessed January 01, 2023.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе будут использованы квантовые и классические данные, описанные далее. Множество $\{x^j\}$ наборов из n действительных чисел $\mathbf{x}^j = \{x_0^j, \dots, x_{n-1}^j\}$ с меткой l^j , определенной для каждого набора, представляет собой *классические* данные. Множество квантовых состояний

$$|q^j\rangle \equiv \sum_{k=0}^{2^n-1} a_k^j |k\rangle$$

рассматривается как *квантовые* данные. Компоненты a_k^j вектора квантового состояния рассматриваются заданными в определенном вычислительном базисе $|0\rangle, \dots, |2^n-1\rangle$. Эти обозначения являются общепринятыми – они используются в таких книгах как, например, [35]. Прежде чем будет установлена взаимосвязь между этими данными, сделаем несколько предварительных замечаний.

Не является очевидным то, какие данные используются для доставки информации из системы в систему в природе. Но для человеческих операций требуется классическая информация. Легко видеть, что 2^n -мерная квантовая система может выдать только n -мерные классические данные, хотя во время вычислений квантовая система работает в 2^n -мерном пространстве состояний. Проблема генерации начального квантового состояния связана как раз с тем, что источник квантовых данных, вообще говоря, неизвестен, а сформировать эти данные из классических, конечно, невозможно. Таким образом, единственное, что можно предполагать определенно, это то, что система уже имела данные в квантовой форме до начала вычислений. Но это означает, что все зависимости уже содержатся в квантовых данных, и квантовая интеллектуальная система должна их использовать. На этом основано дальнейшее рассмотрение.

Опишем сначала структуру пространства состояний системы из n кубитов. Исходя из того, как представлены квантовые данные, это пространство вложено в $\mathbb{C}^N$, где $N = 2^n$ и $\mathbb{C}$ есть пространство комплексных чисел. Кроме того, известно, что квантовые состояния описываются векторами с абсолютным значением, равным 1, и векторы, отличающиеся только фазовым коэффициентом $e^{i\varphi}$, описывают одно и то же состояние. Это говорит о том, что можно рассмотреть отношение эквивалентности

$$\frac{z^1}{z^0} \equiv w^1, \dots, \frac{z^{N-1}}{z^0} \equiv w^{N-1}. \quad (1)$$

Пространство таких векторов $\mathbf{w}$ называется (*комплексным*) *проективным пространством* $\mathbb{CP}^{N-1}$,

которое представляет собой набор векторов с N комплексными координатами $(z^1, \dots, z^{N-1})$, связанных соотношением эквивалентности (1). Другим условием, которое может быть выведено из (1), является следующее:

$$|z^0|^2 + \dots + |z^{N-1}|^2 = 1. \quad (2)$$

Фазы координат w^k определяются с точностью до общего множителя $e^{-i\phi_0}$, где ϕ_0 есть произвольная фаза координаты z^0 . Таким образом, пространство $\mathbb{CP}^{N-1}$ может быть отождествлено с пространством состояний системы из n кубитов, а координаты могут быть представлены в виде:

$$w^k = \frac{|z^k|}{|z^0|} e^{i(\phi_k - \phi_0)}.$$

Без каких-либо ограничений мы можем положить $\phi_0 = 0$. Пространство $\mathbb{CP}^{N-1}$, согласно приведенной выше процедуре, гомеоморфно поверхности (2) размерности $2N - 2$, поскольку $z_{\text{im}}^0 = 0$ и, следовательно,

$$|z^0|^2 + \dots + |z^{N-1}|^2 = (z_{\text{re}}^0)^2 + (z_{\text{re}}^1)^2 + \dots + (z_{\text{im}}^1)^2 + \dots + (z_{\text{re}}^{N-1})^2 + (z_{\text{im}}^{N-1})^2 = 1.$$

Это сфера S^{N-2} , и можно параметризовать каждую ее точку z_j , используя следующие обобщенные сферические координаты:

$$\begin{aligned} z_j^0 &= \cos \delta_j^0 \cos \delta_j^1 \dots \cos \delta_j^{2^n-2}, \\ z_j^1 &= \sin \delta_j^0 \cos \delta_j^1 \dots \cos \delta_j^{2^n-2} e^{i\gamma_j^0}, \\ z_j^2 &= \sin \delta_j^1 \cos \delta_j^2 \dots \cos \delta_j^{2^n-2} e^{i\gamma_j^1}, \\ &\dots \\ z_j^{2^n-2} &= \sin \delta_j^{2^n-3} \cos \delta_j^{2^n-2} e^{i\gamma_j^{2^n-3}}, \\ z_j^{2^n-1} &= \sin \delta_j^{2^n-2} e^{i\gamma_j^{2^n-2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \delta_j^0 &= \frac{\pi}{2} d_j^0, \delta_j^1 = \frac{\pi}{2} d_j^1, \dots, \delta_j^{2^n-2} = \frac{\pi}{2} d_j^{2^n-2}, \\ \gamma_j^0 &= 2\pi d_j^{2^n-1}, \dots, \gamma_j^{2^n-2} = 2\pi d_j^{2^n-1-3} \end{aligned}$$

и d_j^i есть значение i -го признака в j -й выборке данных в масштабированных данных ($d_j^i \in [0,1)$).

Таким образом, можно закодировать любой обучающий набор данных в квантовое состояние, используя следующую формулу:

$$|q_j\rangle = \sum_{k=0}^{2^n-1} z_j^k(d) |k\rangle. \quad (4)$$

Согласно постулатам квантовой механики, если существуют две системы с n_1 и n_2 кубитами соответственно, то состояния объединенной системы имеют следующий вид:

$$|q\rangle = \sum_{k=0}^{2^{n_2}-1} \sum_{m=0}^{2^{n_1}-1} a^m b^k |m\rangle |k\rangle,$$

где a представляет амплитуды состояния первой системы, а b – второй системы.

Пространства состояний для каждой системы равны $S^{2^{n_1}-2}$ и $S^{2^{n_2}-2}$. Множество состояний для объединенной системы является их прямым произведением, т.е. $S^{2^{n_1}-2} \times S^{2^{n_2}-2}$. Однако в силу топологических причин это определено не $S^{2^{n_1+n_2}-2}$.

Часть системы ($n_1 + n_2$) кубитов, которая не может быть выражена как произведение состояний подсистем, образует набор так называемых *запутанных состояний*. Основное свойство запутанного состояния заключается в том, что для вывода системы из запутанного состояния необходимо выполнить унитарное преобразование, которое существенно влияет на все ее подсистемы. Как известно, запутанные состояния образуют базис в пространстве состояний, и далее он будет называться *запутанным базисом*.

Если состояние многокубитной системы запутано, то невозможно выйти из него, не затронув каждый кубит. В то же время каждое состояние системы может быть записано в запутанном базисе. Это означает, что каждый компонент состояния в этом базисе существенно влияет на все кубиты. Если мы измерим амплитуды этих компонентов, то сможем увидеть, как подсистемы взаимодействуют в этой квантовой системе. Если метки состояний заданы, то необходимо определить, какой базисный вектор соответствует интересующей нас метке, что может быть определено из статистики результатов измерений для данной метки. Кроме того, если новые состояния одной и той же системы измеряются одинаковым образом, то с определенной вероятностью можно предсказать их принадлежность к помеченному классу, что соответствует результату измерения, который в наибольшей степени относится к помеченным образцам.

В определенной степени это означает, что классификация может быть выполнена без оптимизации, если зависимости уже есть в данных. Последнее

является важным дополнением, поскольку классификация данных без зависимостей (например, когда данные представляют собой полную суперпозицию чистых состояний) завершится неудачей. Следовательно, для классификации необходимо определить зависимости, которые приводят к данному классу. Это, по сути, квантовое свойство, связанное с запутанностью. Конечно, это можно интерпретировать, не прибегая к квантовым представлениям, но тогда необходимо будет учитывать топологические свойства множества состояний системы и подмножества ее запутанных состояний, чтобы строить на них вероятностные модели. В настоящее время интерпретация в терминах квантовых вычислений выглядит проще.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Быстрая онлайн-классификация

Рассмотрим размеченный набор данных $\{d_j^i, l_j\}$, где d_j^i есть значение i -го признака в j -й выборке, а l_j – значение метки (класса) для j -й выборки. Разделим все данные на обучающую и тестовую выборки и обозначим их

$$\{d_{jt}^i, l_{jt}\} \text{ и } \{d_{jc}^i, l_{jc}\},$$

соответственно. Будем считать, что значения для всех признаков шкалированы и метки принимают значения от 0 до $L-1$:

$$d_j^i \in [0,1), l_j \in \{0, \dots, L-1\},$$

где $L = 2^l$.

Случай двух кубитов

Положим $n = 2$, $l = 1$, т.е., число признаков равно 6 и метки принимают значения 0 и 1. Тогда $i = 0, \dots, 5$ и

$$\delta_j^0 = \frac{\pi}{2} d_j^0, \quad \delta_j^1 = \frac{\pi}{2} d_j^1, \quad \delta_j^2 = \frac{\pi}{2} d_j^2, \\ \gamma_j^0 = 2\pi d_j^3, \quad \gamma_j^1 = 2\pi d_j^4, \quad \gamma_j^2 = 2\pi d_j^5.$$

Кодирование данных в квантовые состояния, согласно (3) и (4), примет вид

$$z_j^0 = \cos \delta_j^0 \cos \delta_j^1 \cos \delta_j^2, \quad z_j^1 = \sin \delta_j^0 \cos \delta_j^1 \cos \delta_j^2 e^{i\gamma_j^0}, \\ z_j^2 = \sin \delta_j^1 \cos \delta_j^2 e^{i\gamma_j^1}, \quad z_j^3 = \sin \delta_j^2 e^{i\gamma_j^2}, \quad (5)$$

$$|q_j\rangle = \sum_{k=0}^3 z_j^k |k\rangle. \quad (6)$$

Таблица 1. Эксперимент с датасетом сердечных болезней. F1 – среднее гармоническое точности и полноты метода

Метод	Точность (Precision), %	Полнота (Recall), %	F1, %	Время обучения, мс	Время работы, мс
Классификация эмулированным квантовым запутанным базисом	76	65	70	20.5	9
Классификация линейным дискриминантным анализом	100	58	73	7.6	4.9
Классификация логистической регрессией	68	65	66	5.2	3.1

Рассмотрим следующую квантовую схему (рис. 1). Это хорошо известная схема для преобразования состояний Белла в векторы вычислительного базиса. С ее помощью получим вероятности того, насколько векторы запутанного базиса (состояния Белла) соответствуют вектору, заданному на входе.

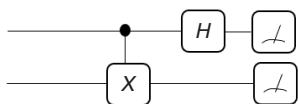


Рис. 1. Квантовая схема для преобразования состояний Белла в векторы вычислительного базиса. H – вентиль Адамара, X – вентиль NOT

Схема на рис. 1 может классифицировать данные, содержащие шесть признаков. Это легко проверить на примере датасета о сердечных заболеваниях, взятого с ресурса [kaggle.com](https://www.kaggle.com/datasets/zgheakylz/heart-disease-data)⁶.

Исходный датасет содержит 13 признаков и одну метку. Признаки: возраст, пол, боль в груди, пульс, холестерин, и другие. Метка – наличие сердечной болезни. В датасете 303 экземпляра данных, из которых 165 имеют метку 1, остальные – 0. Приведенные на ресурсе [kaggle.com](https://www.kaggle.com) примеры анализа этого датасета линейными классификаторами дают значения метрики ауссигасы для предсказания заболевания от 64% до 88%.

На этом датасете был проведен следующий эксперимент. Все значения признаков были переведены в диапазоны целых чисел от 0 до предельного значения, зависящего от признака. Затем данные были приведены к шести признакам без потери информации в данных, и осуществлена параметризация в виде квантовых состояний двухчастичной системы (5). Разделение на обучающую и тестовую выборки проведено в пропорции 65/35. Полученный результат подвергнут сравнению с результатом работы LDA-классификатора⁷. Результаты приведены в табл. 1.

⁶ Akyildiz Ö. Heart disease data. <https://www.kaggle.com/datasets/zgheakylz/heart-disease-data>. Дата обращения 09.01.2023. / Accessed January 09, 2023.

⁷ <https://scikit-learn.ru/1-2-linear-and-quadratic-discriminant-analysis/> (in Russ.). Дата обращения 09.01.2023. / Accessed January 09, 2023.

Подготовленный датасет и программный код представлены в архиве⁸ с открытым доступом. Показатели, приведенные в табл. 1, не являются высокими, но они получены без оптимизации, с использованием только пришедших данных, и время работы алгоритма затрачено, в основном, на эмуляцию квантовых состояний и операций. Тем не менее, такая процедура классификации может работать практически на любом устройстве в режиме реального времени, т.к. не требует оптимизации и может работать в параллельных потоках. Указанный выше эксперимент проводился на машине с процессором Intel Core I5 и ОЗУ 8Гб (производитель – Intel, США), в одном потоке.

Возможно усомниться в том, что предлагаемый метод является машинным обучением (из-за отсутствия оптимизации). Однако определение машинного обучения [36], гласит, что алгоритмы машинного обучения строят модель на основе выборочных данных, известных как обучающие данные, для получения прогнозов или решений, не будучи явно запрограммированными на это. Рассмотренный метод использует данные и модель, содержащуюся в них, и позволяет делать прогнозы на основе этой модели, т.е., полностью удовлетворяет определению машинного обучения.

Качество классификации может быть улучшено с помощью известных методов (бэггинг⁹ и бустинг¹⁰). Но можно также улучшить его, используя машинное обучение в традиционном смысле как параметрическое преобразование с оптимизацией. Способ его использования в квантовом случае был показан, например, в [37]. В рассматриваемом случае,

⁸ Программные коды и датасеты к статье размещены в архиве по адресу https://disk.yandex.ru/d/JK4dsbdGLP_ZaQ. [Program codes and datasets for the paper are archived at https://disk.yandex.ru/d/JK4dsbdGLP_ZaQ]. Дата обращения 09.01.2023. / Accessed January 09, 2023.

⁹ Bootstrap aggregating – технология классификации, использующая композиции алгоритмов, каждый из которых обучается независимо. Результат классификации определяется путем голосования.

¹⁰ Boosting – процедура последовательного построения композиции алгоритмов машинного обучения, когда каждый следующий алгоритм стремится компенсировать недостатки композиции всех предыдущих алгоритмов.

в схеме на рис. 1, нужно поместить два управляемых вентиля (U_0 , U_1) в первый регистр (управляемый по 0 и по 1), затем простой вентиль V – во второй регистр, и измерить второй регистр. Результат измерения должен быть связан со значением метки, а выходное состояние должно быть установлено в чистое состояние. Параметрами оптимизации являются компоненты вентилях. Схема показана на рис. 2.

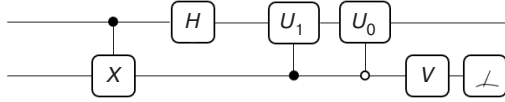


Рис. 2. Простейший квантовый классификатор с оптимизацией

На вход подается двухчастичное состояние $|q\rangle = a_0|00\rangle + a_1|01\rangle + a_2|10\rangle + a_3|11\rangle$, которое далее преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} |q\rangle &\xrightarrow{CX} a_0|00\rangle + a_1|01\rangle + a_2|11\rangle + a_3|10\rangle \xrightarrow{H} \frac{a_0 + a_3}{\sqrt{2}}|00\rangle + \\ &+ \frac{a_1 + a_2}{\sqrt{2}}|01\rangle + \frac{a_0 - a_3}{\sqrt{2}}|10\rangle + \frac{a_1 - a_2}{\sqrt{2}}|11\rangle \xrightarrow{CU_1, CU_0} \\ &\xrightarrow{CU_1, CU_0} \frac{a_0 + a_3}{\sqrt{2}}U_0|0\rangle|0\rangle + \frac{a_1 + a_2}{\sqrt{2}}U_1|0\rangle|1\rangle + \\ &+ \frac{a_0 - a_3}{\sqrt{2}}U_0|1\rangle|0\rangle + \frac{a_1 - a_2}{\sqrt{2}}U_1|1\rangle|1\rangle \xrightarrow{V} \\ &\xrightarrow{V} \frac{a_0 + a_3}{\sqrt{2}}U_0|0\rangle V|0\rangle + \frac{a_1 + a_2}{\sqrt{2}}U_1|0\rangle V|1\rangle + \\ &+ \frac{a_0 - a_3}{\sqrt{2}}U_0|1\rangle V|0\rangle + \frac{a_1 - a_2}{\sqrt{2}}U_1|1\rangle V|1\rangle. \end{aligned}$$

Если параметры вентилях U_0 , U_1 и V таковы, что

$$\begin{aligned} U_0|0\rangle &= \cos\alpha_0|0\rangle + \sin\alpha_0 e^{i\psi_0}|1\rangle, \\ U_0|1\rangle &= -\sin\alpha_0 e^{i\phi_0}|0\rangle + \cos\alpha_0 e^{i(\phi_0+\psi_0)}|1\rangle, \\ U_1|0\rangle &= \cos\alpha_1|0\rangle + \sin\alpha_1 e^{i\psi_1}|1\rangle, \\ U_1|1\rangle &= -\sin\alpha_1 e^{i\phi_1}|0\rangle + \cos\alpha_1 e^{i(\phi_1+\psi_1)}|1\rangle, \\ V|0\rangle &= \cos\beta|0\rangle + \sin\beta e^{i\nu}|1\rangle, \\ V|1\rangle &= -\sin\beta e^{i\mu}|0\rangle + \cos\beta e^{i(\mu+\nu)}|1\rangle, \end{aligned}$$

то результирующее состояние будет иметь вид:

$$A_{00}|00\rangle + A_{01}|01\rangle + A_{10}|10\rangle + A_{11}|11\rangle,$$

где

$$\begin{aligned} A_{00} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left((a_0 + a_3) \cos\alpha_0 - (a_0 - a_3) \sin\alpha_0 e^{i\phi_0} \right) \cos\beta - \\ &- \frac{1}{\sqrt{2}} \left((a_1 + a_2) \cos\alpha_1 - (a_1 - a_2) \sin\alpha_1 e^{i\phi_1} \right) \sin\beta e^{i\mu}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{01} &= \frac{e^{i\nu}}{\sqrt{2}} \left((a_0 + a_3) \cos\alpha_0 - (a_0 - a_3) \sin\alpha_0 \right) \sin\beta + \\ &+ \frac{e^{i\nu}}{\sqrt{2}} \left((a_1 + a_2) \cos\alpha_1 - (a_1 - a_2) \sin\alpha_1 e^{i\phi_1} \right) \cos\beta e^{i\mu}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{10} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left((a_0 + a_3) \sin\alpha_0 e^{i\psi_0} + (a_0 - a_3) \sin\alpha_0 e^{i\phi_0} \right) \cos\beta - \\ &- \frac{e^{i(\mu+\psi_1)}}{\sqrt{2}} \left((a_1 + a_2) \sin\alpha_1 + (a_1 - a_2) \cos\alpha_1 e^{i\phi_1} \right) \sin\beta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{e^{i(\nu+\psi_0)}}{\sqrt{2}} \left((a_0 + a_3) \sin\alpha_0 + (a_0 - a_3) \cos\alpha_0 e^{i\phi_0} \right) \sin\beta + \\ &+ \frac{e^{i(\mu+\nu+\psi_1)}}{\sqrt{2}} \left((a_1 + a_2) \sin\alpha_1 + (a_1 - a_2) \cos\alpha_1 e^{i\phi_1} \right) \cos\beta. \end{aligned}$$

При метке 0 это состояние должно выдавать при измерении во втором регистре результат «0» с наибольшей вероятностью, что означает:

$$A_{01} \rightarrow 0, A_{11} \rightarrow 0.$$

При метке 1, напротив, должно быть:

$$A_{00} \rightarrow 0, A_{10} \rightarrow 0.$$

Процедура обучения призвана найти наилучший набор параметров гейтов ($\alpha_0, \phi_0, \psi_0, \alpha_1, \phi_1, \psi_1, \beta, \mu, \nu$), который обеспечивает наилучшие устремления. Это задача оптимизации.

Классификатор, показанный на рис. 2, является самым малым возможным классификатором подобного типа. Он представляет собой некоторый аналог искусственного нейрона с двумерным входом: принимает 2-кубитный квантовый сигнал и выдает 1-кубитный квантовый сигнал и 1-битный классический сигнал (в отличие от классического нейрона, где выдается только один сигнал). Наличие квантового сигнала на выходе позволяет использовать квантовую информацию дальше, т.е. создавать сеть. Обучение и эксплуатация такого классификатора проиллюстрированы в архиве¹¹. Как показал эксперимент с датасетом по сердечным заболеваниям, оптимизация увеличивает показатели качества классификации, но лишь незначительно. Это означает, что в рассматриваемом случае мы можем использовать квантовое машинное обучение (КМО), основанное на квантовой запутанности, без какой-либо оптимизации. Однако это не общее утверждение: для классификаторов более высокой размерности это может быть не так.

¹¹ https://disk.yandex.ru/d/JK4dsbdGLP_ZaQ. Дата обращения 09.01.2023. / Accessed January 09, 2023.

Обучение квантового классификатора

Квантовая схема на рис. 2 содержит три вентиля (U_0 , U_1 , V) с параметрами, которые можно настраивать. Например, вентиль V может быть записан в виде:

$$V = \cos \beta |0\rangle\langle 0| - \sin \beta e^{i\tau} |0\rangle\langle 1| + \sin \beta e^{i(\tau+\theta)} |1\rangle\langle 0| + \cos \beta |1\rangle\langle 1|,$$

и указанными параметрами являются β , θ и τ . Но изменение параметра τ ведет только к умножению результирующего состояния на фазовый множитель, т.е., не приводит к значимому эффекту. Этот параметр будет играть роль в системах большей размерности, а в случае двух кубитов для оптимизации вентилей V варьируются всего два параметра: β и θ .

То же самое верно для вентилях U_0 и U_1 , которые можно записать так:

$$U_\varepsilon = \cos \alpha_\varepsilon |0\rangle\langle 0| - \sin \alpha_\varepsilon |0\rangle\langle 1| + \sin \alpha_\varepsilon e^{i\rho_\varepsilon} |1\rangle\langle 0| + \cos \alpha_\varepsilon e^{i\rho_\varepsilon} |1\rangle\langle 1|, \quad \varepsilon = 0, 1,$$

где варьируемыми параметрами будут α_0 , α_1 , ρ_0 , ρ_1 . Итого, для двухчастичной квантовой схемы имеем шесть варьируемых параметров.

Построим функцию правдоподобия как сумму модулей следующих скалярных произведений:

$$(|\hat{a}_j|^2, |\hat{b}_j|^2) \text{ и } (1 - l_j, l_j),$$

где $\hat{a}_j$ и $\hat{b}_j$ есть амплитуды квантового состояния, выходящего из второго регистра на j -м пакете, а l_j есть метка входящего квантового состояния. Приведем вычисления для начального состояния (6). До управляемых вентилях:

$$\begin{aligned} |q_j\rangle &\rightarrow z_j^0 |00\rangle + z_j^1 |01\rangle + z_j^2 |11\rangle + z_j^3 |10\rangle \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(z_j^0 + z_j^3) |00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}(z_j^1 + z_j^2) |01\rangle + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}}(z_j^0 - z_j^3) |10\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}(z_j^1 - z_j^2) |11\rangle \end{aligned}$$

действуют управляемые вентили U_1 и U_0 :

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^0 + z_j^3) \cos \alpha_0 - (z_j^0 - z_j^3) \sin \alpha_0) |00\rangle + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^1 + z_j^2) \cos \alpha_1 - (z_j^1 - z_j^2) \sin \alpha_1) |01\rangle + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^0 + z_j^3) \sin \alpha_0 e^{i\rho_0} + (z_j^0 - z_j^3) \cos \alpha_0 e^{i\rho_0}) |10\rangle + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^1 + z_j^2) \sin \alpha_1 e^{i\rho_1} + (z_j^1 - z_j^2) \cos \alpha_1 e^{i\rho_1}) |11\rangle. \end{aligned}$$

Наконец, действует вентиль V :

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^0 + z_j^3) \cos \alpha_0 - (z_j^0 - z_j^3) \sin \alpha_0) \times \\ &\times (\cos \beta |00\rangle + \sin \beta e^{i\theta} |01\rangle) + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^0 + z_j^3) \sin \alpha_0 e^{i\rho_0} + (z_j^0 - z_j^3) \cos \alpha_0 e^{i\rho_0}) \times \\ &\times (\cos \beta |10\rangle + \sin \beta e^{i\theta} |11\rangle) + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^1 + z_j^2) \cos \alpha_1 - (z_j^1 - z_j^2) \sin \alpha_1) \times \\ &\times (-\sin \beta |00\rangle + \cos \beta e^{i\theta} |01\rangle) + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^1 + z_j^2) \sin \alpha_1 e^{i\rho_1} + (z_j^1 - z_j^2) \cos \alpha_1 e^{i\rho_1}) \times \\ &\times (-\sin \beta |10\rangle + \cos \beta e^{i\theta} |11\rangle). \end{aligned}$$

Это состояние перед измерением и его можно записать в следующем виде

$$B_{00} |00\rangle + B_{01} |01\rangle + B_{10} |10\rangle + B_{11} |11\rangle,$$

где

$$\begin{aligned} B_{00} &= \frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^0 + z_j^3) \cos \alpha_0 - (z_j^0 - z_j^3) \sin \alpha_0) \cos \beta - \\ &- \frac{1}{\sqrt{2}}((z_j^1 + z_j^2) \cos \alpha_1 - (z_j^1 - z_j^2) \sin \alpha_1) \sin \beta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{01} &= \frac{e^{i\theta}}{\sqrt{2}}((z_j^0 + z_j^3) \cos \alpha_0 \sin \beta - (z_j^0 - z_j^3) \sin \alpha_0) \sin \beta + \\ &+ \frac{e^{i\theta}}{\sqrt{2}}((z_j^1 + z_j^2) \cos \alpha_1 \cos \beta - (z_j^1 - z_j^2) \sin \alpha_1) \cos \beta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{10} &= \frac{e^{i\rho_0}}{\sqrt{2}}((z_j^0 + z_j^3) \sin \alpha_0 + (z_j^0 - z_j^3) \cos \alpha_0) \cos \beta - \\ &- \frac{e^{i\rho_1}}{\sqrt{2}}((z_j^1 + z_j^2) \sin \alpha_1 + (z_j^1 - z_j^2) \cos \alpha_1) \sin \beta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{11} &= \frac{e^{i(\theta+\rho_0)}}{\sqrt{2}}((z_j^0 + z_j^3) \sin \alpha_0 + (z_j^0 - z_j^3) \cos \alpha_0) \sin \beta + \\ &+ \frac{e^{i(\theta+\rho_1)}}{\sqrt{2}}((z_j^1 + z_j^2) \sin \alpha_1 + (z_j^1 - z_j^2) \cos \alpha_1) \cos \beta. \end{aligned}$$

Измерение второго регистра даст 0 с вероятностью $|\hat{a}_j|^2$ и 1 с вероятностью $|\hat{b}_j|^2$:

$$|\hat{a}_j|^2 = |B_{00}|^2 + |B_{10}|^2,$$

$$|\hat{b}_j|^2 = |B_{01}|^2 + |B_{11}|^2.$$

Легко видеть, что единственный оставшийся фазовый параметр есть $\rho \equiv \rho_1 - \rho_0$, и функция правдоподобия имеет вид:

$$\Phi(\alpha_0, \alpha_0, \beta, \rho) = \sum_j |\hat{a}_j|^2 (1 - l_j) + \sum_j |\hat{b}_j|^2 l_j.$$

Она должна быть максимизирована так, чтобы во втором регистре ожидалось состояние $|1\rangle$, если $l_j = 1$. Это было сделано методом COBYLA¹² в программном коде, доступном в архиве¹³.

Расчет функции правдоподобия приведен для того, чтобы использовать его для вычислений на классическом компьютере. В случае применения квантового компьютера нет необходимости вычислять функцию правдоподобия вручную: значения $|\hat{a}_j|^2$ и $|\hat{b}_j|^2$ будут доступны как результаты измерений.

Произвольное число кубитов

Обобщим построенный классификатор на случай произвольного числа частиц. Начнем с версии без оптимизации. Для этого понадобится построить многочастичный запутанный базис. В случае двух частиц запутанность возникала в форме комбинации вектора вычислительного базиса и его инвертированного вектора. Подобные комбинации для случая трех частиц выглядят так:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |111\rangle), \frac{1}{\sqrt{2}}(|001\rangle + |110\rangle), \frac{1}{\sqrt{2}}(|010\rangle + |101\rangle), \\ & \frac{1}{\sqrt{2}}(|011\rangle + |100\rangle), \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle - |111\rangle), \frac{1}{\sqrt{2}}(|001\rangle - |110\rangle), \\ & \frac{1}{\sqrt{2}}(|010\rangle - |101\rangle), \frac{1}{\sqrt{2}}(|011\rangle - |100\rangle). \end{aligned}$$

Легко видеть, что ни одно из этих состояний не является результатом тензорного произведения ни трех одночастичных, ни каких-либо двухчастичных и одночастичных состояний. Таким образом, все они являются запутанными состояниями и, что также легко проверить, образуют базис. Это запутанный базис для 3-частичной системы. Аналогично можно построить запутанный базис для произвольной n -частичной квантовой системы:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0x\rangle + |1\bar{x}\rangle), \frac{1}{\sqrt{2}}(|0x\rangle - |1\bar{x}\rangle),$$

где x есть двоичная запись числа от 0 до $2^n - 1$, а надчеркивание обозначает инверсию.

¹² Constrained optimization by linear approximation – метод ограниченной оптимизации с линейной аппроксимацией.

¹³ https://disk.yandex.ru/d/JK4dsbdGLP_ZaQ. Дата обращения 09.01.2023. / Accessed January 09, 2023.

Квантовая схема многочастичного классификатора без оптимизации представлена на рис. 3.

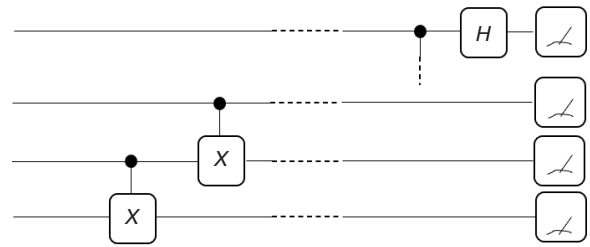


Рис. 3. Классификатор без оптимизации

Обобщение схемы на рис. 2 теперь очевидно: достаточно установить управляемые вентили ($2n - 2$ штуки – по два на каждый управляющий регистр) на первый регистр и по одному вентилю на регистры, начиная со второго. Это показано на рис. 4.

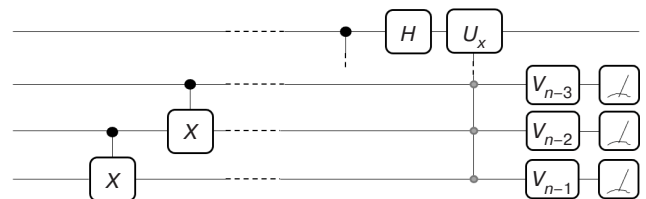


Рис. 4. Оптимизируемый квантовый классификатор

Серые точки на рис. 4 обозначают управление по 0 или по 1 на одном из регистров. Схема на рис. 4 представляет собой квантовый нейрон с произвольным числом входов. Схема на рис. 3 может рассматриваться таким же образом, если не измерять первый регистр – он тогда будет содержать состояние, являющееся суперпозицией двух векторов запутанного базиса. Векторы определяются результатом измерения. Обучение без оптимизации проводится, как и раньше, на статистике и на предположении, что в данных имеются закономерности.

Детектирование аномалий на потоковых данных

Когда данные поступают в потоке, можно брать в расчет последние J пришедших пакетов d_j^i , $j = 0, J - 1$. Эти данные не являются размеченными априори. Задача – детектировать аномалию в потоке, т.е., ситуацию, когда пришедшая серия пакетов данных резко отличается от тех, которые были в потоке до этого. Отличие может быть не только в самих пакетах, но и в порядке их следования.

Предложенные выше классификаторы могут использоваться для детектирования аномалий. Выбранные J пакетов рассматриваются как базовые для статистики: на них получаются серии измерений из 0 и 1. Например, в 2-частичном случае имеется четыре возможных результата измерения (если

не рассматривать выход квантового состояния). Частоты этих результатов измерения образуют вектор текущего состояния системы. Если этот вектор остается приближенно постоянным или принимает значения только в определенных кластерах всякий раз, когда его вычисляют на J пакетах, то любой новый вход из J пакетов, на которых указанный вектор не попадает ни в один из кластеров, будет аномалией.

Естественно, возникают два вопроса. Первый касается ситуации, когда имеется большое число признаков в потоковых данных, например, в случае видеопотока. В соответствии с рассмотрением выше, если имеется F признаков, то нам необходимо $\log(F/2 + 1)$ кубитов и $F/2 + 1$ возможных состояний. Это может быть довольно большое число. Поэтому требуется устанавливать пороговое значение по частоте появления признаков – это настраиваемый параметр. В приведенном ниже эксперименте с датасетом студентов, пороговая частота была установлена в 10%: если признак проявлялся в данном состоянии меньше, чем в 10% случаев, то считалось, что он не проявлялся в этом состоянии вовсе. При увеличении этого порога росло число экземпляров данных, которые сеть не классифицировала. А при уменьшении – ухудшались метрики.

Другой вопрос касается значения J . Для него есть некоторые рекомендации: J должно быть меньше, чем число пакетов, появляющихся за максимальное время принятия решения и, в то же время, J должно быть сравнительно большим для того, чтобы статистика была достаточно богатой, т.е., чтобы обучение давало эффективное предсказание: если аномалия не определяется, то модель недообучена и J нужно увеличивать. А если много ложных срабатываний, то имеет место переобучение и J нужно уменьшать.

Пример кода детектора аномалий, основанного на классификаторе, построенном на запутанном базисе, приведен в архиве¹⁴.

Искусственная нейронная сеть из квантовых аналогов нейронов

Квантовый нейрон, представленный на рис. 4 или 3 (далее q -нейрон), может быть использован для построения квантовой нейронной сети (далее – КНС). Вообще говоря, такая сеть, принимая на вход I квантовых состояний (кубитов), возвращает $Q < I$ квантовых состояний вместе с $C = I - Q$ классическими битами информации. КНС может быть обучена на основе полученной классической информации. Процедура обучения в случае q -нейронов с оптимизацией совпадает с таковой в классическом случае, в качестве весов выступают параметры квантовых вентилей.

Копирование квантовых состояний запрещено. Поэтому КНС не содержат разветвлений. Но q -нейрон может содержать более одного квантового выхода – это можно использовать для создания сетей различной архитектуры.

Пусть в первом слое имеется Q_1 q -нейронов. Ясно, что $Q_1 \leq \frac{I}{2}$, поскольку любой q -нейрон должен иметь, как минимум, два кубита на входе. Соответственно, будет $C_1 \leq I - Q_1$ классических битов информации на выходе слоя. В следующем слое может быть Q_2 q -нейронов, причем $Q_2 \leq \frac{I - C_1}{2}$. Это схематически показано на рис. 5, где у всех q -нейронов по одному квантовому выходу и $I = 20$, $Q_1 = 8$, $Q_2 = 3$. Если не добавлять второй слой, то сеть на рис. 5 выдаст 8 кубитов и 12 битов на выходе. Если же добавить еще один q -нейрон после второго слоя (третьим слоем), то на выходе будет 1 кубит и 19 битов.

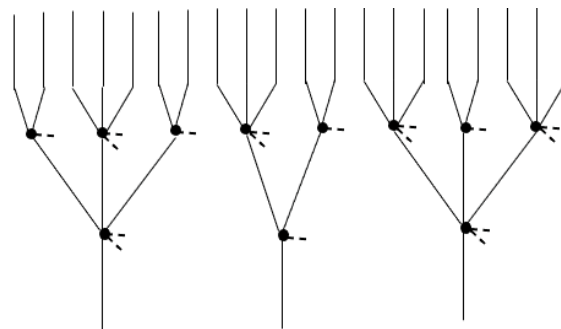


Рис. 5. КНС на 11 q -нейронах (черные точки): 20 кубитов (линии) на входе, 3 кубита на выходе, 17 битов (пунктирные линии) классической информации

КНС, показанная на рис. 5, по архитектуре похожа на фрактальную нейронную сеть, рассмотренную в [38]. Хотя в [38] рассматривались классические нейронные сети с обычными нейронами, отмеченные там свойства, такие как быстрая обучаемость и способность работы с большой размерностью входящих векторов, остаются таковыми и у КНС.

Обучение квантовой нейронной сети

Обучение одного q -нейрона уже рассмотрено выше. Обобщим эту процедуру на обучение сети. Сосредоточимся для простоты только на случае двух слоев. Возьмем для примера сеть, изображенную на рис. 5 в центре: пять кубитов на входе, два q -нейрона и 3 бита классической информации на первом слое, а на втором слое – один q -нейрон и один бит классической информации.

Сделав прямой проход на обучающей выборке, получим статистику соответствия меток и наборов классических битов. Поставим их в соответствие

¹⁴ https://disk.yandex.ru/d/JK4dsbdGLP_ZaQ. Дата обращения 09.01.2023. / Accessed January 09, 2023.

друг другу. Пусть в рассматриваемом случае метки принимают всего два возможных значения. Один q -нейрон на выходе позволяет получить 2 классических бита при измерении обоих регистров – нет задачи распространения квантового состояния дальше и поэтому его можно измерить. Поэтому изначально нужно отнести метке 0 наиболее часто выпадающие ей выходы (это может быть или 00, 01, 10, или 11) приблизительно пропорционально доле этой метки в обучающей выборке, а остальные соотносить с меткой 1. Пусть метке ε соответствует e_0, e_1, e_2, e_3 из всех n_0, n_1, n_2, n_3 выходов вида 00, 01, 10 и 11, соответственно. И эта метка имеет долю f_ε в обучающей выборке. Выберем ε с наибольшей долей, отсортируем $\frac{e_0}{n_0}, \frac{e_1}{n_1}, \frac{e_2}{n_2}, \frac{e_3}{n_3}$ по убыванию и выберем такую сумму первых элементов полученного списка, которая имеет наиболее близкую к f_ε долю суммы соответствующих n_i в общем количестве пакетов. Соответствующие выходы соотнесем с меткой ε .

Пример. Выборка из 5000 пакетов, разделенных метками на 4000 (0) и 1000 (1). Для метки 0 на выходе сети получилось $e_0 = 1500, e_1 = 500, e_2 = 1400, e_3 = 600$, а общие числа выходов равны $n_0 = 1600, n_1 = 700, n_2 = 2000, n_3 = 700$. Имеем:

$$\frac{e_0}{n_0}, \frac{e_1}{n_1}, \frac{e_2}{n_2}, \frac{e_3}{n_3} = \frac{1500}{1600}, \frac{500}{700}, \frac{1400}{2000}, \frac{600}{700}.$$

Порядок следования n_i получается следующим: n_0, n_3, n_1, n_2 . Эта метка имеет долю 0.8, и наиболее близкая подходящая сумма есть $n_0 + n_3 + n_1 = 3000$, имеющая долю 0.6. Значит, выходы 00, 01, 11 надо соотносить с меткой 0, а 10 – с меткой 1. Хотя, конечно, с таким количеством пакетов в выборке лучше было бы увеличить количество признаков и, соответственно, кубитов на входе (расширяться квантовая сеть не может из-за запрета копирования).

В отличие от обычной нейронной сети и квантовой нейронной сети с оптимизацией, КНС без оптимизации можно обучать в прямом направлении, а не в обратном, т.е., одновременно с ее работой. Делать это можно по описанному выше сценарию, ведь для вычисления статистики по первому слою можно использовать ту же логику: делить выходы по меткам и продолжать это делать дальше, в следующих слоях. Качество классификации все равно будет улучшаться от слоя к слою.

ОБСУЖДЕНИЕ

КМО и КНС посвящено множество работ. В русскоязычной литературе можно указать уже упомянутую работу [1], в которой, в частности,

указывается важность «поиска модели КНС, оптимальной с точки зрения использования всех преимуществ, представляемых квантовыми вычислениями и нейронными сетями, а также алгоритмам машинного обучения». Один из последних обзоров в этих областях [39], в разделе Outlook, содержит следующий текст: «Первые преимущества в КМО появятся, скорее всего, в связи с выделением скрытых параметров из квантовых данных. Это может быть сделано для квантового детектирования или для классификации/регрессии квантовых состояний. Фундаментально, из теории оптимальных измерений, известно, что нелокальные квантовые измерения могут извлекать скрытые параметры, используя небольшое количество пакетов. С КМО можно формировать и осуществлять поиск по параметризации гипотез для таких измерений»¹⁵. Настоящее исследование представляет один из возможных путей для классификации квантовых состояний.

Рассмотренное в работе КМО имеет класс QC или QQ, т.е., использует квантовые данные на классических (эмулирующих) или квантовых устройствах. Предложенный q -нейрон идейно близок к известным концепциям (описанным в [6] и [39], в частности), но в то же время у него есть новая существенная особенность: он использует квантовую запутанность. В частности, q -нейрон может работать без обучения в обычном смысле: не нужна оптимизация и обратное распространение ошибки.

В качестве примера можно привести эксперимент с анализом датасета состояний студентов¹⁶. Для этого эксперимента использовался датасет без предварительной подготовки – весь препроцессинг отражен в скрипте анализа, доступном в архиве¹⁷. Датасет является размеченным с 34 колонками признаков и 4424 экземплярами данных. В эксперименте была использована двоичная метка: «Dropout» = 1, остальные значения (Enrolled, Graduate) = 0. Задача состоит в предсказании отчисления. Признаки были отображены в целочисленные интервалы, пространство признаков было трансформировано

¹⁵ В оригинале «The first quantum advantages in QML will likely arise from hidden parameter extraction from quantum data. This can be for quantum sensing or quantum state classification/regression. Fundamentally, we know from the theory of optimal measurement that non-local quantum measurements can extract hidden parameters using fewer samples. Using QML, one can form and search over a parameterization of hypotheses for such measurements».

¹⁶ <https://www.kaggle.com/datasets/thedevastator/higher-education-predictors-of-student-retention>. Дата обращения 09.01.2023. / Accessed January 09, 2023.

¹⁷ https://disk.yandex.ru/d/JK4dsbdGLP_ZaQ. Дата обращения 09.01.2023. / Accessed January 09, 2023.

Таблица 2. Эксперимент с датасетом студентов

Метод	Точность (Precision), %	Полнота (Recall), %	F1, %	Неклассифицированные состояния, %	Время обучения, мс	Время работы, мс
Классификация эмулированным квантовым запутанным базисом	39	100	57	40	2968	1901
Классификация линейным дискриминантным анализом	100	29	45	0	138	23

без потери информации к размерности 62. Это было сделано для того, чтобы использовать квантовую нейронную сеть из двух q -нейронов в первом слое и одного q -нейрона во втором слое. Обучение было произведено без оптимизации. Конфигурация сети выбрана такая: в первом слое первый q -нейрон с тремя входами, второй – с двумя входами. Во втором слое – единственный q -нейрон с двумя входами. Часть экземпляров данных нейронная сеть не смогла классифицировать, поскольку они были в приблизительно равной степени близки и к 1, и к 0 значениям метки. Сравнение результатов работы выполнено с классическим алгоритмом LDA, взятым из пакета scikit-learn языка Python. Результаты отражены в табл. 2.

Из эксперимента видно, что КНС не ставит метку 0 студенту, если он отчислится: false negatives равно 0. В то же время, доля false positives достаточно высока – больше половины меток отчисления (1) ложные. 40% данных квантовая нейронная сеть посчитала негодными для классификации. Конечно, эти результаты весьма отличаются от результатов классификатора LDA, причем не очевидно в какую (лучшую или худшую) сторону. Но, как можно заметить при этом, время обучения LDA превышает время работы в 6 раз, а у КНС – только в 1.5 раза.

Строгое рассмотрение работы КНС разных архитектур запланировано в следующих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено новое направление развития КМО, существенно использующее квантовую запутанность. Это позволяет строить такие интеллектуальные системы, которые работают на потоковых данных, учатся онлайн с учетом изменений среды данных, но не сводятся к обучению с подкреплением. Предложенный способ обучения является, своего рода, «обучением с подкреплением наоборот»: в обучении с подкреплением агент вычисляет качество классификации, а среда остается внешним фактором, тогда как в предложенном подходе среда является носителем классификационных паттернов, и они восстанавливаются прямо из нее.

Такие системы могут быть применены в системах управления беспилотными транспортными средствами любого вида, а также в охранных системах и интеллектуальных бизнес-ассистентах. При этом применение квантовых вычислителей не является обязательным.

Благодарности

Работа выполнена с частичной поддержкой Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-09056).

Acknowledgments

This study was supported partially by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-29-09056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сигов А.С., Андрианова Е.Г., Жуков Д.О., Зыков С.В., Тарасов И.Е. Квантовая информатика: обзор основных достижений. *Russian Technological Journal*. 2019;7(1):5–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-5-37>
[Sigov A.S., Andrianova E.G., Zhukov D.O., Zykov S.V., Tarasov I.E. Quantum informatics: overview of the main achievements. *Russian Technological Journal*. 2019;7(1):5–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-5-37>]
2. Zeguendry A., Jarir Z., Quafafou M. Quantum Machine Learning: A Review and Case Studies. *Entropy*. 2023;25(2):287. <https://doi.org/10.3390/e25020287>
3. Tacchino F., Macchiavello C., Gerace D., et al. An artificial neuron implemented on an actual quantum processor. *npj Quantum Inf.* 2019;5(1):26. <https://doi.org/10.1038/s41534-019-0140-4>
4. DiVincenzo D.P. The Physical Implementation of Quantum Computation. *Fortschritte der Physik*. 2000;48(9–11):771–783. [https://doi.org/10.1002/1521-3978\(200009\)48:9/11%3C771::AID-PROP771%3E3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1521-3978(200009)48:9/11%3C771::AID-PROP771%3E3.0.CO;2-E)
5. Menneer T., Narayanan A. Quantum-inspired neural networks. In: *Proceedings of the Neural Information Processing Systems 95*. Denver, CO, USA, 27–30 November 1995. URL: https://www.researchgate.net/publication/2267350_Quantum-inspired_Neural_Networks

6. Гушанский С.М., Буглов В.Е. Квантовое глубокое обучение сверточной нейронной сети с использованием вариационной квантовой схемы. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2021;7(224):167–174. [Gushanskiy S.M., Buglov V.E. Quantum deep learning of convolutional neural network using variational quantum circuit. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2021;7(224):167–174 (in Russ.).]
7. Cong I., Choi S., Lukin M.D. Quantum convolutional neural networks. *Nat. Phys.* 2019;15(12):1273–1278. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0648-8>
8. Kerenidis I., Landman J., Prakash A. *Quantum algorithms for deep convolutional neural networks*. arXiv:1911.01117. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.01117>
9. Henderson M., Shakya S., Pradhan S., Cook T. Quantum convolutional neural networks: Powering image recognition with quantum circuits. *Quantum Mach. Intell.* 2020;2(1):2. <https://doi.org/10.1007/s42484-020-00012-y>
10. Rebentrost P., Mohseni M., Lloyd S. Quantum Support Vector Machine for Big Data Classification. *Phys. Rev. Lett.* 2014;113(13):130503. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.113.130503>
11. Harrow A.W., Hassidim A., Lloyd S. Quantum Algorithm for Linear Systems of Equations. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103(15):150502. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.103.150502>
12. Dang Y., Jiang N., Hu H., Ji Z., Zhang W. Image classification based on quantum K-Nearest-Neighbor algorithm. *Quantum Inf. Process.* 2018;17(9):239. <https://doi.org/10.1007/s11128-018-2004-9>
13. Schuld M., Sinayskiy I., Petruccione F. Prediction by linear regression on a quantum computer. *Phys. Rev. A.* 2016;94(2):022342. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.022342>
14. Lu S., Braunstein S.L. Quantum decision tree classifier. *Quantum Inf. Process.* 2014;13(3):757–770. <https://doi.org/10.1007/s11128-013-0687-5>
15. Lloyd S., Mohseni M., Rebentrost P. *Quantum algorithms for supervised and unsupervised machine learning*. arXiv:1307.0411. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1307.0411>
16. Lloyd S. Least squares quantization in PCM. *IEEE Trans. Inf. Theory* 1982;28(2):129–137. <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>
17. Kerenidis I., Landman J., Luongo A., Prakash A. *q-means: A quantum algorithm for unsupervised machine learning*. arXiv: 1812.03584. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.03584>
18. Aïmeur E., Brassard G., Gambs S. Quantum speed-up for unsupervised learning. *Mach. Learn.* 2013;90(2):261–287. <https://doi.org/10.1007/s10994-012-5316-5>
19. Lloyd S., Mohseni M., Rebentrost P. Quantum principal component analysis. *Nat. Phys.* 2014;10(9):631–633. <https://doi.org/10.1038/nphys3029>
20. Dong D., Chen C., Li H., Tarn T.-J. Quantum Reinforcement Learning. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B (Cybern.)* 2008;38(5):1207–1220. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2008.925743>
21. Lloyd S., Weedbrook C. Quantum Generative Adversarial Learning. *Phys. Rev. Lett.* 2018;121(4):040502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.040502>
22. Dallaire-Demers P.-L., Killoran N. Quantum generative adversarial networks. *Phys. Rev. A.* 2018;98(1):012324. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.012324>
23. Situ H., He Z., Wang Y., Li L., Zheng S. Quantum generative adversarial network for generating discrete distribution. *Inf. Sci.* 2020;538:193–208. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.05.127>
24. Huang H.-L., Du Y., Gong M., Zhao Y., et al. Experimental Quantum Generative Adversarial Networks for Image Generation. *Phys. Rev. Appl.* 2021;16(2):024051. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.024051>
25. Chakrabarti S., Yiming H., Li T., Feizi S., Wu X. *Quantum Wasserstein generative adversarial networks*. arXiv:1911.00111. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.00111>
26. Kieferová M., Wiebe N. Tomography and generative training with quantum Boltzmann machines. *Phys. Rev. A.* 2017;96(6):062327. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.062327>
27. Amin M.H., Andriyash E., Rolfe J., Kulchytskyy B., Melko R. Quantum Boltzmann Machine. *Phys. Rev. X.* 2018;892:021050. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.021050>
28. Romero J., Olson J.P., Aspuru-Guzik A. Quantum autoencoders for efficient compression of quantum data. *Quantum Sci. Technol.* 2017;2(4):045001. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/aa8072>
29. Khoshaman A., Vinci W., Denis B., Andriyash E., Sadeghi H., Amin M.H. Quantum variational autoencoder. *Quantum Sci. Technol.* 2018;4(1):014001. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/aadaf1>
30. Jiang Z., Rieffel E.G., Wang Z. Near-optimal quantum circuit for Grover's unstructured search using a transverse field. *Phys. Rev. A.* 2017;95(6):062317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.062317>
31. Farhi E., Goldstone J., Gutmann S. *A quantum approximate optimization algorithm*. arXiv:1411.4028. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1411.4028>
32. Kerenidis I., Prakash A. Quantum gradient descent for linear systems and least squares. *Phys. Rev. A.* 2020;101(2):022316. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.022316>
33. Simões R.D.M., Huber P., Meier N., Smailov N., Fuchsli R.M., Stockinger K. Experimental Evaluation of Quantum Machine Learning Algorithms. *IEEE Access.* 2023;11:6197–6208. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3236409>
34. Shao Yu., Witarasyah D. Fast recognition method of moving video images based on BP neural networks. *Open Physics.* 2018;16(1):1024–1032. <https://doi.org/10.1515/phys-2018-0123>
35. Nielsen M.A., Chuang I.L. *Quantum Computation and Quantum Information*. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2010. 866 p. ISBN 978-1-107-00217-3
36. Samuel A.L. Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. *IBM J. Res. Develop.* 1959;44(1–2):207–226. (Reprinted from *IBM J. Res. Develop.* 1959;3(3):210–229. <https://doi.org/10.1147/rd.33.0210>)
37. Maheshwari D., Sierra-Sosa D., Garcia-Zapirain B., Variational Quantum Classifier for Binary Classification: Real vs Synthetic Dataset. *IEEE Access.* 2022;10:3705–3715. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3139323>

38. Zuev S., Kabalyants P., Polyakov V., Chernikov S. Fractal Neural Networks. In: *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICECET52533.2021.9698649>
39. Cerezo M., Verdon G., Huang H.Y., et al. Challenges and opportunities in quantum machine learning. *Nat. Comput. Sci.* 2022;2(9):567–576. <https://doi.org/10.1038/s43588-022-00311-3>

Об авторе

Зуев Сергей Валентинович, к.ф.-м.н., доцент, кафедра компьютерной инженерии и моделирования Физико-технического института ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского» (295007, Россия, Республика Крым, Симферополь, пр-т Вернадского, д. 4). E-mail: zuevsv@cfuv.ru. Scopus Author ID 57292501000, ResearcherID U-1055-2017, <https://orcid.org/0000-0003-4237-0491>

About the author

Sergei V. Zuev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Computer Engineering and Modelling, Institute of Physics and Technologies, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (4, Vernadskogo pr., Simferopol, 295007 Republic of Crimea, Russia). E-mail: zuevsv@cfuv.ru. Scopus Author ID 57292501000, ResearcherID U-1055-2017, <https://orcid.org/0000-0003-4237-0491>

УДК 658.5.012.14 + 621.37
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование профилограммной структуры микрополосковых СВЧ-модулей, изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати

Д.С. Воруничев[@],
М.С. Костин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Целью работы является исследование шероховатости поверхности токонесущей топологии и диэлектрика верхней (Top Layer) и нижней (Bottom Layer) сторон СВЧ-модулей, изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати при прототипировании опытных образцов СВЧ-модулей на 3D-принтере многослойных печатных плат DragonFly 2020 LDM.

Методы. Используются методы металлографического анализа в светлом и темном поле, профилографирование шероховатости поверхностей, компьютерное моделирование.

Результаты. Получены экспериментальные образцы микрополосковых СВЧ-элементов модулей многослойных плат заданной конфигурации, датчиков телеметрии, РСВ-антенн (антенн на печатных платах). Исследованы топологические и радиофизические особенности аддитивно сформированных верхнего и нижнего поверхностных слоев экспериментальных образцов плат полосковых модулей. Проведены оптические профилограммные измерения шероховатости наружных сторон платы по 10 точкам, которые составили для верхнего слоя топологии – 2 мкм, для нижнего – 0.3 мкм, а также определен средний размер зерна диэлектрической основы – 0.007 мм². Показано, что шероховатость токопроводящей топологии и диэлектрика верхней стороны соответствует 6–7 классам точности. При этом шероховатость микрополосковой токопроводящей топологии и диэлектрика нижней стороны платы соответствует 10–12 классам точности.

Выводы. Установлено, что неравномерное формирование нижнего и верхнего полосковых слоев печатного модуля способно оказывать влияние на неоднородность распределения радиофизических параметров (диэлектрическую проницаемость, поверхностную проводимость и т.д.), а также на нестабильность конструктивных характеристик (адгезионной способности, теплопроводности и т.д.) полоскового модуля, что необходимо учитывать при прототипировании устройств по технологии струйной 3D-печати, в т.ч. при адаптации Gerber-проектов РСВ-модулей, созданных под технологию классического производства плат.

Ключевые слова: 3D-печать, СВЧ-модуль, прототипирование, аддитивная технология, наночернила, микрополосковые датчики, СВЧ-элементы, многослойные печатные платы, радиофизические параметры, структурная неоднородность

• Поступила: 08.02.2023 • Доработана: 20.04.2023 • Принята к опубликованию: 10.07.2023

Для цитирования: Воруничев Д.С., Костин М.С. Исследование профилограммной структуры микрополосковых СВЧ-модулей, изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):34–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Investigation of the profilogram structure of microstrip microwave modules manufactured using additive 3D-printing technology

Dmitry S. Vorunichev @,
Mikhail S. Kostin

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

Abstract

Objectives. The aim of the work is to study the surface roughness of the current-carrying topology and dielectric of the upper (Top Layer) and lower (Bottom Layer) sides of microwave modules manufactured using additive three-dimensional printing technology when prototyping prototypes of microwave modules on a 3D printer of DragonFly 2020 LDM multilayer printed circuit boards.

Methods. Methods of metallographic analysis in bright and dark fields, surface roughness profiling, and computer modeling were used.

Results. Experimental samples of microstrip microwave elements of modules of multilayer boards of a given configuration, telemetry sensors, printed circuit board (PCB) antennas were obtained. The topological and radiophysical features of the additively formed upper and lower surface layers of experimental samples of boards of strip modules were studied. Optical profilogram measurements of the roughness of the outer sides of the board were carried out at 10 points, amounting to 2 μm for the upper layer of the topology and 0.3 μm for the lower layer; the average grain size of the dielectric base was determined at 0.007 mm². The roughness of the conductive topology and upper side dielectric was shown to correspond to an accuracy class of 6–7, while the roughness of the microstrip conductive topology and the dielectric of the lower side of the board corresponds to an accuracy class of 10–12.

Conclusions. It is established that an uneven formation of the lower and upper strip layers of the printed module can affect the inhomogeneity of the distribution of radiophysical parameters (dielectric permittivity, surface conductivity, etc.), as well as the instability of the structural (adhesion ability, thermal conductivity, etc.) characteristics of the strip module, which must be taken into account when prototyping devices using inkjet 3D printing technology, including when adapting Gerber projects of PCB modules created for classical board production technology.

Keywords: 3D printing, microwave module, prototyping, additive technology, nanoink, microstrip sensors, microwave elements, multilayer printed circuit boards, radiophysical parameters, structural heterogeneity

• Submitted: 08.02.2023 • Revised: 20.04.2023 • Accepted: 10.07.2023

For citation: Vorunichev D.S., Kostin M.S. Investigation of the profilogram structure of microstrip microwave modules manufactured using additive 3D-printing technology. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):34–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии 3D-печати однородными материалами находят конструктивное применение в различных отраслях науки и техники, связанных с производством и прототипированием ряда промышленных изделий. Так, высокоточная печать полимерами или порошковыми металлами в прототипировании корпусов, деталей и сборочных единиц радиоэлектронных изделий применяется уже более 15 лет. Это позволяет сократить время на дополнительную проработку и стендовые испытания опытной разработки, запускаемой в серию. Технологии трехмерной печати в достаточной мере известны, исследованы и системно отработаны – сегодня на индустриальном рынке представлен широкий ряд технологического оборудования и композитов от различных компаний и производителей [1]. При этом в радиоэлектронном секторе промышленные технологии печатной электроники появились только в 2019 г. Это обусловлено тем, что для решения технологических задач аддитивной печати требуются специальные материалы, состоящие из раствора наночастиц в дисперсионной среде – наночернила [2]. Кроме того, важно отметить, что аддитивное решение двухкомпонентной печати требует комбинированного применения наночернил (проводящих и диэлектрических), обладающих совместимыми радиофизическими свойствами, обеспечивающими печать с необходимой разрешающей способностью и равномерностью распределения заданных параметров в многослойной структуре печатного модуля. Успешная разработка и создание подходящих по характеристикам наночернил с низкой температурой спекания открыло в радиоэлектронной отрасли новое направление аддитивной печатной электроники [2–6]. Сегодня печатная электроника решает задачи прототипирования, в т.ч. в области СВЧ-техники, и стремительно развивается, формируя новый контент быстрых производственно-технологических решений. Появилась возможность печатать прототипы устройств на многослойных печатных платах с заданной конфигурацией непосредственно в дизайн-центрах, не передавая разработку на изготовление третьей стороне – контрактному производству. Данный формат позволяет сократить сроки, требуемые на прототипирование и отладку

новой разработки, поскольку изготовление многослойной печатной платы на контрактном производстве занимает до нескольких недель. Как правило, за это время появляется новая доработанная версия изделия, что требует повторения цикла. При этом циклы отладки изделия до выпуска финальной схемотехники и компоновки устройства могут повторяться несколько раз. В то же время печать производственных файлов прототипа непосредственно в дизайн-центре на 3D-принтере занимает всего несколько часов, после чего прототип может быть собран и проверен на работоспособность с последующим внесением всех необходимых изменений для повторения цикла. Текущие возможности печатной электроники постоянно расширяются благодаря постоянным исследованиям и инновациям в данной области. Технология печатной СВЧ-электроники дает существенно большую гибкость решений конструктору, например, позволяя выполнять на плате печатные элементы: конденсаторы, трансформаторы, антенны, RFID-метки¹ и т.д. на различных типах подложек, в т.ч. гибких с точностью до нескольких микрон [7, 8]. Еще одно преимущество аддитивной 3D-технологии – сохранение оригинальной разработки изделия и интеллектуальной собственности внутри компании до начала его серийного изготовления на производственно-технологическом уровне защиты разработки от реинжиниринга^{2, 3} [9].

Целью данной работы является экспериментальное исследование штатных режимов аддитивной технологии трехмерной печати изделий и элементов микрополосковой (МПП) СВЧ-электроники, реализуемой на базе уникального для отечественной радиоэлектроники 3D-принтера DragonFly (производитель – Nano Dimension, Израиль), позволяющих

¹ RFID – Radio Frequency IDentification.

² Хесин С. 3D-принтер DragonFly – революция в изготовлении многослойных печатных плат. *Вектор высоких технологий.* 2018;4(39):38–41. [Khesin S. The DragonFly 3D printer is a revolution in the manufacture of multilayer printed circuit boards. *Vektor Vysokikh Tekhnologii = The Hi-Tech Vector Research and Practice Journal.* 2018;4(39):38–41 (in Russ.).]. <https://ostec-group.ru/upload/iblock/3fd/hesin.pdf>. Дата обращения 08.02.2023. / Available February 08, 2023.

³ DragonFly LDM. Inks User Guide NanoDimension. Ness Ziona: Nano Dimension Technologies Ltd. 2020. 52 p. <https://www.nano-di.com/ame-dragonfly-ldm-2-0>. Дата обращения 08.02.2023. / Available February 08, 2023.

Таблица 1. Технологические возможности печати 3D-принтера DragonFly LDM 2020

Технологический параметр	Значение/характеристика параметра
Проводник/зазор	100 мкм
Минимальная толщина слоя	17 мкм
Диаметр капли диэлектрика	3 мкм
Диаметр капли токопроводящих чернил	0.4 мкм
Количество слоев	до 55
Минимальный диаметр металлизированных сквозных отверстий	400 мкм
Минимальный диаметр неметаллизированных сквозных отверстий	400 мкм
Минимальный диаметр переходных отверстий	<200 мкм
Максимальные размеры платы	160 × 160 × 3 мм
Время печати платы	от 3 до 20 ч
Максимальная температура пайки	165 °C
Проводящие чернила	AgCite 90072 Silver Nanoparticle Conductive Ink (производитель – Nano Dimension, Израиль)
Диэлектрические чернила	Dielectric Ink 1092 – Dielectric UV Curable Acrylates Ink (производитель – Nano Dimension, Израиль)

достигнуть наилучших результатов по однородности формирования проводящих и диэлектрических слоев, а также шероховатости поверхности топологии многослойных печатных плат СВЧ-модулей, влияющих на характер стабильности радиофизических параметров изделия.

1. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ НА 3D-ПРИНТЕРЕ DRAGONFLY

Исследование выполнено с применением 3D-принтера DragonFly LDM 2020, действующего в мегалабораторном кластере «Радиоэлектронные технологии» Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА. Это оборудование по своей сути является минифабом (минифабрикой) (рис. 1), представляющим собой автоматизированную систему полного цикла изготовления электронных устройств аддитивным методом двухкомпонентной струйной печати. Печать осуществляется двумя струйными чернильными головками (токопроводящей и диэлектрической) с последующим послойным отверждением: инфракрасным для токопроводящих чернил и УФ-системой для диэлектрических чернил. Количество опробованных в лабораторных условиях слоев печатной платы – до 55 (при этом фактическое технологическое ограничение – в пределах рабочей области печати внутри машинного отделения системы). Основные характеристики и технологические нормы печати радиоэлектроники на 3D-принтере DragonFly LDM 2020, а также применяемые проводящие и диэлектрические чернила, приведены в табл. 1.

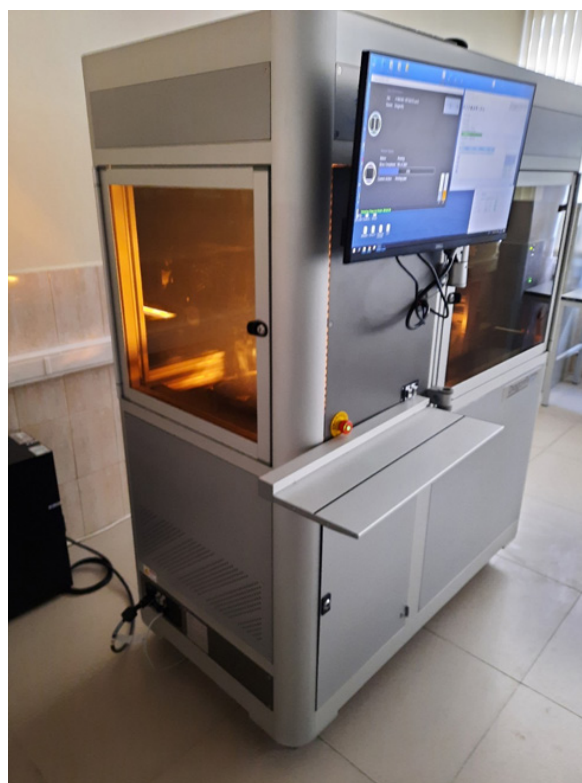


Рис. 1. 3D-принтер DragonFly LDM 2020, действующий в мегалабораторном кластере «Радиоэлектронные технологии» Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА

Опытные образцы распечатанных плат с топологией СВЧ-элементов для исследования структуры поверхностей наружных сторон (слоев), выполненных по технологии печатной радиоэлектроники, представлены на рис. 2 и на рис. 3.

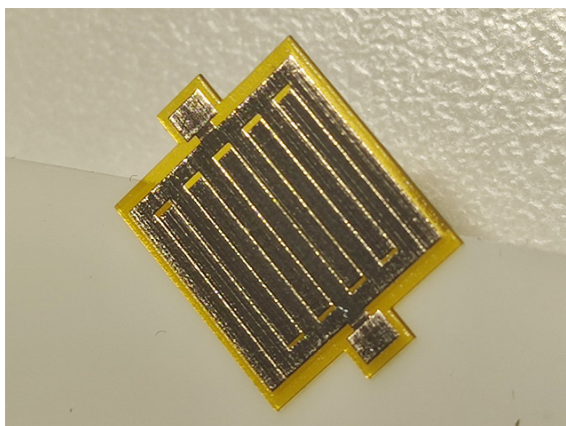


Рис. 2. Печатный СВЧ-датчик, изготовленный РТУ МИРЭА в интересах проектного исследования для АО «Технопарк Санкт-Петербурга»

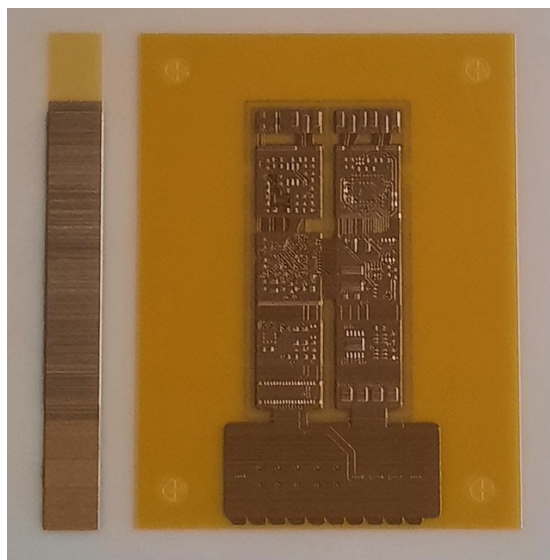


Рис. 3. Печатный СВЧ-модуль четырехслойной платы глобальной навигационной спутниковой системы, изготовленный РТУ МИРЭА в интересах НПК «Технологический центр» (общая толщина печатного модуля – 0.123 мм)

В процессе технологического цикла аддитивной 3D-печати многослойной платы МПЛ СВЧ-модуля установлено, что верхний его слой (сторона Top Layer) и нижний (сторона Bottom Layer) формируются при различных условиях среды (контактного/неконтактного положения формирования топологии образца). Из-за этого стороны имеют отличающуюся на порядок шероховатость поверхностей, в отличие от традиционной технологии изготовления многослойных печатных плат с одинаковыми по структуре медными трассами и диэлектриком на обоих наружных слоях. Данное обстоятельство может влиять на конструкционные характеристики платы (адгезию проводящего слоя с диэлектриком, газоадсорбцию, остаточную механическую напряженность, теплофизические свойства, смешиваемость припоя на адгезионном проводящем слое и т.д.) и неравномерность распределения ее радиофизических параметров (поверхностного сопротивления, диэлектрической проницаемости, импедансной неоднородности, сигнальной задержки и т.д.), что необходимо учитывать при прототипировании СВЧ-модулей, реализуемых по технологии аддитивной печатной электроники.

Шероховатость поверхности, определяющую однородность структуры проводящего слоя, принято оценивать по неровностям профиля (рис. 4), который получают путем сечения реальной поверхности плоскостью [5].

Из оцениваемых параметров профилограммной характеристики шероховатости платы определяются следующие:

1. Среднее отклонение профиля R_{av}

$$R_{av} = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad (1)$$

где l – базовая длина, y – отклонение профиля, x – горизонтальная координата.

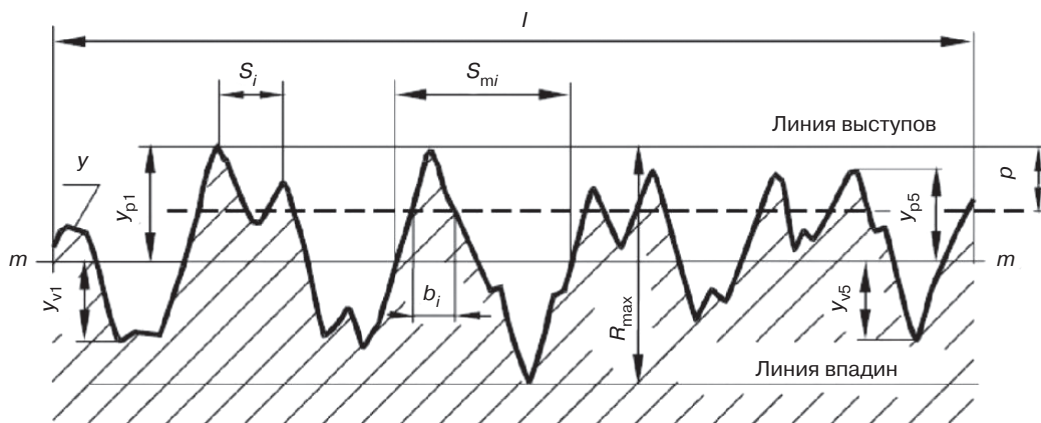


Рис. 4. Профилограммные характеристики шероховатости платы

При дискретном способе обработки профилограммы параметр R_{av} рассчитывают по формуле:

$$R_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (2)$$

где y_i – измеренные отклонения профиля в дискретных точках, n – число измеренных дискретных отклонений на базовой длине.

2. Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z .

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}, \quad (3)$$

где y_{pi} – высота i -го наибольшего выступа профиля, y_{vi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля.

3. Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} .

4. Средний шаг неровностей профиля S_m .

5. Средний шаг местных выступов S .

6. Относительная опорная длина профиля t_p (где p – значения уровня сечения профиля), определяемая по формуле:

$$t_p = \frac{1}{l} \left(\sum_{i=1}^n b_i \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^n b_i$ – опорная длина профиля, b_i – составляющие опорной длины.

В совокупности расчетные формулы (1)–(4) позволяют далее оценить профилограммные характеристики МПЛ структуры СВЧ-модуля.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛОГРАММНОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАРУЖНЫХ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ СВЧ-МОДУЛЕЙ

Верхняя сторона (Top Layer) многослойной печатной платы СВЧ-модуля формируется аддитивным методом печати на предыдущий слой. Наружный слой печатается наночернилами и отверждается, контактируя с воздушной средой. При таком технологическом режиме верхний слой имеет значительно более высокую шероховатость поверхности и зернистость, чем нижний. На рис. 5 показана двумерная микровизионная профилограмма верхнего слоя опытного образца напечатанной платы СВЧ-модуля (рис. 3) с измерением величины зерна диэлектрического слоя.

Исследования структуры поверхности и измерения проводились по методу работы в темном поле на микровизоре $\mu Vizo-MET-221$ (производитель – ЛОМО, Россия). Как видно из микровизионного снимка фрагмента, площадь зерна диэлектрической части составляет в среднем 0.007 мм^2 и более, что достаточно много и обусловлено печатью слоя наночастицами с дальнейшим их спеканием системой отверждения. По полученной оптическим методом с микровизора

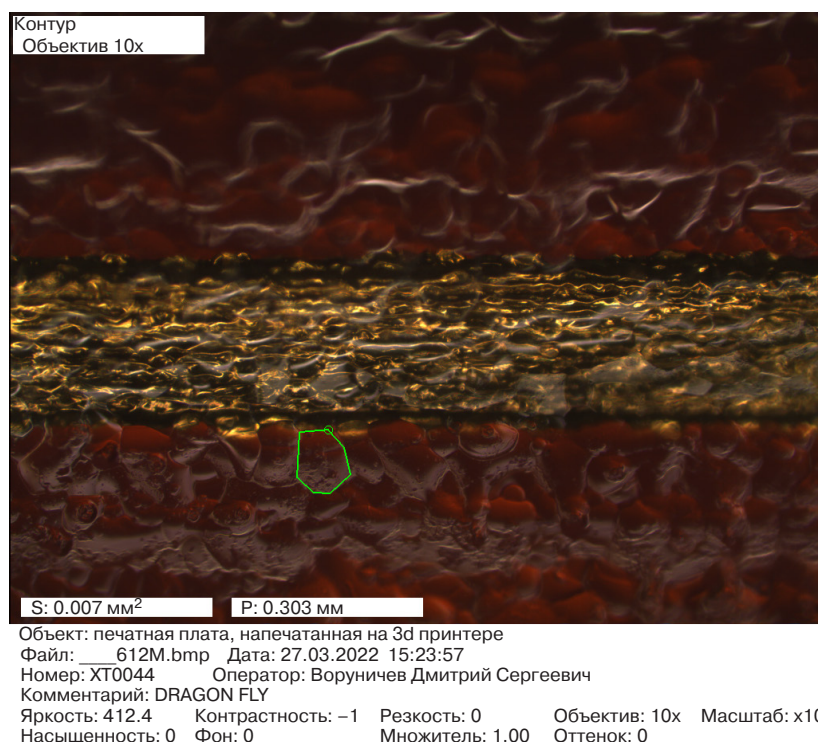


Рис. 5. Фрагмент печатной платы опытного образца СВЧ-модуля с наложенным измерением величины зерна диэлектрика (в центре – проводник, напечатанный проводящими чернилами, остальное – диэлектрическая часть, напечатанная диэлектрическими чернилами)

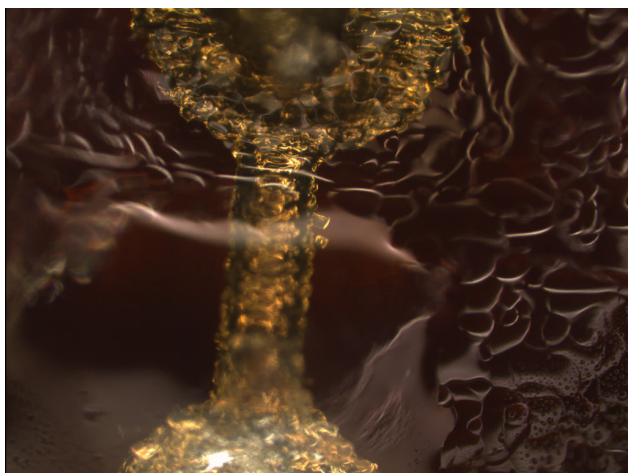


Рис. 6. Профилограмма верхней стороны распечатанной платы образца СВЧ-модуля

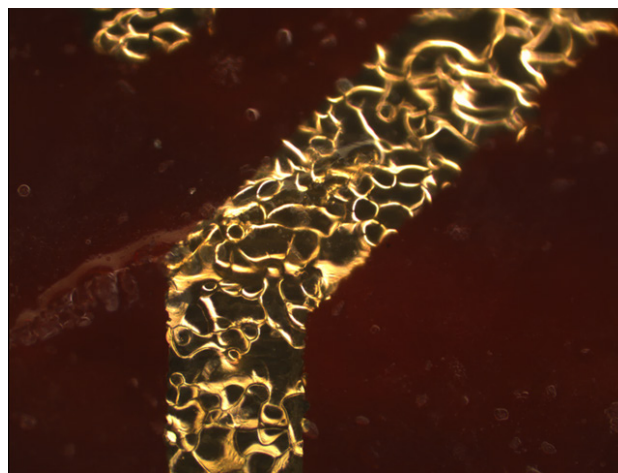


Рис. 7. Профилограмма нижней стороны распечатанной платы образца СВЧ-модуля

двумерной профилограмме путем изменения резкости между выступом и впадиной проведены измерения шероховатости поверхности, где фокальная разница между резкостью есть глубина измеряемой канавки. Измерения проводились по десяти точкам фрагмента верхней стороны многослойной печатной платы, представленного на профилограмме (рис. 6). Измеренная шероховатость верхней стороны – 2 мкм.

Нижняя сторона (Bottom Layer) формируется аддитивным методом на гладкой односторонней майларовой подложке, помещенной на вакуумный столик. К нижней стороне при печати будут добавляться остальные слои, но непосредственно только нижняя сторона физически печатается на гладкой подложке, что снижает шероховатость на порядок по сравнению с верхним слоем. Проведены измерения в десяти точках шероховатости нижней стороны по аналогичной методике, профилограмма приведена на рис. 7. Измеренная шероховатость нижней стороны – 0.3 мкм.

С использованием программного профилографа (производитель – Mitutoyo, Япония) были построены профилограммы верхней и нижней сторон многослойной платы образца СВЧ-модуля для проводящих и диэлектрических конструктивных слоев. Результаты фрагментарных измерений профилограмм МПЛ проводящей топологии и диэлектрического основания экспериментальных образцов приведены в табл. 2.

Результаты измерений профилографом соответствуют оптическим измерениям микровизором и составили:

- слой Top Layer: шероховатость элемента МПЛ (проводящего слоя печатной топологии) $R_{av} = 1.6\text{--}2.1$ (6–7 класс), шероховатость диэлектрика $R_{av} = 1.7\text{--}1.8$ (6–7 классы);
- слой Bottom Layer: шероховатость элемента МПЛ (проводящего слоя печатной топологии) $R_{av} = 0.04\text{--}0.12$ (10–12 класс), шероховатость диэлектрика $R_{av} = 0.03\text{--}0.08$ (11–12 классы).

Важно отметить, что неравномерное профилограммное формирование нижнего и верхнего полостных слоев СВЧ-модуля, выполненного по аддитивной технологии, определяет регулярность внутренней структуры материалов и способно оказывать влияние на неоднородность распределения радиофизических параметров (диэлектрическую проницаемость, поверхностную проводимость, импедансную характеристику МПЛ, сигнальную задержку и т.д.)⁴ [9–14], а также на стабильность конструктивных характеристик полостного модуля (адгезии проводящего слоя с диэлектриком, газодсорбции, остаточной механической напряженности, теплофизических свойств, смешиваемости припоя на адгезионном проводящем слое и т.д.). Это необходимо учитывать при прототипировании устройств по аддитивной технологии 3D-печати, в т.ч. при адаптации Gerber-проектов⁵ РСВ-модулей, созданных под технологию классического производства плат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе 3D-принтера DragonFly LDM 2020 исследованы топологические и радиофизические особенности аддитивно сформированных верхнего и нижнего поверхностных слоев экспериментальных образцов плат полостных модулей. Проведены оптические профилограммные измерения шероховатости наружных сторон платы в темном поле на металлографическом микровизоре $\mu\text{Vizo-MET-221}$, а также профилографом с построением соответствующих характеристик.

⁴ DragonFly LDM. Inks User Guide NanoDimension. Ness Ziona: Nano Dimension Technologies Ltd. 2020. 52 p. <https://www.nano-di.com/ame-dragonfly-ldm-2-0>. Дата обращения 08.02.2023. / Available February 08, 2023.

⁵ Файлы Gerber-формата для производства РСВ-модулей. [Gerber-format files for PCB modules production.]

Таблица 2. Профилограммные характеристики элементов печатной топологии (фрагментов) многослойной напечатанной платы опытного образца СВЧ-модуля

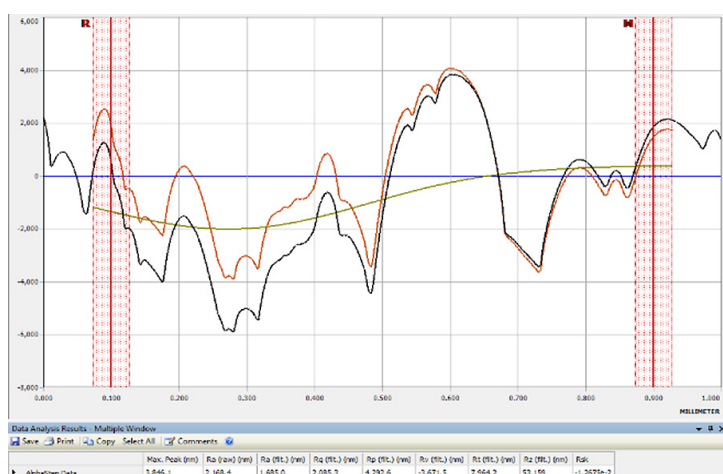
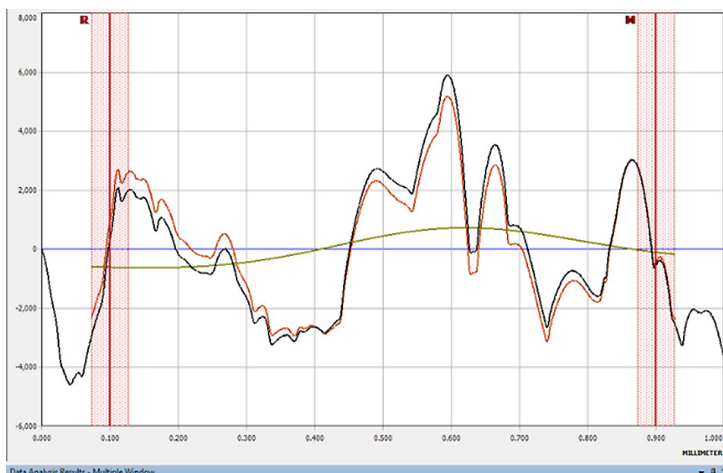
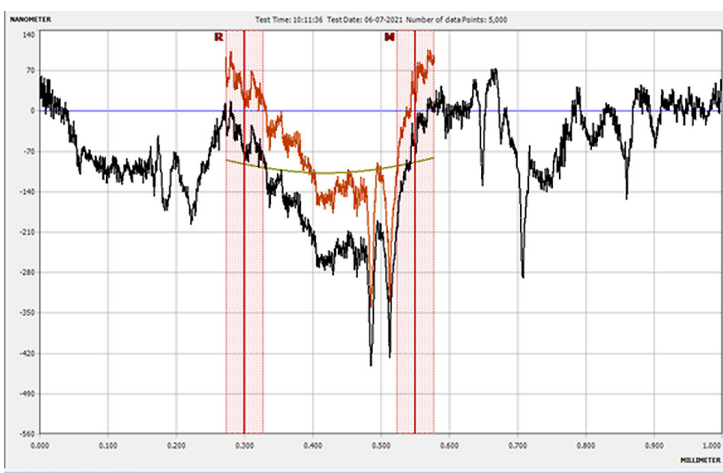
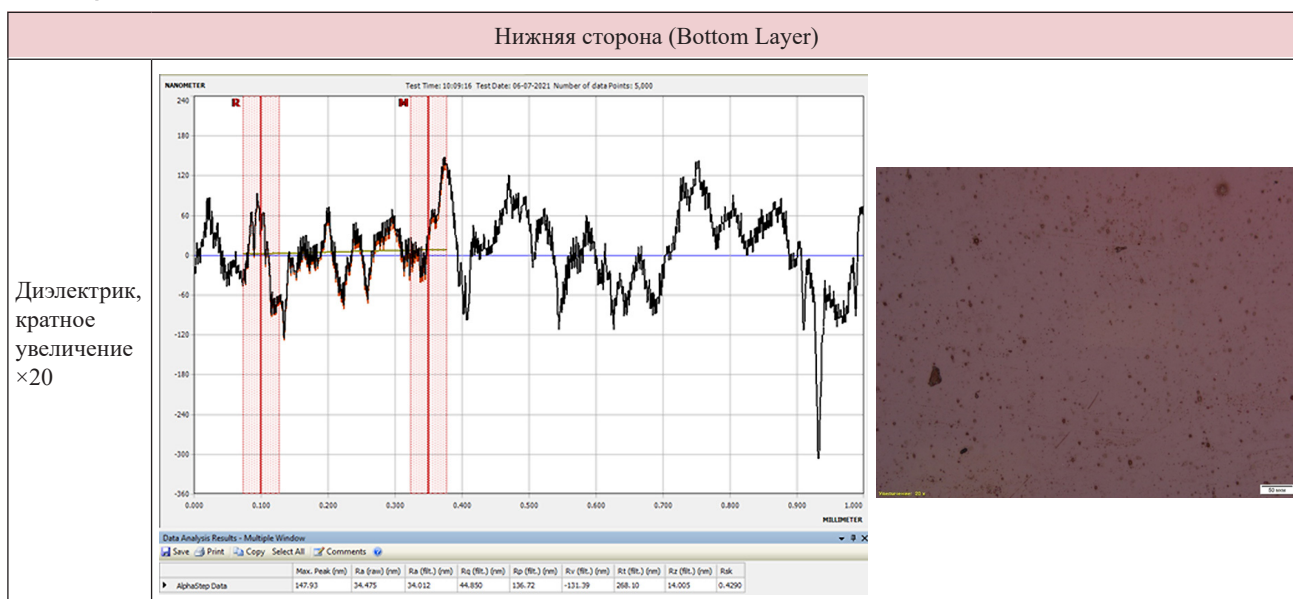
Верхняя сторона (Top Layer)	
Элемент МПЛ, кратное увеличение $\times 5$	
Диэлектрик, кратное увеличение $\times 5$	
Нижняя сторона (Bottom Layer)	
Элемент МПЛ, кратное увеличение $\times 20$	

Таблица 2. Окончание



Проведенное исследование опытных образцов показало существенную разницу шероховатости поверхностей: верхняя сторона – 2 мкм, нижняя сторона – 0.3 мкм при микровизионных измерениях и верхняя сторона – 1.8 мкм, нижняя сторона – 0.1 мкм при измерениях профилографом. Данный параметр может оказывать влияние на конструкционные, технологические и электрические характеристики изделия. Определен средний размер зерна диэлектрической части – 0.007 мм², а также причины разницы в шероховатости сторон.

Результаты проведенного исследования шероховатости сторон и профилограмм многослойной печатной платы могут быть использованы при проектировании МПЛ изделий, изготавливаемых методом печатной электроники, а также для разработки решений по совершенствованию технологии в целях сопоставления характеристик векторного анализа структурной неоднородности топологии опытных образцов СВЧ-модулей.

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

- Харалгин С.В., Куликов Г.В., Котельников А.Б., Снастин М.В., Добычина Е.М. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии аддитивной 3D-печати. *Russ. Technol. J.* 2019;7(1):80–101. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101>
- Sokol D., Yamada M., Nulman J. Design and Performance of Additively Manufactured In-Circuit Board Planar Capacitors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021;68(11): 5747–5752. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3117934>
- Li M., Yang Y., Nulman J., Yamada M., Iacopi F. Unique multi-level metal layer electronics solutions offered by advanced 3D printing. In: *2022 6th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)*. 2022. P. 144–144. <https://doi.org/10.1109/EDTM53872.2022.9798133>
- de Marzo G., Mastronardi V.M., Algieri L., et al. Sustainable, Flexible, and Biocompatible Enhanced Piezoelectric Chitosan Thin Film for Compliant Piezosensors for Human Health. *Advanced Electronic Materials*. 2022. <https://doi.org/10.1002/aelm.202200069>

REFERENCES

- Kharalgin S.V., Kulikov G.V., Kotelnikov A.B., Snastin M.V., Dobychina E.M. Prototyping of microwave devices with specified electrodynamic characteristics using additive 3D printing technology. *Russ. Technol. J.* 2019;7(1):80–101 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101>
- Sokol D., Yamada M., Nulman J. Design and Performance of Additively Manufactured In-Circuit Board Planar Capacitors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021;68(11): 5747–5752. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3117934>
- Li M., Yang Y., Nulman J., Yamada M., Iacopi F. Unique multi-level metal layer electronics solutions offered by advanced 3D printing. In: *2022 6th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)*. 2022. P. 144–144. <https://doi.org/10.1109/EDTM53872.2022.9798133>
- de Marzo G., Mastronardi V.M., Algieri L., et al. Sustainable, Flexible, and Biocompatible Enhanced Piezoelectric Chitosan Thin Film for Compliant Piezosensors for Human Health. *Advanced Electronic Materials*. 2022. <https://doi.org/10.1002/aelm.202200069>

5. Wu S.-Y., Yang C., Hsu W., Lin L. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors. *Microsyst. Nanoeng.* 2015;1(1):15013. <https://doi.org/10.1038/micronano.2015.13>
6. Li M., Yang Y., Iacopi F., Yamada M., Nulman J., et al. Compact multilayer bandpass filter using low-temperature additively manufacturing solution. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2021;68(7):3163–3169. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3072926>
7. Li Y., Ge L., Wang J., et al. A Ka-band 3-D-printed wideband stepped waveguide fed magnetoelectric dipole antenna array. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2020;68(4): 2724–2735. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2950868>
8. Корнилов Д.Ю., Ткачев С.В., Зайцев Е.В., Ким В.П., Кушнир А.Е. Принтерные технологии в электронике. Материалы и устройства для печати – первый российский семинар (Москва, 15.12.2017). *РЭНСИТ.* 2017;9(2):181–204.
9. Воруничев Д.С., Воруничева К.Ю. Текущие возможности технологии прототипирования многослойных печатных плат на 3D-принтере. *Russ. Technol. J.* 2021;9(4): 28–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-28-37>
10. Huang G.-L., Han C.-Z., Xu W., Yuan T., Zhang X. A compact 16-way high-power combiner implemented via 3-D metal printing technique for advanced radio-frequency electronics system applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019;66(6):4767–4776. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2863219>
11. Vorunichev D.S. Application of Additive Technology for 3D Printing of Electronic Devices as a Way to Reduce Prototyping Time. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS).* 2021. P. 480–483. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642806>
12. Vorunichev D.S. Prototyping Electronic Devices on a Dragonfly 3D Printer as a Means of Preserving Original Developments inside the Design Center. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS).* 2021. P. 472–475. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642911>
13. Костин М.С., Ярлыков А.Д. Радиоволновая технология резонансной газосенсорной СВЧ-телеметрии. *Russ. Technol. J.* 2021;9(1):18–28. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28>
14. Li M., Yang Y., Iacopi F., Nulman J., Chappel-Ram S. 3D-printed low-profile single-substrate multi-metal layer antennas and array with bandwidth enhancement. *IEEE Access.* 2020;8:217370–217379. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041232>
5. Wu S.-Y., Yang C., Hsu W., Lin L. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors. *Microsyst. Nanoeng.* 2015;1(1):15013. <https://doi.org/10.1038/micronano.2015.13>
6. Li M., Yang Y., Iacopi F., Yamada M., Nulman J., et al. Compact multilayer bandpass filter using low-temperature additively manufacturing solution. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2021;68(7):3163–3169. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3072926>
7. Li Y., Ge L., Wang J., et al. A Ka-band 3-D-printed wideband stepped waveguide-fed magnetoelectric dipole antenna array. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2020;68(4): 2724–2735. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2950868>
8. Kornilov D.Yu., Tkachev S.V., Zaitsev E.V., Kim V.P., Kushnir A.E. Printer technologies in electronics. Materials and Devices for Printing – the First Russian Seminar (Moscow, December 15, 2017). *RENSIT.* 2017;9(2): 181–204. <https://doi.org/10.17725/rensit.2017.09.181>
9. Vorunichev D.S., Vorunicheva K.Yu. Current capabilities of prototyping technologies for multilayer printed circuit boards on a 3D printer. *Russ. Technol. J.* 2021;9(4):28–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-28-37>
10. Huang G.-L., Han C.-Z., Xu W., Yuan T., Zhang X. A compact 16-way high-power combiner implemented via 3-D metal printing technique for advanced radio-frequency electronics system applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019;66(6):4767–4776. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2863219>
11. Vorunichev D.S. Application of Additive Technology for 3D Printing of Electronic Devices as a Way to Reduce Prototyping Time. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS).* 2021. P. 480–483. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642806>
12. Vorunichev D.S. Prototyping Electronic Devices on a Dragonfly 3D Printer as a Means of Preserving Original Developments inside the Design Center. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS).* 2021. P. 472–475. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642911>
13. Kostin M.S., Yarlykov A.D. Radiowave technology of resonant gas-sensor microwave telemetry. *Russ. Technol. J.* 2021;9(1):18–28 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28>
14. Li M., Yang Y., Iacopi F., Nulman J., Chappel-Ram S. 3D-printed low-profile single-substrate multi-metal layer antennas and array with bandwidth enhancement. *IEEE Access.* 2020;8:217370–217379. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041232>

Об авторах

Воруничев Дмитрий Сергеевич, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики; преподаватель, кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vorunichev@mirea.ru. Scopus Author ID 57204939440, SPIN-код РИНЦ 5559-6656, <http://orcid.org/0000-0003-0512-7572>

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

About the authors

Dmitry S. Vorunichev, Deputy Director of the Institute of Radio Electronics and Informatics; Lecturer of the Department of Design and Production of Radioelectronic Means, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vorunichev@mirea.ru. Scopus Author ID 57204939440, RSCI SPIN-code 5559-6656, <http://orcid.org/0000-0003-0512-7572>

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

УДК 621.396.49
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-45-53>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оценка эффективности скользящего резервирования радиоэлектронных средств

Т.Э. Гельфман[®],
А.П. Пирхавка

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

Резюме

Цели. Повышение надежности радиоэлектронных средств достигается применением структурного и нагрузочного резервирования. Эффективность структурного резервирования зависит от кратности резервирования и от интенсивности отказов элементов радиоэлектронных средств. При нагрузочном резервировании путем облегчения электрических, тепловых и механических режимов работы элементов можно снизить их интенсивности отказов. Выбор способа резервирования определяется требованиями к показателям безотказности, которые часто находятся в противоречии. Поэтому весьма актуальной является проблема эффективного сочетания методов структурного резервирования и способов нагрузочного резервирования. В радиоэлектронных средствах длительного срока действия, например, в ретрансляторах спутниковых систем связи, при ограничении на массогабаритные параметры и потребляемую энергию применяется скользящее резервирование. Цель работы – оценка эффективности скользящего резервирования по различным показателям надежности при изменении кратности резервирования, режима работы резерва, интенсивности отказов элементов и переключающего устройства.

Методы. Для описания структуры сложной системы скользящего резервирования используется логико-вероятностный метод, в котором зависимость показателей надежности системы от показателей надежности элементов формулируется в виде логической функции работоспособности. Для сравнения различных вариантов логических схем надежности применяются графоаналитические методы.

Результаты. Получены математические модели для оценки эффективности скользящего резервирования. Проведен сравнительный анализ эффективности скользящего резервирования с нагруженным и ненагруженным резервом по вероятности безотказной работы, по гамма-процентному ресурсу, по интенсивности отказов при изменении дробной кратности резервирования и интенсивности отказов элементов. Исследовано влияние надежности переключающего устройства на эффективность скользящего резервирования.

Выводы. Построенные математические модели коэффициентов эффективности скользящего резервирования по разным показателям надежности позволяют дать практические рекомендации по выбору режима резерва. Определено соотношение показателей безотказности элементов и переключающего устройства, при котором надежностью переключающего устройства можно пренебречь. Для повышения эффективности скользящего резервирования радиоэлектронных средств необходимо сочетать кратность резервирования, режим работы резерва и способы уменьшения интенсивности отказов элементов.

Ключевые слова: надежность, радиоэлектронное средство, вероятность безотказной работы, гамма-процентный ресурс, интенсивность отказов, скользящее резервирование

• Поступила: 23.03.2023 • Доработана: 27.04.2023 • Принята к опубликованию: 06.07.2023

Для цитирования: Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Оценка эффективности скользящего резервирования радиоэлектронных средств. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):45–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-45-53>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Evaluation of the effectiveness of sliding redundancy of radioelectronic facilities

Tatyana E. Gelfman[@],
Alexey P. Pirkhavka

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The increased reliability of radioelectronic facilities can be achieved by the application of structural and load redundancy. Structural redundancy is achieved taking into account multiplicity of redundancy and the intensity of failures of elements of radioelectronic facilities, while load redundancy involves an easing of electrical, thermal, and mechanical operating modes of the elements. The choice of a redundancy method is determined according to reliability indicator requirements, which may often be contradictory. Therefore, the problem of how to effectively combine structural redundancy and load redundancy methods is very topical. In long-life radioelectronic facilities, for example, in satellite communication repeater systems, sliding redundancy is applied when limiting mass-dimensional parameters and consequently consumed energy. The aim of the work is to evaluate the efficiency of sliding redundancy according to various reliability indicators when altering redundancy multiplicity, reserve operating mode, element failure intensity, and switching device type.

Methods. To describe the structure of a complex sliding redundancy system, a logical-probabilistic method is used, in which the dependence of the system reliability indicators on the reliability indicators of the elements is formulated as a logical function of operability. Graph-analytical methods are used to compare different variants of reliability logic schemes.

Results. Mathematical models have been obtained to evaluate the effectiveness of sliding reservation. A comparative analysis of the efficiency of sliding redundancy with a loaded and unloaded reserve was carried out in terms failure-free operation probability, as well as gamma-percentage resource, failure rate when changing the fractional multiplicity of the redundancy, and element failure rate. The influence of the reliability of the switching device on the efficiency of the sliding redundancy is considered.

Conclusions. Practical recommendations on the selection of the redundancy mode are presented according to different reliability indices and constructed mathematical models of the sliding redundancy efficiency coefficients. The correlation between the reliability indices of elements and the switching device whose reliability can be discounted, is determined. To increase the efficiency of sliding redundancy of radioelectronic facilities, it is necessary to combine multiplicity of redundancy and the operating mode of the reserve with approaches aimed at reducing the intensity of failure of elements.

Keywords: reliability, radioelectronic facilities, probability of failure-free operation, gamma-percentage resource, failure rate, sliding redundancy

• Submitted: 23.03.2023 • Revised: 27.04.2023 • Accepted: 06.07.2023

For citation: Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. Evaluation of the effectiveness of sliding redundancy of radioelectronic facilities. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):45–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-45-53>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В обеспечении надежности радиоэлектронных средств (РЭС) существует противоречие между высокими темпами роста сложности систем и ограниченными темпами роста надежности элементной базы, что требует поиска новых решений. От надежности сложных РЭС зависят такие их показатели как эффективность, долговечность, готовность, живучесть, безопасность. При этом для достижения высоких показателей надежности РЭС должно удовлетворять требованиям по многим показателям: по вероятности безотказной работы, по средней наработке на отказ, по гамма-процентному ресурсу, по интенсивности отказов и т.д. Например, для достижения заданной эффективности РЭС необходимо гарантировать определенное значение вероятности безотказной работы, а для обеспечения долговечности – определенную величину гамма-процентного ресурса [1, 2].

Показатели надежности и эффективности РЭС имеют много общего. Многие задачи, связанные с обоснованием требований по надежности, разработкой программ обеспечения надежности, выбором систем обслуживания, контроля, эксплуатации должны ставиться как задачи исследования эффективности. Примерами задач такого типа являются:

- определение целесообразных сроков разработки;
- выбор оптимального ряда РЭС;
- выбор наилучшего сочетания проектных параметров РЭС;
- выбор из нескольких логических схем надежности схемы, обеспечивающей работоспособность при наибольшем числе отказов любых ее элементов;
- сравнение методов резервирования и топологий построения.

Оценку эффективности резервированных РЭС обычно проводят сравнением методов резервирования по разным показателям надежности. Для этого вводится коэффициент эффективности [1], который показывает, какой вид резервирования эффективнее по исследуемому показателю надежности.

Все показатели или критерии надежности связаны однозначными математическими моделями, в результате стремление удовлетворить сразу нескольким критериям часто приводит к противоречивым требованиям, к излишней избыточности, зависящей

от кратности резервирования. Поэтому выбор способа обеспечения надежности существенно зависит от критерия. Так, для обеспечения вероятности безотказной работы используется структурное резервирование [2–6], а для обеспечения средней наработки на отказ системы длительного существования – нагрузочное резервирование [1, 3, 7]. На практике необходимо сочетать методы структурного и нагрузочного резервирования.

В сложных системах возникают отказы разных видов [1, 8], причем все они носят случайный характер. В расчетах допускается независимость этих отказов и оценивается их влияние по разным математическим моделям: например, для внезапных отказов элементов при постоянной интенсивности отказов используется экспоненциальная модель, а для анализа влияния постепенных отказов – нормальное распределение. Однако постепенные отказы по причине старения изменяют вероятность возникновения внезапных отказов и сбоев, что усложняет анализ надежности РЭС [9, 10].

Высокая эффективность спутниковых сетей связи [11–13] обуславливается созданием ретрансляторов при применении в них скользящего резервирования, позволяющего достичь значительного повышения надежности при сравнительно небольшом увеличении массы, габаритов и потребляемой энергии [3]. Для резервирования отдельных элементов может использоваться один, два или несколько резервных элементов, каждый из которых подключается вместо любого из основных. Например, используют скользящее резервирование бортовых передатчиков или усилителей мощности этих передатчиков, причем резерв может быть нагруженный и ненагруженный [14, 15]. Для современных геостационарных спутников связи кратность скользящего резервирования передатчиков (соотношение количества резервных и рабочих передатчиков) может составлять от 1/5 до 1/2¹ [4].

¹ Дингес С.И., Иванюшкин Р.Ю., Козырев В.Б. и др. *Радиопередающие устройства*. Учебник для вузов. Под общ. ред. Р.Ю. Иванюшкина. М.: Горячая линия – Телеком; 2021. 1150 с. ISBN 978-5-9912-0774-4 [Dinges S.I., Ivanyushkin R.Yu., Kozyrev V.B., et al. *Radio transmitting devices*. Textbook for universities. Ivanyushkin R.Yu. (Ed.). Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2021. 1150 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0774-4]

В отличие от ненагруженного или холодного резерва, при нагруженном или горячем резерве нет необходимости активировать или разрешать резервному устройству работать в режиме активного нагруженного резерва. По этой причине скользящее резервирование с нагруженным резервом повышает эксплуатационную доступность и быстродействие системы, однако это также увеличивает эксплуатационные расходы, поскольку такая структура требует больше энергии и более сложное переключающее устройство. В работах [4, 5, 15] отмечается, что при резервировании замещением с ненагруженным резервом автомат контроля и коммутации снижает вероятность безотказной работы резервированной системы, однако не дано никаких рекомендаций по выбору показателей безотказности переключающего устройства. Поэтому вопрос повышения надежности и эффективности скользящего резервирования, тесно связанный с выбором кратности резервирования и режима работы резерва и с обеспечением показателей безотказности переключающего устройства, не снижающих надежность системы в целом, является актуальным.

ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ И ГАММА-ПРОЦЕНТНЫЙ РЕСУРС СХЕМ СКОльзяЩЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Структурная схема надежности скользящего резервирования с кратностью m/n представлена на рис. 1.

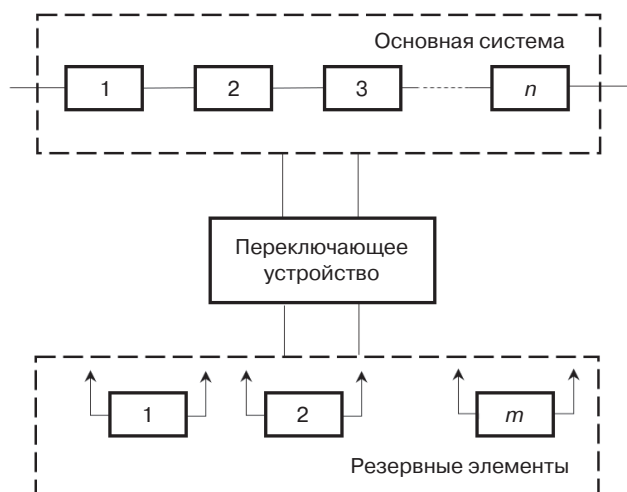


Рис. 1. Структурная схема надежности скользящего резервирования с кратностью m/n

Для схемы с ненагруженным резервом и кратности резервирования $1/n$ зависимость вероятности безотказной работы от времени описывается выражением²:

² Яншин А.А. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА: учебное пособие для вузов*. М.: Радио и связь; 1983. 128 с. [Yanshin A.A. *Theoretical foundations of EVA design, technology and reliability: textbook for universities*. Moscow: Radio i svyaz'; 1983. 128 p. (in Russ.).]

$$P_1(t) = \left(n \frac{\lambda}{\lambda_k} + 1 \right) e^{-n\lambda t} - n \frac{\lambda}{\lambda_k} e^{-(\lambda_k + n\lambda)t}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов основных и резервных элементов, n – количество элементов основной системы, λ_k – интенсивность отказов переключающего устройства.

При кратности резервирования $1/n$ выражение для зависимости от времени вероятности безотказной работы схемы скользящего резервирования с нагруженным резервом может быть получено без учета надежности переключающего устройства [1]:

$$P_2(t) = e^{-n\lambda t} \left[1 + n(1 - e^{-\lambda t}) \right]. \quad (2)$$

Выражение для вероятности безотказной работы схемы скользящего резервирования при кратности резервирования $2/3$ может быть получено также без учета надежности переключающего устройства [1]:

- для схемы с ненагруженным резервом

$$P_3(t) = e^{-3\lambda t} (1 + 3\lambda t + 4.5\lambda^2 t^2), \quad (3)$$

- для схемы с нагруженным резервом

$$P_4(t) = e^{-3\lambda t} (10 + 6e^{-2\lambda t} - 15e^{\lambda t}). \quad (4)$$

Рис. 2 иллюстрирует зависимости (1) и (2) для $n = 2$ и $n = 4$ при различных интенсивностях отказов основных и резервных элементов. Для схемы с ненагруженным резервом при построении зависимостей рис. 2 принято значение интенсивности отказов переключающего устройства $\lambda_k = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

Из графиков рис. 2 видно, что ненагруженный резерв даже с учетом надежности переключающего устройства обеспечивает большую вероятность безотказной работы. Например, для ненагруженного резерва с $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ и $\lambda_k = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ при кратности резервирования $1/4$ и $1/2$ вероятность безотказной работы для времени $4 \cdot 10^5 \text{ ч}$ составляет соответственно 0.52 и 0.8. В случае применения нагруженного резерва аналогичные значения вероятности безотказной работы составляют соответственно 0.46 и 0.74.

По графикам рис. 2 можно определить показатель долговечности – гамма-процентный ресурс [2] схем резервирования. При использовании элементов с интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ гамма-процентный ресурс схемы с ненагруженным резервом составляет $1.3 \cdot 10^6 \text{ ч}$ при кратности резервирования $1/4$ и $2.6 \cdot 10^6 \text{ ч}$ при кратности резервирования $1/2$. Аналогичные значения гамма-процентного ресурса схемы с нагруженным резервом составляют соответственно $1.2 \cdot 10^6 \text{ ч}$ и $2.2 \cdot 10^6 \text{ ч}$, т.е. схема с ненагруженным резервом более долговечна.

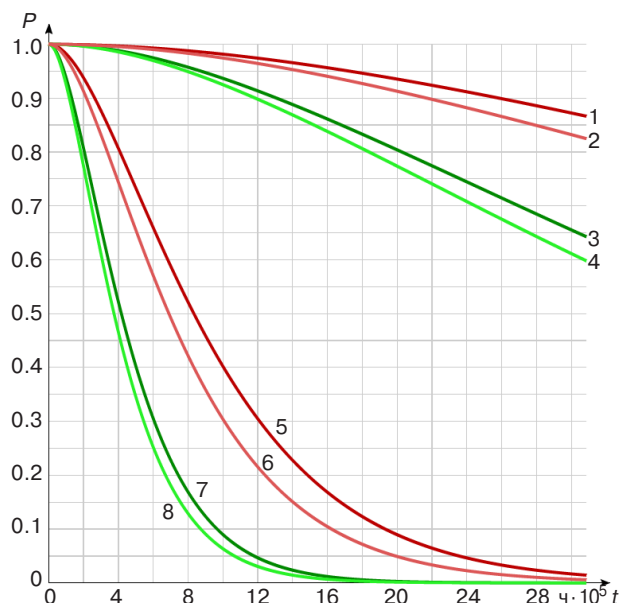


Рис. 2. Зависимости от времени вероятности безотказной работы схемы скользящего резервирования:
1, 2, 3, 4 – $\lambda = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$; 5, 6, 7, 8 – $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
1, 3, 5, 7 – резерв ненагруженный;
2, 4, 6, 8 – резерв нагруженный;
1, 2, 5, 6 – кратность резервирования 1/2;
3, 4, 7, 8 – кратность резервирования 1/4

Из зависимостей рис. 2 также следует, что при увеличении интенсивности отказов основных и резервных элементов до $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ происходит ухудшение на порядок гамма-процентного ресурса любой из рассматриваемых схем.

На рис. 3 представлены построенные в соответствии с выражением (2) графики зависимостей от времени вероятности безотказной работы схемы с ненагруженным резервом с кратностями резервирования 1/4 и 1/2, $\lambda = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ при различных интенсивностях отказов переключающего устройства.

С помощью графиков рис. 3 можно оценить влияние надежности переключающего устройства на долговечность схемы скользящего резервирования с ненагруженным резервом. Например, при использовании в схеме с кратностью резервирования 1/4 переключающего устройства с интенсивностями отказов $2 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, $5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ и 10^{-8} ч^{-1} гамма-процентный ресурс составляет соответственно $1.1 \cdot 10^6$, $1.24 \cdot 10^6$ и $1.3 \cdot 10^6$ ч. Аналогичные значения гамма-процентного ресурса для схемы с кратностью резервирования 1/2 составляют соответственно $1.9 \cdot 10^6$, $2.4 \cdot 10^6$ и $2.6 \cdot 10^6$ ч. Из близости кривых 1 и 2, а также 6 и 7 следует, что при соотношении $\lambda/\lambda_k > 10$ надежность переключающего устройства практически не влияет на долговечность схемы скользящего резервирования с ненагруженным резервом.

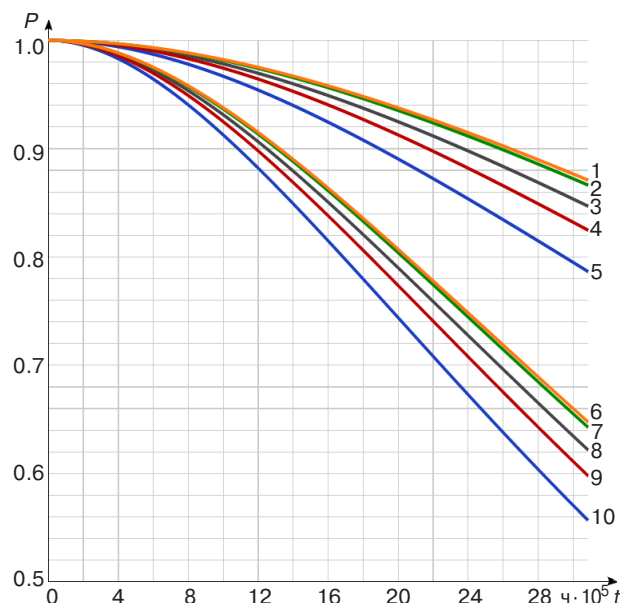


Рис. 3. Зависимости от времени вероятности безотказной работы схемы с ненагруженным резервом:
1, 2, 3, 4, 5 – кратность резервирования 1/2;
6, 7, 8, 9, 10 – кратность резервирования 1/4;
1, 6 – $\lambda_k = 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$; 2, 7 – $\lambda_k = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;
3, 8 – $\lambda_k = 5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$; 4, 9 – $\lambda_k = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$;
5, 10 – $\lambda_k = 2 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$

КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПО ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Проведем анализ влияния состояния резерва при скользящем резервировании на эффективность резервирования с помощью коэффициента эффективности резервирования K_p по вероятности безотказной работы:

$$K_p(t) = \frac{P_1(t)}{P_2(t)}.$$

Для кратности резервирования 1/2 в соответствии с (1) и (2) коэффициент эффективности определяется выражением:

$$K_{p1/2}(t) = \frac{2 \frac{\lambda}{\lambda_k} (1 - e^{-\lambda_k t}) + 1}{3 - 2e^{-\lambda t}}.$$

Для кратности резервирования 1/4 формула для коэффициента эффективности имеет вид:

$$K_{p1/4}(t) = \frac{4 \frac{\lambda}{\lambda_k} (1 - e^{-\lambda_k t}) + 1}{5 - 4e^{-\lambda t}}.$$

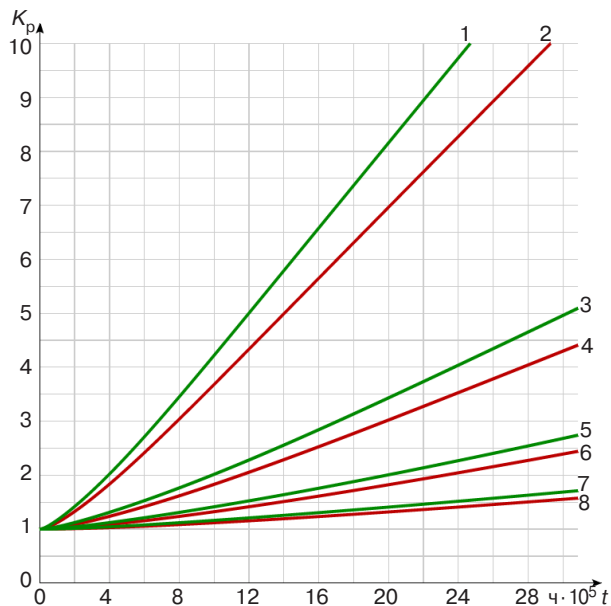


Рис. 4. Зависимости от времени коэффициента эффективности резервирования по вероятности безотказной работы:
1, 2 – $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 3, 4 – $\lambda = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
5, 6 – $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 7, 8 – $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$;
1, 3, 5, 7 – кратность резервирования 1/4;
2, 4, 6, 8 – кратность резервирования 1/2

Для кратности резервирования 2/3 без учета надежности переключающего устройства формула для коэффициента эффективности по вероятности безотказной работы в соответствии с (3) и (4) имеет вид:

$$K_{p2/3}(t) = \frac{1 + 3\lambda t + 4.5\lambda^2 t^2}{10 + 6e^{-2\lambda t} - 15e^{-\lambda t}}.$$

Рис. 4 иллюстрирует зависимости от времени коэффициента эффективности резервирования при интенсивности отказов переключающего устройства 10^{-8} ч^{-1} , кратностях резервирования 1/2 и 1/4 и различных интенсивностях отказов элементов. На рис. 5 показаны графики зависимости от времени коэффициента эффективности резервирования для кратности резервирования 2/3 при различных интенсивностях отказов элементов.

Анализ графиков рис. 4 и рис. 5 показывает, что коэффициент эффективности по вероятности безотказной работы растет со временем, а также при увеличении λ . Так, например, для времени 10^6 ч и $1.4 \cdot 10^6 \text{ ч}$ при кратности резервирования 1/4, $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ и $\lambda_k = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ коэффициент эффективности равен соответственно 4.2 и 5.8. При кратности резервирования 1/2 аналогичные значения K_p составляют 3.7 и 5.0. В случае снижения интенсивности отказов до $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ для времени 10^6 ч и кратностей резервирования 1/4 и 1/2 коэффициент эффективности равен соответственно 2.0 и 1.8.

В случае применения кратности резервирования 2/3 при $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ для времени 10^6 ч и $1.4 \cdot 10^6 \text{ ч}$

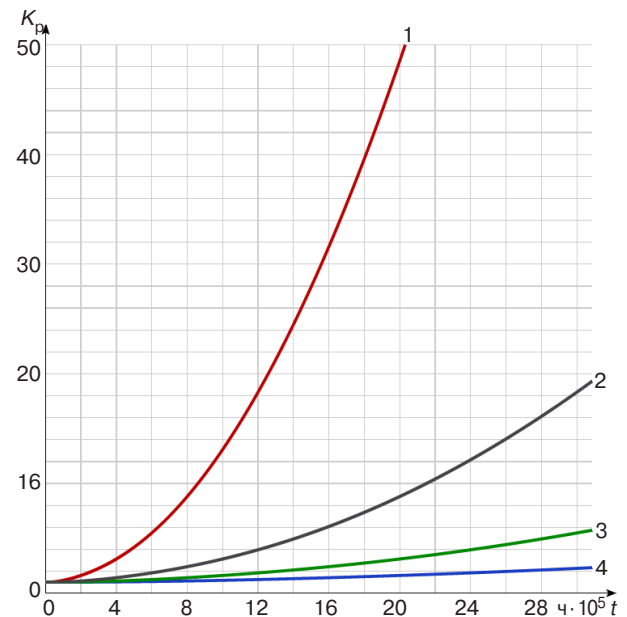


Рис. 5. Зависимости от времени коэффициента эффективности резервирования по вероятности безотказной работы для кратности резервирования 2/3: 1 – $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
2 – $\lambda = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
3 – $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
4 – $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$

коэффициент эффективности резервирования равен соответственно 13.3 и 24.5 (рис. 5). При снижении интенсивности отказов до $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ аналогичные значения K_p составляют соответственно 1.7 и 2.2.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ СХЕМ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Одним из основных показателей безотказности РЭС является интенсивность отказов. Исследуем, как изменяется интенсивность отказов схем скользящего резервирования с нагруженным и ненагруженным резервом для различных значений λ и λ_k при изменении кратности резервирования.

При кратности резервирования 1/n интенсивность отказов схемы с ненагруженным резервом определяется выражением:

$$\lambda_1(t) = -\frac{dP_1(t)}{dt} / P_1(t) = \frac{n\lambda \left(n \frac{\lambda}{\lambda_k} + 1 \right) (1 - e^{-\lambda_k t})}{n \frac{\lambda}{\lambda_k} (1 - e^{-\lambda_k t}) + 1}, \quad (5)$$

а для схемы с нагруженным резервом интенсивность отказов определяется выражением:

$$\lambda_2(t) = -\frac{dP_2(t)}{dt} / P_2(t) = \frac{n\lambda(n+1)(1 - e^{-\lambda t})}{n(1 - e^{-\lambda t}) + 1}. \quad (6)$$

Таблица. «Скорость старения» резервированной системы

$\lambda, \text{ч}^{-1}$	Кратность резервирования					
	1/2		1/4		2/3	
	Нагруженный резерв	Ненагруженный резерв	Нагруженный резерв	Ненагруженный резерв	Нагруженный резерв	Ненагруженный резерв
10^{-6}	$1.38 \cdot 10^6$	$4.36 \cdot 10^6$	$1.03 \cdot 10^6$	$2.22 \cdot 10^6$	$1.75 \cdot 10^6$	$6.29 \cdot 10^6$
$5 \cdot 10^{-7}$	$2.79 \cdot 10^6$	$8.93 \cdot 10^6$	$2.02 \cdot 10^6$	$4.17 \cdot 10^6$	$3.51 \cdot 10^6$	$12.7 \cdot 10^6$

В случае кратности резервирования 2/3 формулы для интенсивности отказов имеют следующий вид:

- для схемы с ненагруженным резервом

$$\lambda_3(t) = -\frac{dP_3(t)}{dt} / P_3(t) = \frac{27\lambda^3 t^2}{2 + 6\lambda t + 9\lambda^2 t^2}, \quad (7)$$

- для схемы с нагруженным резервом

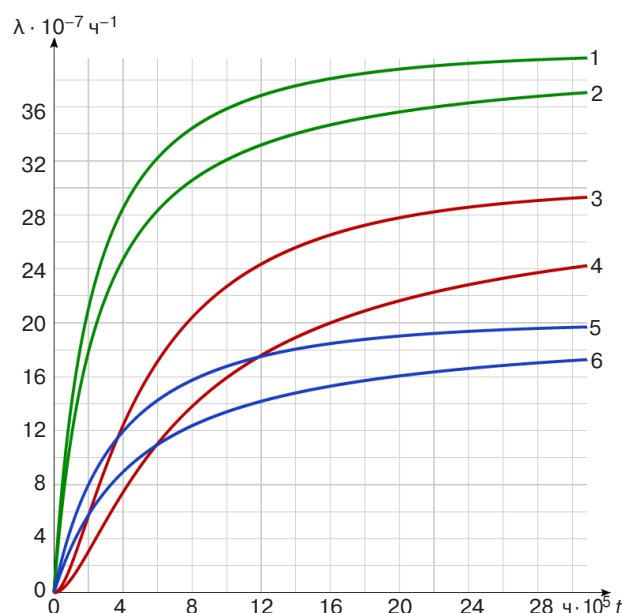
$$\lambda_4(t) = -\frac{dP_4(t)}{dt} / P_4(t) = \frac{30\lambda(1 + e^{-2\lambda t} - 2e^{-\lambda t})}{10 + 6e^{-2\lambda t} - 15e^{-\lambda t}}. \quad (8)$$

Из формул (5)–(8) следует, что для всех рассматриваемых схем скользящего резервирования при $t = 0$ интенсивность отказов равна нулю, а при $t \rightarrow \infty$ интенсивность отказов равна $n\lambda$, как для нерезервированной системы. Такие системы называют стареющими.

На рис. 6 представлены построенные в соответствии с выражениями (5)–(8) зависимости интенсивности отказов от времени схем скользящего резервирования с кратностями резервирования 1/2, 1/4 и 2/3 при $\lambda = 10^{-6} \text{ч}^{-1}$. Для схемы с ненагруженным резервом для кратностей резервирования 1/2 и 1/4 при построении зависимостей рис. 6 принято значение интенсивности отказов переключающего устройства $\lambda_k = 10^{-8} \text{ч}^{-1}$.

Для сравнения интенсивности отказов резервированных систем с различной кратностью введем показатель «скорость старения» – время достижения интенсивностью отказов уровня 0.9 от максимального, т.е. время, когда резервирование уже практически не влияет на интенсивность отказов. В таблице приведены определенные по формулам (5)–(8) и графикам рис. 6 значения этого времени в часах для некоторых значений λ при различных вариантах резервирования.

Повышение надежности РЭС, в частности систем спутниковой связи, связано с увеличением сроков активного существования и определяется функционально-структурными решениями, позволяющими отодвинуть процессы старения и деградации элементов и систем в целом. Из формул (5)–(8), а также представленных на рис. 6 графиков и данных таблицы следует, что

**Рис. 6.** Зависимости интенсивности отказов от времени схем скользящего резервирования:

- 1, 2 – кратность резервирования 1/4;
- 3, 4 – кратность резервирования 2/3;
- 5, 6 – кратность резервирования 1/2;
- 1, 3, 5 – нагруженный резерв;
- 2, 4, 6 – ненагруженный резерв

- замедлить процесс старения систем скользящего резервирования с ненагруженным и нагруженным резервом при разных кратностях резервирования можно путем применения нагрузочного резервирования;
- «скорость старения» рассмотренных схем со скользящим резервированием зависит от кратности резервирования и меньше для кратности 2/3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная методика определения эффективности скользящего резервирования по математическим моделям вероятности безотказной работы и интенсивности отказов позволяет сделать следующие выводы:

1. Схема скользящего резервирования с ненагруженным резервом даже при учете интенсивности отказов переключающего устройства более эффективна, чем схема с нагруженным резервом.

Причем эффективность скользящего резервирования с ненагруженным резервом растет со временем, а также при увеличении интенсивностей отказов основных и резервных элементов.

2. При соотношении интенсивности отказов элементов и интенсивности отказов переключающего устройства более десяти надежность переключающего устройства практически не влияет на долговечность схемы скользящего резервирования с ненагруженным резервом.
3. Сочетание нагрузочного резервирования для уменьшения интенсивности отказов элементов и структурного резервирования позволяет добиться снижения «скорости старения» систем со скользящим резервированием, т.е. продлить время действия резервирования

при ненагруженном и нагруженном резерве. Наилучшие результаты дает схема с дробной кратностью 2/3.

Таким образом, для повышения эффективности скользящего резервирования РЭС длительного срока действия необходимо сочетать кратность резервирования, режим работы резерва и способы уменьшения интенсивности отказов элементов.

Вклад авторов

Т.Э. Гельфман – идея исследования, научное редактирование.

А.П. Пирхавка – проведение исследования, редактирование текста статьи.

Authors' contributions

T.E. Gelfman – research idea, scientific editing.

A.P. Pirkhavka – conducting research, writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половко А.М., Гуров С.В. *Основы теории надежности*. СПб.: БХВ-Петербург; 2008. 704 с. ISBN 978-5-94157-541-1
2. Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П., Скрипачев В.О. Анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутника связи. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):51–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>
3. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. *Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации*. Томск: ТГУ; 2015. 266 с. ISBN 978-5-94621-460-5
4. Saleh J.H., Hassan R., Torres-Padilla J.P., Hastings D.E., Newman D.J. Impact of subsystem reliability on satellite revenue generation and present value. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2005;42(6):1122–1129. <https://doi.org/10.2514/1.13137>
5. Гельфман Т.Э., Калмыков М.Н., Сердитов А.А., Чуев Е.А., Богачев В.Н., Харитонов А.Ю. Надежность систем космической связи. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012»*. 2012;12(6):157–161.
6. Кислаев А.Г., Хропов А.Н. Оптимальное резервирование, как метод повышения надежности систем космической связи. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2010»*. 2010;10(1–3):109–112.
7. Жаднов В.В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем. *Надежность и качество сложных систем*. 2013;2:65–73. URL: https://nikas.pnzgu.ru/files/nikas.pnzgu.ru/zhadnov_65_73.pdf
8. Ямпурин Н.П., Баранова А.В. *Основы надежности электронных средств*. М.: Академия; 2010. 240 с. ISBN 978-5-7695-5908-2

REFERENCES

1. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti (Fundamentals of Reliability Theory)*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg; 2008. 704 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94157-541-1
2. Gelfman T.E., Pirkhavka A.P., Skripachev V.O. Analysis of the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):51–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>
3. Sevastyanov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami ekspluatatsii (Fundamentals of Reliability Management of Spacecraft with Long Service Life)*. Tomsk: TGU; 2015. 266 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94621-460-5
4. Saleh J.H., Hassan R., Torres-Padilla J.P., Hastings D.E., Newman D.J. Impact of subsystem reliability on satellite revenue generation and present value. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2005;42(6):1122–1129. <https://doi.org/10.2514/1.13137>
5. Gelfman T.E., Kalmykov M.N., Serditov A.A., Chuev E.A., Bogachev V.N., Kharitonov A.Yu. Reliability of space communication systems. In: *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "INTERMATIC 2012"*. 2012;12(6):157–161 (in Russ.).
6. Kislav A.G., Khropov A.N. Optimal redundancy as a method for improving the reliability of space communication systems. *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "INTERMATIC 2010"*. 2010;10(3):109–112 (in Russ.).
7. Zhadnov V.V. Calculation assessment of durability indicators of spacecrafts and systems electronic means. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2013;2:65–73 (in Russ.). Available from URL: https://nikas.pnzgu.ru/files/nikas.pnzgu.ru/zhadnov_65_73.pdf

9. Алешин В.Ф., Колобов А.Ю., Петров Ю.А. Проблемные вопросы прогнозирования и подтверждения надежности космических аппаратов длительного функционирования. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015;6:31–41. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23852897>
10. Kofanov Y.N., Lvov B.G., Meleh N.A., Sotnikova S.Y. Reliability of space infocommunications equipment. In: *Proceedings of the 2018 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*. IEEE. 2018. P. 354–357. <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2018.8525088>
11. Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. *IEEE Systems Journal*. 2021;15(1):791–801. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2980760>
12. Jung S., Choi J.P. Reliability of small satellite networks with software-defined radio and enhanced multiple access protocol. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2021;57(3):1891–1902. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3050652>
13. Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Коэффициент оперативной готовности спутниковых сетей связи. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):35–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-35-40>
14. Аскинази Г.Б., Быков В.Л., Дьячкова М.Н. и др. *Спутниковая связь и вещание: справочник*; ред. Л.Я. Кантор. М.: Радио и связь; 1988. 344 с.
15. Mehmet N., Selman D., Hasan H.E., Cenk S. Reliability and cost focused optimization approach for a communication satellite payload redundancy allocation problem. *Int. J. Electrical, Electronic and Communication Sciences*. 2018;11.0(5). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316576>
8. Yampurin N.P., Baranova A.V. *Osnovy nadezhnosti elektronnykh sredstv (Fundamentals of Reliability of Electronic Means)*. Moscow: Akademiya; 2010. 240 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7695-5908-2
9. Alyoshin V.F., Kolobov A.Yu., Petrov J.A. Challenging issues for predicting and validating reliability of sustained spacecraft operation. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of Bauman MSTU*. 2015;6:31–41 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23852897>
10. Kofanov Y.N., Lvov B.G., Meleh N.A., Sotnikova S.Y. Reliability of space infocommunications equipment. In: *Proceedings of the 2018 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*. IEEE. 2018. P. 354–357. <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2018.8525088>
11. Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. *IEEE Systems Journal*. 2021;15(1):791–801. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2980760>
12. Jung S., Choi J.P. Reliability of small satellite networks with software-defined radio and enhanced multiple access protocol. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2021;57(3):1891–1902. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3050652>
13. Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. The operational readiness factor of satellite communication networks. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):35–40 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-35-40>
14. Askinazi G.B., Bykov V.L., Dyachkova M.N., et al. *Sputnikovaya svyaz' i veshchaniye: spravochnik (Satellite Communication and Broadcasting. Handbook)*. Kantor L.Ya. (Ed.). Moscow: Radio i svyaz'; 1988. 344 p. (in Russ.).
15. Mehmet N., Selman D., Hasan H.E., Cenk S. Reliability and cost focused optimization approach for a communication satellite payload redundancy allocation problem. *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*, 2018;11.0(5). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316576>

Об авторах

Гельфман Татьяна Элевна, доцент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: gelfman@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8302-6999>

Пирхавка Алексей Петрович, к.т.н., доцент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pirkhavka@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2460-7507>

About the authors

Tatyana E. Gelfman, Associate 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: gelfman@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8302-6999>

Alexey P. Pirkhavka, Cand. Sci. (Eng.), Associate 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: pirkhavka@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2460-7507>

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

УДК 004.052.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-54-62>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Применение кодов с исправлением двух ошибок для защиты конфигурационной памяти программируемой логики от действия космической радиации

Е.С. Лепёшкина[®],
Н.Д. Кустов,
В.Х. Ханов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева,
Красноярск, 660037 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: kleпка1111.93@mail.ru

Резюме

Цели. Программируемая логика типа field programmable gate array (FPGA) на основе статической конфигурационной памяти широко применяется в электронике бортовых систем космических аппаратов. Под воздействием космической радиации в конфигурационной памяти FPGA могут возникать ошибки. Основными методами защиты от них являются различные варианты резервирования триггеров, а также применение помехоустойчивых кодов в специальных схемах детектирования и исправления ошибок. Цель работы – определение из группы помехоустойчивых кодов тех, которые с учетом их избыточности наилучшим образом подходят для реализации внутреннего скраббинга конфигурационной памяти программируемых логических интегральных схем.

Методы. В работе рассмотрены методы скраббинга конфигурационной памяти FPGA, которые применяются для ее очистки от ошибок, вызванных действием космической радиации. Предлагается для повышения эффективности внутреннего скраббинга конфигурационной памяти FPGA использовать коды, исправляющие как однократные, так и двукратные смежные ошибки SEC-DED-DAEC. В этом случае уменьшается необходимость выполнения внешнего скраббинга конфигурационной памяти путем ее перезаписи эталонной конфигурацией из энергонезависимой радиационно-стойкой памяти. Таким образом, снижается время неработоспособного состояния FPGA, вызванное процедурой внешнего скраббинга. В связи с тем, что известные коды SEC-DED-DAEC имеют ненулевую вероятность ошибочного детектирования, а затем – ошибочного исправления двойной несмежной ошибки, а также обладают разной избыточностью и сложностью реализации, было приведено исследование наиболее эффективного кода для внутреннего скраббинга.

Результаты. Результаты исследования показали, что наилучшими с указанных позиций являются коды Датта, Нила и Хоюна – Йонгсурка. Приведены результаты сравнения кодов по выбранным критериям. Даны рекомендации для выбора конкретного кода в зависимости от возможных требований к планируемой космической миссии.

Выводы. Проведенное исследование показало эффективность защиты памяти программируемой логики с помощью применения кодов с исправлением двух ошибок.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, сбой в конфигурационной памяти, методы очистки конфигурационной памяти от сбоев, коды с исправлением двух смежных ошибок

• Поступила: 30.01.2023 • Доработана: 17.05.2023 • Принята к опубликованию: 07.07.2023

Для цитирования: Лепёшкина Е.С., Кустов Н.Д., Ханов В.Х. Применение кодов с исправлением двух ошибок для защиты конфигурационной памяти программируемой логики от действия космической радиации. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):54–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-54-62>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Application of double-error correction codes to protect configuration programmable logic memory against space radiation

Ekaterina S. Lepeshkina[@],
Nikita D. Kustov,
Vladislav Kh. Khanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: klepka1111.93@mail.ru

Abstract

Objectives. Programmable logic integrated circuits of the field programmable gate array (FPGA) type based on static configuration memory are widely used in the electronics of onboard spacecraft systems. Under the influence of space radiation, errors may occur in the FPGA configuration memory. The main methods of protection against such errors involve various options for reservation triggers, as well as the use of error-correcting codes in special error detection and correction circuits. The purpose of the present work is to determine which error-correcting codes are best suited to the implementation of internal scrubbing of the FPGA configuration memory taking redundancy into account.

Methods. The paper analyses various methods for scrubbing FPGA configuration memory, which are used to correct errors caused by the action of space radiation. It is proposed to increase the efficiency of internal scrubbing of the FPGA configuration memory using codes that correct both single- and double-adjacent SEC-DED-DAEC errors. In this case, the need to perform external scrubbing of the configuration memory is reduced by overwriting it with a reference configuration from non-volatile radiation-resistant memory; in this way, FPGA downtime caused by the external scrubbing procedure is reduced. Due to the known SEC-DED-DAEC codes having a non-zero probability of erroneous detection and subsequent erroneous correction of a double non-adjacent error, as well as various redundancy and implementation complexities, a study was made of the most efficient code for internal scrubbing.

Results. The results showed that the Datta, Neale and Hoyoon–Yongsurk codes are optimal from the indicated positions. Recommendations are given for selecting a specific code depending on the specific requirements for a particular planned space mission.

Conclusions. The study confirms the effectiveness of protecting the memory of programmable logic by using two-error-correcting codes.

Keywords: programmable logic integrated circuits, faults in configuration memory, methods for clearing configuration memory from faults, double-adjacent error-correcting codes

• Submitted: 30.01.2023 • Revised: 17.05.2023 • Accepted: 07.07.2023

For citation: Lepeshkina E.S., Kustov N.D., Khanov V.Kh. Application of double-error correction codes to protect configuration programmable logic memory against space radiation. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):54–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-54-62>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается значительный прогресс в развитии космической электроники, что позволило существенно расширить функционал современных космических аппаратов (КА), уменьшив при этом габариты, массу и энергопотребление бортовых систем. Вместе с тем остается актуальной задача защиты аппаратуры от радиационных сбоев в электронных компонентах, тем более что на малых КА начала широко использоваться дешевая коммерческая электронная компонентная база (ЭКБ), в которой отсутствуют многие механизмы защиты от сбоев, характерные для радиационно-устойчивой космической ЭКБ. В аппаратуре, основанной на коммерческой ЭКБ, в большей степени возможны к применению лишь методы защиты от одиночных сбоев (single event upset, SEU), вызванных разовыми событиями попадания заряженных частиц радиации в электронные компоненты [1]. Эти сбои вызывают логические ошибки без разрушения компонента, т.е. они не вызывают необратимых процессов в полупроводниковой структуре компонента [2]. Сбои SEU возникают в триггерах, которыми насыщена любая электронная аппаратура. Вероятность таких сбоев достаточно высока, в этом и состоит их опасность.

Основными методами защиты от сбоев SEU являются различные варианты резервирования, в т.ч. метод тройного модульного резервирования (triple modular redundancy, TMR) [3, 4] триггеров, а также применение помехоустойчивых кодов (error correction codes, ECC) в специальных схемах детектирования и исправления ошибок (error detection and correction, EDAC) [5, 6], обычно исправляющих однократную ошибку (ошибку в одном бите) в структуре из нескольких триггеров, например, в слове статической памяти SRAM (static random access memory).

Одним из широко используемых компонентов в космическом приборостроении являются программируемые логические интегральные схемы типа SRAM FPGA (static random access memory field programmable gate array). Данные программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), в основном относящиеся к коммерческой категории микросхем, отличаются большим количеством программируемых элементов, низким энергопотреблением, высокой скоростью работы имплементированных в них схем,

но низкой сбоеустойчивостью к событиям SEU [7]. Ошибки SEU могут произойти в триггерах реализованной на SRAM FPGA схемы, а также в конфигурационной памяти SRAM. Последний вид ошибок является наиболее опасным, т.к. он изменяет структуру имплементированной схемы, что вызывает постоянные периодические сбои всякий раз, когда через поврежденный участок схемы проходят сигналы [8].

Основным методом защиты SRAM FPGA от SEU является скраббинг (от англ. scrubbing), который заключается в перезаписи эталонной конфигурацией сбойного содержимого конфигурационной памяти при обнаружении ошибки в имплементированной схеме [9, 10].

В данной работе рассмотрены различные варианты скраббинга, проанализированы возможности применения ECC для скраббинга. В этой связи предложено применение кодов типа SEC-DED-DAEC (single error correction, double error detection and double adjacent error correction), проведена оценка эффективности известных кодов SEC-DED-DAEC для целей скраббинга конфигурационной памяти SRAM FPGA.

СВЯЗАННЫЕ РАБОТЫ

Содержимое конфигурационной памяти SRAM FPGA может быть искажено при воздействии радиации. Поэтому для их нормальной работы в среде, подверженной радиации, например, в космическом пространстве, необходимо обнаруживать ошибки в конфигурационной памяти и быстро их устранять. Устранение ошибок в конфигурационной памяти производится с помощью скраббинга – метода ее перезаписи эталонной конфигурацией.

При этом существуют два способа перезаписи: полный и частичный. Полный скраббинг состоит в перезаписи всего содержимого конфигурационной памяти, частичный скраббинг – это поблочная перезапись конфигурационной памяти [11], например, последовательно блок за блоком. Во втором случае уменьшается время неработоспособности системы, вызванное процессом загрузки полной конфигурации.

Скраббинг может быть «слепой» и «зрячий» [12]. «Слепой» скраббинг состоит в периодической перезаписи полной или последовательно поблочной конфигурационной памяти. Период перезаписи

выбирают из предполагаемой интенсивности ошибок, например, в зависимости от высоты орбиты КА. «Зрячий» скраббинг выполняют после обнаружения ошибки, возможно, при локализации блока конфигурационной памяти, накоплении ошибок и невозможности исправить их каким-либо другим дополнительным методом.

Существуют прямой и косвенный способы определения ошибок в конфигурационной памяти. Косвенный метод заключается в нахождении ошибок во внутренней системе ПЛИС, сконфигурированной с помощью содержимого конфигурационной памяти. Если в конфигурационной памяти произошел сбой, то он проявится в системе в виде ошибки, которую могут выявить (и заодно исправить) блоки TMR, распределенные в системе. При неоднократной (последовательно 3–5 раз) выявленной ошибке следует запустить процедуру скраббинга [11].

Прямой способ заключается в периодическом поблочном сравнении содержимого конфигурационной памяти с соответствующим блоком эталонной конфигурации, находящимся в энергонезависимой и радиационно-устойчивой памяти. При этом для ускорения работы могут использоваться коды ЕСС. В этом случае в каждом блоке эталонной конфигурации в энергонезависимой памяти хранится также его контрольная сумма. При обратном чтении соответствующего блока из конфигурационной памяти ПЛИС рассчитывается его контрольная сумма, которая сравнивается с соответствующей суммой из энергонезависимой памяти. Если суммы не совпадают, значит, в данном блоке конфигурационной памяти произошел сбой и этот блок следует перезаписать [8].

Современные ПЛИС компании Xilinx¹ имеют основанные на применении EDAC и кодов single error correction and double error detection (SEC-DED) встроенные механизмы поблочного сканирования конфигурационной памяти и автоматического исправления в ней однократных ошибок, а также обнаружения двукратных ошибок в сканированном блоке [8]. Данный подход, в дальнейшем называемый в работе внутренним скраббингом, позволяет уменьшить количество запусков внешнего частичного скраббинга конфигурационной памяти для исправления ошибок двойной и большей кратности, а значит – уменьшить время простоя имплементированной в ПЛИС системы, связанного с выполнением внешнего скраббинга.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что коды SEC-DED исправляют один сбой в слове памяти. Используемый код SEC-DED

должен быть малоизбыточным, быстрым и простым в реализации (для ПЛИС – это малое количество логических элементов для реализации конкретного кода). Этим критериям лучше всего соответствует код Хсяо (39, 32), где 39 – размер кодового слова в битах, 32 – информационного [13], принадлежащий к группе модифицированных кодов Хэмминга [14].

С развитием новых технологий создания ЭКБ и переходом к более тонким технологическим процессам производства компонентов повышается вероятность мультибитных сбоев, в первую очередь, двухбитных [15]. Одним из способов решения данной проблемы является применение кодов SEC-DED-DAEC [16]. Коды, принадлежащие к этой группе, исправляют 2 смежные ошибки (смежные – значит находящиеся в двух соседних битах одного слова памяти). Они также принадлежат к группе модифицированных кодов Хэмминга, поэтому являются быстрыми и имеют малую избыточность. Любой SEC-DED-DAEC-код справляется с задачами коррекции одиночной и двойной смежной ошибки в полной мере. Но эти коды обладают одним специфическим недостатком: существует вероятность неправильного исправления несмежных двукратных ошибок, причем у одного кода из данной группы эта вероятность больше, а у другого – меньше.

Отметим, что вероятность смежной двойной ошибки в слове памяти существенно выше, чем вероятность появления двойной несмежной ошибки. Двойная смежная ошибка – это ошибка от одного события SEU, охватившего два соседних бита одного слова. Двойная несмежная ошибка – это накопление ошибок. Сначала произошел сбой, вызвавший ошибку в одном бите слова памяти, затем, по прошествии времени, произошел сбой, вызвавший ошибку в другом бите этого же слова памяти, и в результате образовалась двойная несмежная ошибка. Понятно, что такой процесс маловероятен, но исключить его нельзя. Поэтому исключить из анализа кодов SEC-DED-DAEC оценку вероятности неправильного исправления несмежных двукратных ошибок было бы неправильно.

Предлагается для повышения эффективности внутреннего скраббинга конфигурационной памяти ПЛИС использовать SEC-DED-DAEC-коды. В этом случае в конфигурационной памяти исправляются и однократные, и двукратные смежные ошибки, что позволит меньше прибегать к внешнему скраббингу конфигурационной памяти путем ее перезаписи эталонной конфигурацией из энергонезависимой радиационно-стойкой памяти.

Задача исследования состоит в следующем. В связи с тем, что количество SEC-DED-DAEC-кодов составляет некоторое множество, каждый из них имеет свои параметры, необходимо провести исследование для получения оценки вероятности ложного

¹ <https://www.xilinx.com/> (in Russ.). Дата обращения 16.02.2023. / Accessed February 16, 2023.

обнаружения (а затем и ложного исправления) двукратной несмежной ошибки и требуемых ресурсов для реализации кодера/декодера, и таким образом определить из них те, которые, дополнительно, с учетом их избыточности, лучшим образом подходят к реализации внутреннего скраббинга конфигурационной памяти ПЛИС.

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как было отмечено ранее, для SEC-DED-DAEC-кодов существует вероятность ошибочного детектирования двукратной несмежной ошибки как двукратной смежной, что приводит впоследствии к ошибочной коррекции битов кодового слова. Определение такой вероятности для того или иного кода проведено при помощи функционального моделирования.

Для этого была разработана функциональная модель, представленная в виде программы на языке C++, разработанной в среде *Microsoft Visual Studio*². Ниже описаны основные логические части программы:

- 1) блок инициализации переменных (порождающей **G**-матрицы и проверочной **H**-матрицы);
- 2) блок генерации информационного слова (одномерного булевого массива) с использованием псевдослучайной функции;
- 3) блок кодирования информационного слова путем перебора столбцов **G**-матрицы. При появлении единицы производится операция XOR над текущим битом кодового слова и соответствующим битом информационного слова;
- 4) блок внесения двукратной несмежной ошибки с использованием псевдослучайной функции для определения случайных несмежных позиций и последующего инвертирования битов кодового слова;
- 5) блок определения синдрома ошибки путем перебора столбцов **H**-матрицы. При появлении единицы производится операция XOR над текущим битом синдрома и соответствующим битом кодового слова;
- 6) блок детектирования двукратной смежной ошибки путем сравнения полученного синдрома с синдромами двукратных смежных ошибок, являющихся результатом операции XOR над двумя соседними столбцами **H**-матрицы;
- 7) блок детектирования двукратной несмежной ошибки. Двукратная несмежная ошибка детектируется, если двукратная смежная ошибка не обнаружена.

Алгоритм проходит большое количество итераций. Вероятность безошибочного детектирования

двойной несмежной ошибки определяется отношением количества исходов детектирования двукратной несмежной ошибки к общему количеству кодовых слов с внесенной двукратной несмежной ошибкой, прошедших через алгоритм.

Для того, чтобы определить ресурсы, требуемые для реализации кодера и декодера кодов (количество логических элементов), проведено имитационное моделирование. Для этого была разработана программа на языке VHDL в среде разработки *Quartus*³. Функциональная отладка производилась в среде *ModelSim*⁴.

Логические части кодера:

- 1) блок инициализации переменных (тактового сигнала CLK, входного информационного слова и выходного кодового слова);
- 2) блок кодирования. При изменении сигнала CLK запускается цикл кодирования битов контрольной суммы в соответствии с **G**-матрицей при помощи операции XOR;
- 3) блок вывода кодового слова (исходного информационного слова и контрольной суммы).

Логические части декодера:

- 1) блок инициализации переменных (тактового сигнала CLK, входного кодового слова, выходного откорректированного слова);
- 2) блок определения синдрома ошибки. При изменении сигнала CLK запускается цикл для битов кодового слова, и в соответствии с **H**-матрицей подсчитывается синдром ошибки;
- 3) блок декодирования. Сначала проверяется случай без ошибки (если синдром является нулевым). Если синдром ненулевой, происходит сравнение полученного синдрома с синдромами одиночных ошибок и коррекция ошибок. Если совпадений с синдромами одиночных ошибок нет, то происходит сравнение с синдромами двойных смежных ошибок и коррекция ошибок. Если совпадений с синдромами нет, то детектируется несмежная ошибка;
- 4) блок вывода откорректированного слова.

Имитационное моделирование проводилось для ПЛИС FPGA Cyclone IV E EP4CE6E22A7 (производитель – Intel, США). В результате синтеза подсчитывалось количество используемых логических элементов кодера и декодера.

В соответствии с представленным описанием были разработаны функциональные и имитационные модели для нескольких кодов. Основным критерий выбора исследуемых кодов – явное описание в научно-технической литературе **H**-матриц кодов. В этом

³ http://altera.ru/soft_quartus.html. Дата обращения 16.02.2023. / Accessed February 16, 2023.

⁴ <https://altera.co.uk/products/software/quartus-ii/modelsim/qts-modelsim-index.html>. Дата обращения 16.02.2023. / Accessed February 16, 2023.

² <https://visualstudio.microsoft.com/ru/> (in Russ.). Дата обращения 16.02.2023. / Accessed February 16, 2023.

случае исключается вероятность некорректной генерации проверочной матрицы, упрощается процесс исследования и минимизируется вероятность получения погрешности в моделируемых результатах. Таким образом, в качестве исследуемых были выбраны следующие коды с 32-битным информационным словом: Дутта (39, 32) [17], Датта (42, 32) [18], Нила (42, 32) [19], Ревирегио (39, 32) [20], Ча – Юна (39, 32) [21], Хоюна – Йонгсурка (41, 32) [22].

Помимо кодов SEC-DED-DAEC представлены для сравнения данные для одного SEC-DED-кода, а именно, для кода Хсяо [13], который широко используется при реализации механизма EDAC для памяти.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных исследований представлены в таблице. Приведенные данные показывают, что лидирующие позиции заняты кодами Датта, Нила и Хоюна – Йонгсурка. Код Хсяо показывает средние значения по выбранным критериям сравнения, при этом он не исправляет 2 смежные ошибки. Сравнивая их между собой применительно к использованию для сканирования конфигурационной SRAM-памяти ПЛИС, можно сделать следующие рекомендации.

Таблица. Сравнение кодов SEC-DED-DAEC по критериям безошибочного детектирования двойной несмежной ошибки и сложности реализации

Код	Вероятность безошибочного детектирования двойной несмежной ошибки	Количество логических элементов кодера/декодера
Хсяо (39, 32)	63.4	164/332
Дутта (39, 32)	43.5	170/407
Датта (40, 32)	78.9	164/354
Нила (42, 32)	84.4	57/391
Ревирегио (39, 32)	38.4	175/373
Ча – Юна (39, 32)	60.7	123/272
Хоюна – Йонгсурка (41, 32)	95.7	178/384

Для кода Датта избыточность кодового слова выровнена к размерности байта, что может упростить построение конфигурационной памяти ПЛИС. Вероятность ошибочного детектирования двойной несмежной ошибки хотя и является худшей рассматриваемой тройки кодов, но немного уступает по этому показателю коду Нила. Сложности кодера и декодера кода низкие, сложность кодера средние.

Для кода Нила избыточность кодового слова не выровнена по границе байта. Вероятность ошибочного детектирования двойной несмежной ошибки средняя, но на достаточно высоком уровне. Сложность кодера очень низкая, сложность декодера самая высокая.

Избыточность для кода Хоюна – Йонгсурка также не выровнена по границе байта. Вероятность ошибочного детектирования двойной несмежной ошибки наилучшая. Сложность кодера наивысшая, сложность декодера средняя.

Выбор для реализации того или иного кода необходимо осуществить, учитывая исходные данные к планируемой космической миссии. Если в проекте критичны простота и скорость реализации при приемлемой вероятности ложного детектирования двойной несмежной ошибки в условиях низкой интенсивности радиационных сбоев, можно рекомендовать применять в EDAC-механизме конфигурационной памяти код Датта. Код Нила может также претендовать на эту позицию, но он имеет наибольшую избыточность, причем не выровненную по границе байта. Если планируемая космическая миссия долговременна и будет осуществляться в условиях высокой интенсивности сбоев, то лучше использовать код Хоюна – Йонгсурка, несмотря на его относительную сложность реализации и низкую производительность.

Кроме того, отметим, что сложность анализируемой тройки кодов, выраженная в количестве необходимых логических элементов для реализации кодера/декодера, в среднем соответствует сложности обычно применяемого кода Хсяо. Поэтому их реализация для целей сканирования конфигурационной памяти с целью скраббинга с точки зрения использования ресурсов ПЛИС не вызывает проблем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложено изменить алгоритм метода внутреннего сканирования для внутреннего скраббинга конфигурационной памяти SRAM ПЛИС: вместо одного из кодов SEC-DED, например, кода Хсяо, предлагается использовать один из кодов SEC-DED-DAEC. В этом случае в конфигурационной SRAM-памяти будет исправляться и одна ошибка, и две смежные ошибки, что уменьшит количество запусков внешнего частичного скраббинга конфигурационной памяти для исправления ошибок двойной и большей кратности, а значит, уменьшит время простоя имплементированной в ПЛИС системы, связанного с выполнением скраббинга.

Коды SEC-DED-DAEC обладают одним отрицательным свойством – ненулевой вероятностью ошибочного детектирования (а затем ошибочного исправления) двойной несмежной ошибки. Кроме

того, они обладают разной избыточностью для хранения контрольной суммы в SRAM-памяти, а также различной сложностью реализации, которую можно оценить по требуемому количеству логических элементов для реализации кодера/декодера. Было приведено исследование по определению наиболее эффективного кода в соответствии с данными критериями среди SEC-DED-DAEC-кодов с известными проверочными матрицами. Результаты исследования показали, что наилучшими с указанных позиций являются коды Датта, Нила и Хоюна – Йонгсурска. Код Хоюна – Йонгсурска обладает практически нулевой вероятностью ошибочного детектирования двойной смежной ошибки, но при этом имеет наибольшую сложность. Код Датта наиболее прост в реализации, но вероятность ошибочного детектирования двойной несмежной ошибки равна приблизительно 20%. Код Нила занимает промежуточную позицию. При

проектировании выбор конкретного кода должен определяться требованиями к планируемой космической миссии.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90052.

Acknowledgments

The reported study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-38-90052.

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. Максименко С.Л., Мелехин В.Ф., Филиппов А.С. Анализ проблемы построения радиационно-стойких информационно-управляющих систем. *Информационно-управляющие системы*. 2012;2(57):18–25. URL: <http://www.i-us.ru/index.php/ius/article/view/13788>
2. Gaillard R. Single Event Effects: Mechanisms and Classification. In: Nicolaidis M. (Ed.). *Soft Errors in Modern Electronic Systems. Frontiers in Electronic Testing*. Boston, MA: Springer; 2011. V. 41. P. 27–54. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6993-4_2
3. Kastensmidt F.L., Sterpone L., Carro L., Reorda M.S. On the Optimal Design of Triple Modular Redundancy Logic for SRAM-based FPGAs. In: *Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*. 2005. P. 1290–1295. <https://doi.org/10.1109/DATE.2005.229>
4. Cheng D., Qi D., Chen M. Radiation-hardened Test Design for Aerospace SoC. In: *2020 IEEE 5th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)*. 2020. P. 213–217. <https://doi.org/10.1109/ICICM50929.2020.9292308>
5. Mang I., Mang E., Popescu C. VHDL implementation of an error detection and correction module based on Hamming code. *J. Comput. Sci. Control Syst.* 2011;4(2): 43–46.
6. Baviera E., Schettino G.M., Tuniz E., Vatta F. Software Implementation of Error Detection and Correction Against Single-Event Upsets. In: *2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. 2020. <https://doi.org/10.23919/SoftCOM50211.2020.9238173>
7. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы: курс молодого бойца: пер. с англ. М.: Додэка-XXI; 2007. 408 с.

REFERENCES

1. Maksimenko S.L., Melekhin V.F., Filippov A.S. Analysis of the problem of radiation-tolerant information and control-systems implementation. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2012;2(57):18–25 (in Russ.). Available from URL: <http://www.i-us.ru/index.php/ius/article/view/13788>
2. Gaillard R. Single Event Effects: Mechanisms and Classification. In: Nicolaidis M. (Ed.). *Soft Errors in Modern Electronic Systems. Frontiers in Electronic Testing*. Boston, MA: Springer; 2011. V. 41. P. 27–54. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6993-4_2
3. Kastensmidt F.L., Sterpone L., Carro L., Reorda M.S. On the Optimal Design of Triple Modular Redundancy Logic for SRAM-based FPGAs. In: *Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*. 2005. P. 1290–1295. <https://doi.org/10.1109/DATE.2005.229>
4. Cheng D., Qi D., Chen M. Radiation-hardened Test Design for Aerospace SoC. In: *2020 IEEE 5th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)*. 2020. P. 213–217. <https://doi.org/10.1109/ICICM50929.2020.9292308>
5. Mang I., Mang E., Popescu C. VHDL implementation of an error detection and correction module based on Hamming code. *J. Comput. Sci. Control Syst.* 2011;4(2):43–46.
6. Baviera E., Schettino G.M., Tuniz E., Vatta F. Software Implementation of Error Detection and Correction Against Single-Event Upsets. In: *2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. 2020. <https://doi.org/10.23919/SoftCOM50211.2020.9238173>
7. Maksfeld K. *Proektirovanie na PLIS. Arkhitektura, sredstva i metody: kurs molodogo boitsa (The Design Warrior's Guide to FPGAs: Devices, Tools and Flows.)*: transl. from Engl. Moscow: Dodeka-XXI; 2007. 408 p. (in Russ.).

8. Виртлин М., Хардинт А. Гибридная очистка конфигурации для ПЛИС компании Xilinx. В кн.: *ПЛИС и параллельные структуры в аэрокосмической области. Программные ошибки и отказоустойчивое проектирование*; под ред. Ф. Канстеншмидт, П. Реха. М.: Техносфера; 2018. 326 с.
9. Соколов А. Программно-аппаратные методы повышения радиационной стойкости микросхем SRAM ПЛИС. *Современная электроника*. 2014;6:30–33.
10. Zhang R., Xiao L., Li J., Cao X., Li L. An Adjustable and Fast Error Repair Scrubbing Method Based on Xilinx Essential Bits Technology for SRAM-Based FPGA. *IEEE Transactions on Reliability*. 2020;69(2):430–439. <https://doi.org/10.1109/TR.2019.2896897>
11. Цетин Э., Диззель О., Ли Т. и др. Обзор и исследование методов обнаружения и устранения одиночных сбоев для гетерогенных систем на основе ПЛИС. В кн.: *ПЛИС и параллельные структуры в аэрокосмической области. Программные ошибки и отказоустойчивое проектирование*; под ред. Ф. Канстеншмидт, П. Реха. М.: Техносфера; 2018. 326 с.
12. Флеминг Ш.Т., Томас Д.В., Винтерстейн Ф. Энергосберегающая адаптивная платформа FDIR, применяющая модули гетерогенных систем на кристалле. В кн.: *ПЛИС и параллельные структуры в аэрокосмической области. Программные ошибки и отказоустойчивое проектирование*; под ред. Ф. Канстеншмидт, П. Реха. М.: Техносфера; 2018. 326 с.
13. Hsiao M.Y. A class of optimal minimum odd-weight-column SEC-DED codes. *IBM J. Res. Develop.* 1970;14(4):395–401. <https://doi.org/10.1147/rd.144.0395>
14. Hamming R.W. Error detecting and error correcting codes. *Bell System technical journal*. 1950;29(2):147–160. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>
15. Чумаков А.И., Согоян А.В., Боруздина А.Б. и др. Механизмы многократных сбоев в микросхемах памяти. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2016;4:145–152. URL: <http://www.mes-conference.ru/data/year2016/pdf/D188.pdf>
16. Краснюк А.А., Петров К.А. Особенности применения методов помехоустойчивого кодирования в суб-100-нм микросхемах памяти для космических систем. *Микроэлектроника*. 2012;41(6):450–456.
17. Dutta A., Toubia N.A. Multiple Bit Upset Tolerant Memory Using a Selective Cycle Avoidance Based SEC-DED-DAEC Code. In: *25th IEEE VLSI Test Symposium (VTS'07)*. 2007. P. 349–354. <https://doi.org/10.1109/VTS.2007.40>
18. Datta R., Toubia N.A. Exploiting unused spare columns to improve memory ECC. In: *27th IEEE VLSI Test Symposium*. 2009. P. 47–52. <https://doi.org/10.1109/VTS.2009.52>
19. Neale A., Sachdev M. A new SEC-DED error correction code subclass for adjacent MBU tolerance in embedded memory. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2013;13(1):223–230. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2012.2232671>
20. Reviriego P., Liu S.S., Sánchez-Macián A., Xiao L., Maestro J.A. Unequal error protection codes derived from SEC-DED codes. *Electron. Lett.* 2016;52(8):619–620. <https://doi.org/10.1049/el.2016.0077>
- [Maxfield C. *The Design Warrior's Guide to FPGAs: Devices, Tools and Flows*. Oxford, UK: Jordan Hill; 2004. 560 p.]
8. Virtlin M., Khardint A. Hybrid Clear Configuration for Xilinx FPGAs. In: *PLIS i parallel'nye struktury v aerokosmicheskoi oblasti. Programmnye oshibki i otkazoustoichivoe proektirovanie (FPGAs and Parallel Architectures for Aerospace Applications. Soft Errors and Fault-Tolerant Design)*. Kastensmidt F., Rech P. (Eds.). Moscow: Tekhnosfera; 2018. 326 p. (in Russ.).
9. Sokolov A. Software and hardware methods of radiation hardening of microprocessors based control systems. *Sovremennaya Elektronika*. 2014;6:30–33 (in Russ.).
10. Zhang R., Xiao L., Li J., Cao X., Li L. An Adjustable and Fast Error Repair Scrubbing Method Based on Xilinx Essential Bits Technology for SRAM-Based FPGA. *IEEE Transactions on Reliability*. 2020;69(2):430–439. <https://doi.org/10.1109/TR.2019.2896897>
11. Tsetin E., Dizzel' O., Li T., et al. Review and study of methods for detecting and eliminating single failures for heterogeneous systems based on FPGAs. In: *PLIS i parallel'nye struktury v aerokosmicheskoi oblasti. Programmnye oshibki i otkazoustoichivoe proektirovanie (FPGAs and Parallel Architectures for Aerospace Applications. Soft Errors and Fault-Tolerant Design)*. Kastensmidt F., Rech P. (Eds.). Moscow: Tekhnosfera; 2018. 326 p. (in Russ.).
12. Fleming Sh., Tomas D., Vintersteyn F. Energy-saving adaptive FDIR platform using heterogeneous system-on-chip modules. In book: *PLIS i parallel'nye struktury v aerokosmicheskoi oblasti. Programmnye oshibki i otkazoustoichivoe proektirovanie (FPGAs and Parallel Architectures for Aerospace Applications. Soft Errors and Fault-Tolerant Design)*. Kastensmidt F., Rech P. (Eds.). Moscow: Tekhnosfera; 2018. 326 p. (in Russ.).
13. Hsiao M.Y. A class of optimal minimum odd-weight-column SEC-DED codes. *IBM J. Res. Develop.* 1970;14(4):395–401. <https://doi.org/10.1147/rd.144.0395>
14. Hamming R.W. Error detecting and error correcting codes. *Bell System technical journal*. 1950;29(2):147–160. Available from URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>
15. Chumakov A.I., Sogoyan A.V., Boruzdina A.B., et al. Mechanisms of multiple cell upsets in memory. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development*. 2016;4:145–152 (in Russ.).
16. Krasnyuk A.A., Petrov K.A. Application features of the error correction coding in sub-100-nm memory microcircuits for cosmic systems. *Russ. Microelectron.* 2013;42(1):53–58. <https://doi.org/10.1134/S1063739712040087> [Original Russian Text: Krasnyuk A.A., Petrov K.A. Application features of the error correction coding in sub-100-nm memory microcircuits for cosmic systems. *Mikroelektronika*. 2012;41(6):450–456 (in Russ.).]
17. Dutta A., Toubia N.A. Multiple Bit Upset Tolerant Memory Using a Selective Cycle Avoidance Based SEC-DED-DAEC Code. In: *25th IEEE VLSI Test Symposium (VTS'07)*. 2007. P. 349–354. <https://doi.org/10.1109/VTS.2007.40>

21. Cha S., Yoon H. Efficient implementation of single error correction and double error detection code with check bit pre-computation for memories. *JSTS: J. Semiconductor Technol. Sci.* 2018;12(4):418–425. <https://doi.org/10.5573/JSTS.2012.12.4.418>
22. Hoyoon Jun, Yongsurk Lee. Protection of On-chip Memory Systems against Multiple Cell Upsets Using Double-adjacent Error Correction Codes. *Int. J. Computer Inform. Technol.* 2014;3(6):1316–1320. URL: <https://www.ijcit.com/archives/volume3/issue6/Paper030621.pdf>
18. Datta R., Toubia N.A. Exploiting unused spare columns to improve memory ECC. In: *27th IEEE VLSI Test Symposium*. 2009. P. 47–52. <https://doi.org/10.1109/VTS.2009.52>
19. Neale A., Sachdev M. A new SEC-DED error correction code subclass for adjacent MBU tolerance in embedded memory. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2013;13(1):223–230. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2012.2232671>
20. Reviriego P., Liu S.S., Sánchez-Macián A., Xiao L., Maestro J.A. Unequal error protection codes derived from SEC-DED codes. *Electron. Lett.* 2016;52(8):619–620. <https://doi.org/10.1049/el.2016.0077>
21. Cha S., Yoon H. Efficient implementation of single error correction and double error detection code with check bit pre-computation for memories. *JSTS: J. Semiconductor Technol. Sci.* 2018;12(4):418–425. <https://doi.org/10.5573/JSTS.2012.12.4.418>
22. Hoyoon Jun, Yongsurk Lee. Protection of On-chip Memory Systems against Multiple Cell Upsets Using Double-adjacent Error Correction Codes. *Int. J. Computer Inform. Technol.* 2014;3(6):1316–1320. Available from URL: <https://www.ijcit.com/archives/volume3/issue6/Paper030621.pdf>

Об авторах

Лепёшкина Екатерина Сергеевна, ассистент, кафедра безопасности информационных технологий; инженер, лаборатория «Малые космические аппараты», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (660037, Россия, Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31). E-mail: klepka1111.93@mail.ru. Scopus Author ID 57218577296, SPIN-код РИНЦ 8746-6555, <https://orcid.org/0000-0001-5116-6260>

Кустов Никита Дмитриевич, ассистент, кафедра безопасности информационных технологий; инженер, лаборатория «Малые космические аппараты», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (660037, Россия, Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31). E-mail: kustovnd@yandex.ru. Scopus Author ID 57218577358, SPIN-код РИНЦ 9031-4516, <https://orcid.org/0000-0002-3362-3971>

Ханов Владислав Ханифович, к.т.н., доцент, кафедра безопасности информационных технологий; заведующий лабораторией «Малые космические аппараты», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (660037, Россия, Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31). E-mail: khvkh@mail.ru. Scopus Author ID 56491191500, SPIN-код РИНЦ 5197-5699, <https://orcid.org/0000-0001-6720-9405>

About the authors

Ekaterina S. Lepeshkina, Assistant, Information Technology Security Department; Engineer, “Small Satellite” Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Reshetnev University). (31, Krasnoyarsky Rabochoy pr., Krasnoyarsk, 660037 Russia). E-mail: klepka1111.93@mail.ru. Scopus Author ID 57218577296, RSCI SPIN-code 8746-6555, <https://orcid.org/0000-0001-5116-6260>

Nikita D. Kustov, Assistant, Information Technology Security Department; Engineer, “Small Satellite” Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Reshetnev University). (31, Krasnoyarsky Rabochoy pr., Krasnoyarsk, 660037 Russia). E-mail: kustovnd@yandex.ru. Scopus Author ID 57218577358, RSCI SPIN-code 9031-4516, <https://orcid.org/0000-0002-3362-3971>

Vladislav Kh. Khanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Information Technology Security Department; Head of the “Small Satellite” Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Reshetnev University). (31, Krasnoyarsky Rabochoy pr., Krasnoyarsk, 660037 Russia). E-mail: khvkh@mail.ru. Scopus Author ID 56491191500, RSCI SPIN-code 5197-5699, <https://orcid.org/0000-0001-6720-9405>

УДК 537.63: 538.955: 538.956
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-63-70>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Нелинейный магнитоэлектрический эффект в кольцевой композитной гетероструктуре

В.И. Мусатов[®],
Ф.А. Федулов,
Д.В. Савельев,
Е.В. Болотина,
Л.Ю. Фетисов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: musatov.v.i@mail.ru

Резюме

Цели. Актуальность исследования магнитоэлектрических (МЭ) характеристик кольцевых гетероструктур «ферромагнетик-пьезоэлектрик» обусловлена созданием на их основе МЭ-устройств с улучшенными характеристиками. Целью настоящей работы является детальное исследование нелинейного МЭ-эффекта в кольцевой композитной гетероструктуре на основе пьезокерамики цирконата-титаната свинца (ЦТС) и аморфного ферромагнитного (ФМ) сплава Metglas[®] при ее циркулярном намагничивании.

Методы. МЭ-эффект исследован методом низкочастотной модуляции магнитного поля. Возбуждающее переменное и постоянное магнитные поля смещения были созданы при помощи тороидальной катушки, намотанной на гетероструктуру, для циркулярного намагничивания ферромагнитного слоя.

Результаты. Обнаружен нелинейный МЭ-эффект, заключающийся в генерации высших гармоник МЭ-напряжения при возбуждении структуры циркулярными магнитными полями в нерезонансном режиме. Исследованы полевые и амплитудные зависимости первых трех гармоник МЭ-напряжения. Получены МЭ-коэффициенты для линейного МЭ-эффекта $\alpha^{(1)} = 5.2 \text{ мВ}/(\text{Э}\cdot\text{см})$ и для нелинейного МЭ-эффекта $\alpha^{(2)} = 6 \text{ мВ}/(\text{Э}^2\cdot\text{см})$ и $\alpha^{(3)} = 0.15 \text{ мВ}/(\text{Э}^3\cdot\text{см})$ при частоте переменного магнитного поля $f = 1 \text{ кГц}$. Максимумы амплитуд 1-й и 3-й гармоник наблюдались при постоянном магнитном поле $H \sim 7 \text{ Э}$, что почти в два раза меньше, чем в планарных гетероструктурах ЦТС–Metglas[®].

Выводы. Обнаружен и исследован нелинейный МЭ-эффект в кольцевой структуре на основе пьезокерамики ЦТС и аморфного ФМ-сплава Metglas[®]. Вследствие отсутствия размагничивания при циркулярном намагничивании замкнутого ФМ-слоя нелинейные МЭ-эффекты проявляются при значительно меньших амплитудах возбуждающего переменного и управляющего постоянного магнитных полей по сравнению с планарными гетероструктурами. Исследуемые кольцевые структуры могут быть использованы для создания на их основе умножителей частоты.

Ключевые слова: нелинейный магнитоэлектрический эффект, композитная гетероструктура, магнито-стрикция, ферромагнетик, пьезоэлектрический эффект

• Поступила: 23.03.2023 • Доработана: 27.04.2023 • Принята к опубликованию: 11.07.2023

Для цитирования: Мусатов В.И., Федулов Ф.А., Савельев Д.В., Болотина Е.В., Фетисов Л.Ю. Нелинейный магнитоэлектрический эффект в кольцевой композитной гетероструктуре. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):63–70. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-63-70>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Nonlinear magnetoelectric effect in a ring composite heterostructure

Vladimir I. Musatov[®],
Fedor A. Fedulov,
Dmitrii V. Savelev,
Ekaterina V. Bolotina,
Leonid Y. Fetisov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: musatov.v.i@mail.ru

Abstract

Objectives. The relevance of the study of magnetoelectric (ME) effect in ring ferromagnetic–piezoelectric heterostructures is due to the possibility of creating various ME devices having improved characteristics. A detailed investigation of the nonlinear ME effect in a ring composite heterostructure based on lead zirconate titanate (PZT) piezoceramics and Metglas[®] amorphous ferromagnetic (FM) alloy under circular magnetization is presented.

Methods. The ME effect was measured by the low-frequency magnetic field modulation method. Excitation alternating- and constant magnetic bias fields were created using toroidal coils wound on a ring heterostructure for circular magnetization of the FM layer.

Results. When excited with circular magnetic fields in a non-resonant mode, the ME ring heterostructure generates a nonlinear ME voltage of higher harmonics. The field and amplitude dependencies of the first three ME voltage harmonics were investigated. ME coefficients were obtained for the linear ME effect $\alpha^{(1)} = 5.2 \text{ mV}/(\text{Oe}\cdot\text{cm})$, the nonlinear ME effect $\alpha^{(2)} = 6 \text{ mV}/(\text{Oe}^2\cdot\text{cm})$, and $\alpha^{(3)} = 0.15 \text{ mV}/(\text{Oe}^3\cdot\text{cm})$ at an excitation magnetic field frequency $f = 1 \text{ kHz}$. The maximum amplitudes of the 1st and 3rd harmonics were observed at a constant bias magnetic field $H \sim 7 \text{ Oe}$, which is almost two times smaller than in planar PZT–Metglas[®] heterostructures.

Conclusions. A nonlinear ME effect was observed and investigated in a ring heterostructure based on PZT piezoceramics and Metglas[®] amorphous FM alloy. Due to the absence of demagnetization during circular magnetization of the closed FM layer, nonlinear ME effects are detected at significantly lower amplitudes of the exciting alternating and constant bias magnetic fields as compared to planar heterostructures. The investigated ring heterostructures are of potential use in the creation of frequency multipliers.

Keywords: nonlinear magnetoelectric effect, composite heterostructure, magnetostriction, ferromagnet, piezoelectric effect

• Submitted: 23.03.2023 • Revised: 27.04.2023 • Accepted: 11.07.2023

For citation: Musatov V.I., Fedulov F.A., Savelev D.V., Bolotina E.V., Fetisov L.Y. Nonlinear magnetoelectric effect in a ring composite heterostructure. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):63–70. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-63-70>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитоэлектрические (МЭ) эффекты в композитных мультиферроидных гетероструктурах, содержащих механически связанные пьезоэлектрические (ПЭ) и ферромагнитные (ФМ) слои, заключаются в возникновении поляризации образца при помещении структуры во внешнее магнитное поле вследствие комбинации магнитострикции ФМ-слоя и пьезоэлектрического эффекта в ПЭ-слое [1]. Такие структуры представляют большой интерес ввиду их практического применения для создания высокочувствительных датчиков переменных и постоянных магнитных полей, актюаторов, устройств обработки радиосигналов, трансформаторов и т.д. [2–5].

В последнее время возрастает интерес к исследованию кольцевых композитных гетероструктур, состоящих из ПЭ- и ФМ-слоев. В подобных гетероструктурах на основе пьезокерамики цирконата-титаната свинца (ЦТС) и ФМ-слоев на основе Ni и аморфного ФМ-сплава Metglas® наблюдали линейный МЭ-эффект и исследовали его характеристики при намагничивании внешним полем в плоскости или вдоль оси кольца [6–8]. На основе МЭ кольцевых композитных гетероструктур были изготовлены трансформаторы с перестраиваемым коэффициентом трансформации [9] и индукторы [10], в которых индуктивность перестраивается на 1000% под действием постоянных магнитных и электрических полей. Помимо этого, были предложены различные конструкции датчиков тока на основе кольцевых МЭ-структур [11].

Широкий интерес вызывает исследование нелинейных эффектов в МЭ-гетероструктурах, таких как генерация гармоник и комбинационных частот, бистабильность, подавление гистерезиса [12], на основе которых возможно создание устройств умножения частоты и анализа спектра переменных магнитных полей. Исследование подобных эффектов в планарных гетероструктурах требует постоянных и переменных магнитных полей порядка единиц – десятков эрстед вследствие значительного влияния эффектов размагничивания в ФМ-слое.

В то же время, перспективным представляется циркулярное намагничивание кольцевых гетероструктур [13]. В этом случае, ввиду кольцевой формы ФМ-слоя, магнитный поток в нем замкнут,

что должно приводить к значительному снижению эффектов размагничивания и увеличению эффективности МЭ-преобразования за счет уменьшения управляющих магнитных полей. В связи с вышеизложенным изучение нелинейных МЭ-эффектов в кольцевых структурах при циркулярном намагничивании представляет большой интерес. Насколько известно авторам, исследования нелинейных МЭ-эффектов в кольцевых структурах, возбуждаемых циркулярно направленными магнитными полями, ранее не проводились.

В настоящей работе обнаружен и изучен нелинейный МЭ-эффект генерации гармоник напряжения в двухслойной кольцевой гетероструктуре, состоящей из пьезокерамики ЦТС-19, и ленты аморфного магнитного сплава Metglas®, при циркулярном намагничивании переменным и постоянным магнитным полем.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Схематическое изображение и внешний вид исследованной двухслойной гетероструктуры представлены на рис. 1. Исследуемая гетероструктура представляла собой двухслойное кольцо с внешним слоем из пьезокерамики ЦТС-19 (производитель – НИИ ЭЛПА, Россия) и внутренним слоем из аморфного магнитного сплава Metglas® 2605SA1 (Metglas Inc., США), концы которого были соединены между собой внахлест. Соединение слоев обеспечивалось за счет цианоакрилатного клея толщиной ~3 мкм (Weiss, CA-500.200, Германия). Перекрытие противоположных концов аморфной ленты составляло менее 1 мм. Лента аморфного ФМ-сплава имела длину $L_m = 50.2$ мм, толщину $a_m \approx 27$ мкм и ширину $w_m = 5$ мм. Магнитострикция насыщения Metglas® $\lambda_s \approx 25 \cdot 10^{-6}$ и магнитная проницаемость $\mu \approx 10^4$. Радиально поляризованное кольцо из пьезокерамики состава $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (ЦТС) имело внутренний диаметр 16 мм, толщину $a_p = 1$ мм и ширину $w_p = 5$ мм. На внешнюю и внутреннюю поверхности ЦТС-кольца нанесены Ag-электроды. Пьезокерамика ЦТС-19 характеризуется значениями пьезомодуля $d_{31} = 175$ пКл/Н и относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon = 1750$.

На кольцо намотаны две тороидальные катушки медного провода диаметром 0.2 мм с числом витков

$N = 90$. Витки катушек равномерно распределены по длине кольца. Одна катушка создает управляющее циркулярное постоянное магнитное поле $H = 0\text{--}115$ Э при пропускании через нее тока величиной $I_{dc} = 0\text{--}5$ А от источника питания АКТАКОМ APS-7305 (АКТАКОМ, Россия). Циркулярное переменное магнитное поле $h\cos(2\pi ft)$ амплитудой до $h = 3.45$ Э и частотой $f = 0\text{--}100$ кГц создавали второй катушкой, подключенной к генератору сигналов Agilent 33210A (Agilent Technologies Inc., США). Величину магнитного поля определяли аналитически с помощью формулы $H = \frac{NI}{2\pi r}$, где r – средняя линия тороидальной катушки, N – число витков и I – сила тока, протекающего в катушке. Частотные спектры МЭ-напряжения регистрировали при помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS3032B (Tektronix Inc., США).

В процессе исследования были получены осциллограммы напряжения u и Фурье-спектры при различных амплитудах возбуждающего h и постоянного H магнитных полей, на основе которых были построены полевые и амплитудные зависимости 1-й, 2-й и 3-й гармоник выходного МЭ-напряжения гетероструктуры.

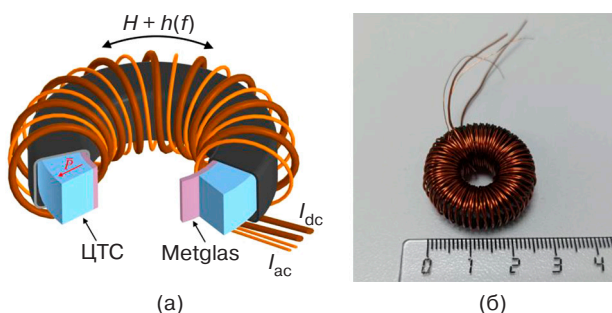


Рис. 1. Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) кольцевой гетероструктуры ЦТС–Metglas® с тороидальными катушками

РЕЗУЛЬТАТЫ

При возбуждении структуры переменным магнитным полем амплитудой $h = 0\text{--}3.45$ Э с частотой $f_1 = 1$ кГц в циркулярном постоянном поле $H = 0\text{--}115$ Э обнаружен нелинейный МЭ-эффект возбуждения гармоник МЭ-напряжения. Измерения проводили вдали от резонансной частоты структуры $f_0 \approx 54.2$ кГц. В спектре, измеренном при $H = 0.45$ Э и $h = 3.45$ Э (рис. 2), наблюдается 16 пиков, соответствующих гармоникам МЭ-напряжения с частотами $f_n = f_1 \cdot n$, где n – целое число. Амплитуды первых трех пиков составляли $u^{(1)} = 1.8$ мВ, $u^{(2)} = 7.15$ мВ и $u^{(3)} = 0.6$ мВ.

Величины МЭ-коэффициентов 1-й, 2-й и 3-й гармоник можно оценить, как $\alpha^{(n)} = u^{(n)} / (h^n a_p)$.

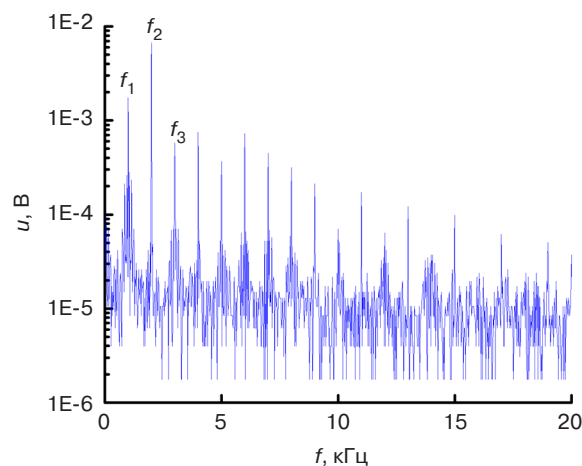


Рис. 2. Фурье-спектр МЭ-напряжения кольцевой гетероструктуры при $h = 3.45$ Э с частотой $f_1 = 1$ кГц и $H = 0.45$ Э

Отсюда $\alpha^{(1)} = 5.2$ мВ/(Э·см), $\alpha^{(2)} = 6$ мВ/(Э²·см) и $\alpha^{(3)} = 0.15$ мВ/(Э³·см) соответственно. При отсутствии постоянного магнитного поля наблюдалась генерация только четных гармоник. Возникновение гармоник обусловлено нелинейной зависимостью магнитострикции $\lambda(H)$ ФМ-слоя от постоянного магнитного поля [13].

На рис. 3 приведены зависимости амплитуд 1-й, 2-й и 3-й гармоник от постоянного магнитного поля H при $h = 3.45$ Э, построенные на основе полученных Фурье-спектров МЭ-напряжения. Форма зависимости $u^{(1)}(H)$ для первой гармоники, приведенная на рис. 3а, имеет типичный вид, характерный для линейного МЭ-эффекта. Максимум амплитуды $u_{\max}^{(1)} = 13.4$ мВ достигается в поле $H_m^{(1)} \approx 6.8$ Э с последующим монотонным спадом при увеличении постоянного магнитного поля до $H = 115$ Э. Максимум МЭ-напряжения соответствует наибольшему значению пьезомагнитного коэффициента ФМ-слоя структуры $\lambda^{(1)}(H) = \partial\lambda / \partial H|_H$, где $\lambda(H)$ – зависимость магнитострикции ФМ-слоя от поля H .

На рис. 3б приведены зависимости амплитуд второй $u^{(2)}(H)$ и третьей $u^{(3)}(H)$ гармоник от постоянного магнитного поля H . Амплитуда второй гармоники $u_{\max}^{(2)} = 7.15$ мВ максимальна при $H_m^{(2)} = 0$, а затем монотонно спадает с увеличением поля и достигает минимума $u_{\min}^{(2)} = 0.1$ мВ при $H = H_m^{(2)} \approx 5.6$ Э. Отметим, что на графике $u^{(2)}(H)$ отсутствует локальный минимум и последующий локальный максимум, который характерен для полевой зависимости 2-й гармоники в планарных гетероструктурах [14, 15].

Амплитуда 3-й гармоники при $H = 0$ имеет значение $u^{(3)} \approx 0.4$ мВ. При увеличении магнитного поля наблюдаются два локальных максимума $u_{1\max}^{(3)} = 1.2$ мВ и $u_{2\max}^{(3)} = 1.4$ мВ в полях $H_{1m}^{(3)} \approx 0.9$ Э и $H_{2m}^{(3)} \approx 1.4$ Э

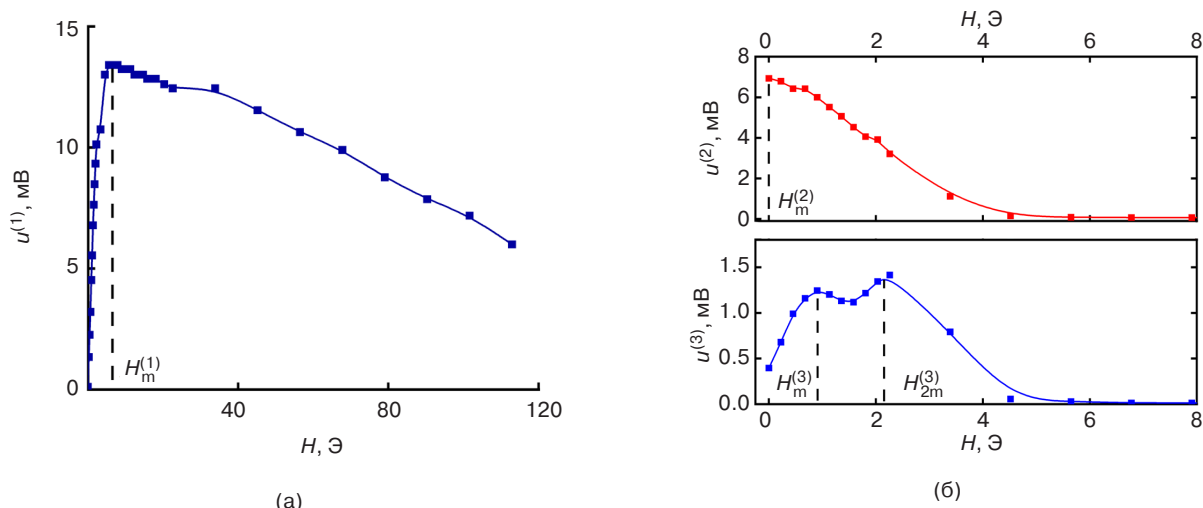


Рис. 3. Зависимости амплитуд 1-й (а), 2-й и 3-й (б) гармоник МЭ-напряжения кольцевой гетероструктуры от постоянного магнитного поля H

соответственно. Затем амплитуда 3-й гармоники монотонно уменьшается до нуля при $H \sim 5.6$ Э.

На рис. 4 показаны зависимости амплитуд 1-й, 2-й и 3-й гармоник от амплитуды возбуждающего переменного магнитного поля h . Измерения проводили в оптимальных магнитных полях H_m , полученных из кривых, приведенных на рис. 3: $H_m^{(1)} \approx 6.8$ Э, $H_m^{(2)} = 0$ Э и $H_m^{(3)} = 1.4$ Э соответственно.

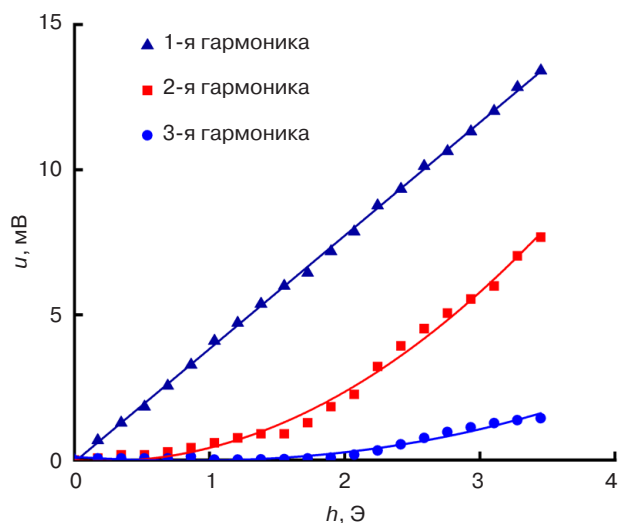


Рис. 4. Зависимости амплитуд 1-й, 2-й и 3-й гармоник МЭ-напряжения от амплитуды поля h при $H_m^{(1)} = 6.8$ Э, $H_m^{(2)} = 0$ Э и $H_m^{(3)} = 1.4$ Э соответственно. Сплошные линии – степенная аппроксимация

Видно, что амплитуда 1-й гармоники линейно зависит от величины h во всем диапазоне амплитуд переменных магнитных полей $h = 0-3.45$ Э. Амплитуда 2-й гармоники росла пропорционально h^2 во всем диапазоне. Амплитуда 3-й гармоники пропорциональна h^3 . Такой вид зависимостей соответствует теоретическим расчетам МЭ-напряжения $u^{(n)} \sim h^n$ [14],

где n – порядковый номер гармоники, h – амплитуда переменного магнитного поля.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возникновение гармоник МЭ-напряжения обусловлено нелинейной зависимостью магнитострикции ФМ-слоя от магнитного поля. Раскладывая функцию, описывающую магнитострикцию $\lambda(H)$, в ряд Тейлора в окрестности поля H при $H \ll h$, получим выражение:

$$\lambda(H) = \lambda(H_0) + qh + \frac{ph^2}{2} + \frac{mh^3}{4} \dots, \quad (1)$$

где q, p и m – 1-я, 2-я и 3-я производные магнитострикции по магнитному полю соответственно. Выражение для МЭ-напряжения можно записать в виде

$$u(H) = Ad\lambda(H), \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от параметров слоев композитной гетероструктуры и метода ее закрепления, d – пьезомодуль ПЭ-слоя.

Подставив в (2) выражение (1) и учитывая, что переменное магнитное поле задается как $h = h_0 \cos(2\pi ft)$, получим:

$$u(H) = u_0(H_0) + u_1 \cos(2\pi ft) + u_2 \cos(4\pi ft) + u_3 \cos(6\pi ft) \dots \quad (3)$$

Первое слагаемое в (3) обозначает постоянную составляющую МЭ-напряжения, второе – генерируемое МЭ-напряжение на частоте возбуждающего поля, третье и четвертое – описывают генерацию 2-й и 3-й гармоник МЭ-напряжения соответственно [16].

Насколько известно авторам, на данный момент нет опубликованных работ, в которых наблюдали множество гармоник высших порядков в плоской структуре аналогичного состава. Однако ранее в структуре лантанат–Metglas® [17] наблюдали ~100 гармоник, но при большей амплитуде накачки $h = 20\text{--}25$ Э переменного поля.

Результаты исследования нелинейного МЭ-эффекта в кольцевой структуре ФМ–ПЭ позволяют отметить некоторые особенности. В отличие от кольцевых структур, в планарных структурах магнитное поле внутри ФМ-слоя H_{in} связано с внешним полем H соотношением $H_{\text{in}} = \frac{H}{1 + N\mu}$, где N – размагничивающий фактор, μ – магнитная проницаемость ферромагнетика [18]. Отсюда следует, что размагничивание уменьшается как постоянное, так и возбуждающее переменное поле внутри ФМ-слоя в планарной гетероструктуре. В кольцевой гетероструктуре при циркулярном намагничивании магнитный поток в ФМ-слое замкнут, $N \approx 0$. Поэтому внутри ФМ-слоя $H_{\text{in}} \approx H$ и $h_{\text{in}} \approx h$, что приводит к изменению формы зависимости магнитострикции от внешнего поля $\lambda(H)$, в частности, к уменьшению поля насыщения магнитострикции.

В исследованной структуре, как следует из рис. 3, максимум 1-й гармоники наблюдали в поле $H_{\text{m}}^{(1)} \approx 6.8$ Э. Амплитуда $u^{(1)}$ достигала 90% от максимума в поле ~4 Э, что в несколько раз меньше, чем в планарных гетероструктурах ЦТС–Metglas® [19, 20].

Из-за отсутствия размагничивания в кольцевой гетероструктуре нелинейные МЭ-эффекты проявляются при меньших амплитудах внешнего возбуждающего поля h . По-видимому, это связано с изменением формы зависимости $\lambda(H)$ в кольцевой структуре. На графике зависимости амплитуды 2-й гармоники исчез локальный максимум, в то время как на графике зависимости 3-й гармоники – нет [17].

Величины МЭ-коэффициентов 2-й и 3-й гармоник можно оценить как $\alpha^{(2)} = u^{(2)}/(h^2 a_p) = 6 \text{ мВ}/(\text{Э}^2 \cdot \text{см})$ и $\alpha^{(3)} = u^{(3)}/(h^3 a_p) = 0.34 \text{ мВ}/(\text{Э}^3 \cdot \text{см})$ соответственно. Полученные значения МЭ-коэффициентов сравнимы с МЭ-коэффициентами в планарной структуре ЦТС–Metglas® аналогичного состава $\alpha^{(2)} = 9.6 \text{ мВ}/(\text{Э}^2 \cdot \text{см})$ и $\alpha^{(3)} = 0.4 \text{ мВ}/(\text{Э}^3 \cdot \text{см})$, измеренными при той же частоте возбуждающего поля [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе обнаружен нелинейный МЭ-эффект генерации высших гармоник МЭ-напряжения при возбуждении кольцевой двухслойной гетероструктуры ЦТС–Metglas® циркулярными магнитными полями в нерезонансном режиме. В ходе исследования наблюдали 16 гармоник МЭ-напряжения в нелинейном режиме при возбуждении

структуры переменным магнитным полем с частотой 1 кГц. Нелинейные МЭ-эффекты в кольцевой гетероструктуре обнаружены в меньших по сравнению с планарными структурами магнитных полях, что связано с практически отсутствующим эффектом размагничивания ФМ-слоя. В частности, максимальные амплитуды 1-й и 3-й гармоник наблюдали при $H \sim 7$ Э, что почти вдвое меньше, чем в планарных гетероструктурах ЦТС–Metglas®.

Полученные результаты показывают возможность создания на основе исследованных кольцевых МЭ-гетероструктур эффективных твердотельных умножителей частоты, возбуждаемых переменными магнитными полями порядка единиц эрстед.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-79-10128-П. Изготовление образцов выполнено при финансовой поддержке гранта «Для молодых ученых 2022–2023 РТУ МИРЭА» (НИЧ-57). Измерения Фурье-спектров выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА (ЦКП РТУ МИРЭА).

Acknowledgments

This work was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 19-79-10128-P. The samples were made with the financial support of grant “For young scientists 2022–2023 RTU MIREA” (NICH-57). Measurements of Fourier spectra were performed using equipment of the RTU MIREA Center for Collective Use.

Вклад авторов

В.И. Мусатов – подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований, хранение данных, подготовка графической информации, написание текста статьи.

Ф.А. Федулов – подготовка исследуемых образцов и установок, проверка данных, написание текста статьи.

Д.В. Савельев – проведение исследований, хранение данных, описание методики исследования.

Е.В. Болотина – проведение исследований, подготовка графической информации.

Л.Ю. Фетисов – проверка данных, написание текста статьи.

Authors' contributions

V.I. Musatov – preparing test samples and experimental setup, conducting research, data curation, preparing graphic information, and writing the text of the article.

F.A. Fedulov – preparing test samples and experimental setup, data checking, and writing the text of the article.

D.V. Savelev – conducting research, data curation, description of the research methodology.

E.V. Bolotina – conducting research, preparing graphic information.

L.Y. Fetisov – data checking and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kopyl S., Surmenev R., Surmeneva M., Fetisov Y., Kholkin A. Magnetolectric effect: principles and applications in biology and medicine – a review. *Materials Today Bio.* 2021;12:100149. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100149>
2. Azam T., Bukhari S.H., Liaqat U., Miran W. Emerging Methods in Biosensing of Immunoglobulin G – A Review. *Sensors.* 2023;23(2):676. <https://doi.org/10.3390/s23020676>
3. Herrera D.L., Kruk R., Leistner K., Sort J. Magnetolectric materials, phenomena, and devices. *APL Materials.* 2021;9(5):050401. <https://doi.org/10.1063/5.0053631>
4. Fetisov Y.K., Chashin D.V. Magnetolectric coil-free voltage transformer based on monolithic ferrite-piezoelectric heterostructure. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2022;344:113737. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113737>
5. Tu C., Chu Z.Q., Spetzler B., Hayes P., et al. Mechanical-resonance-enhanced thin-film magnetolectric heterostructures for magnetometers, mechanical antennas, tunable RF inductors, and filters. *Materials.* 2019;12(14):2259. <https://doi.org/10.3390/ma12142259>
6. Xu L., Yan Y., Qiao L., Wang J., Pan D., Yang S., Volinsky A.A. Layer thickness and sequence effects on resonant magnetolectric coupling in Ni/Pb(Zr,Ti)O₃ cylindrical composites. *Materials Lett.* 2016;185:13–16. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.042>
7. Yakubov V., Xu L., Volinsky A.A., Qiao L., Pan D. Edge geometry effects on resonance response of electroplated cylindrical Ni/PZT/Ni magnetolectric composites. *AIP Advances.* 2017;7(8):085305. <https://doi.org/10.1063/1.4998947>
8. Giang D.T.H., Tam H.A., Khanh V.T.N., Vinh N.T., Tuan P.A., Van Tuan N.V., et al. Magnetolectric vortex magnetic field sensors based on the metglas/PZT laminates. *Sensors.* 2020;20(10):2810. <https://doi.org/10.3390/s20102810>
9. Zhang S., Leung C.M., Kuang W., Or S.W., Ho S.L. Concurrent operational modes and enhanced current sensitivity in heterostructure of magnetolectric ring and piezoelectric transformer. *J. Appl. Phys.* 2013;113(17):17C733. <https://doi.org/10.1063/1.4801390>
10. Fetisov L.Y., Saveliev D.V., Chashin D.V., Gladyshev I.V., Fetisov Y.K. Circular Magnetolectric Heterostructure Based Inductor Tuned with Magnetic and Electric Fields. *J. Commun. Technol. Electron.* 2021;66(12):1402–1412. <https://doi.org/10.1134/S1064226922020036>
11. Ge B., Zhang J., Zhang Q., Filippov D.A., Wu J., Tao J., et al. Ultra-low anisotropy magnetolectric sensor in Ferrite/piezoelectric toroidal composites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2022;564(Part 2):170115. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170115>
12. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K., Stashkevich A.A. High-sensitivity dc field magnetometer using nonlinear resonance magnetolectric effect. *J. Magn. Magn. Mater.* 2016;405(52):244–248. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.12.079>
13. Wu G., Zhang R. Giant circumferential magnetolectric effect in Pb(Zr,Ti)O₃/Mn-Zn-ferrite cylindrical composite. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2021;330(14):112845. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112845>
14. Fetisov L.Y., Baraban I.A., Fetisov Y.K., Burdin D.A., Vopson M.M. Nonlinear magnetolectric effects in flexible composite ferromagnetic–Piezopolymer structures. *J. Magn. Magn. Mater.* 2017;441:628–634. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.013>
15. Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Gordeev S., Fetisov Y. Nonlinear magnetolectric effect in a layered ferromagnetic-piezoelectric heterostructure excited by transverse magnetic field. *Appl. Phys. Lett.* 2020;116(7):072901. <https://doi.org/10.1063/1.5136088>
16. Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Fetisov L., Fetisov Y., Shamonin M. DC magnetic field sensing based on the nonlinear magnetolectric effect in magnetic heterostructures. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016;49(37):375002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/37/375002>
17. Fetisov L.Y., Burdin D.A., Ekonomov N.A., Chashin D.V., Zhang J., Srinivasan G., et al. Nonlinear magnetolectric effects at high magnetic field amplitudes in composite multiferroics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(15):154003. <http://doi.org/10.1088/1361-6463/aab384>
18. Joseph R.I., Schlömann E. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies. *J. Appl. Phys.* 1965;36(5):1579–1593. <https://doi.org/10.1063/1.1703091>
19. Fang F., Zhao C.P., Yang W. Thickness effects on magnetolectric coupling for Metglas/PZT/Metglas laminates. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy.* 2011;54(4):581–585. <https://doi.org/10.1007/s11433-011-4268-2>
20. Li M., Wang Y., Hasanyan D., Li J., Viehland D. Giant Converse magnetolectric effect in multi-push-pull mode Metglas/Pb(Zr,Ti)O₃/metglas laminates. *Appl. Phys. Lett.* 2012;100(13):132904. <https://doi.org/10.1063/1.3698114>

Об авторах

Мусатов Владимир Иванович, аспирант, кафедра наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: musatov.v.i@mail.ru. Scopus Author ID 57416814900, <https://orcid.org/0000-0002-2995-8824>

Федулов Федор Александрович, к.т.н., научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Магнитоэлектрические материалы и устройства», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ostsilograf@yandex.ru. Scopus Author ID 57194284263, <https://orcid.org/0000-0003-2188-0011>

Савельев Дмитрий Владимирович, инженер-исследователь, Научно-образовательный центр «Магнитоэлектрические материалы и устройства», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, SPIN-код РИНЦ 3273-4160, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Болотина Екатерина Витальевна, студент, кафедра наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ekaterina.bolotina1@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1004-2821>

Фетисов Леонид Юрьевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры наноэлектроники Института 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

Vladimir I. Musatov, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: musatov.v.i@mail.ru. Scopus Author ID 57416814900, <https://orcid.org/0000-0002-2995-8824>

Fedor A. Fedulov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Scientific and Educational Center “Magnetoelectric materials and devices,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ostsilograf@yandex.ru. Scopus Author ID 57194284263, <https://orcid.org/0000-0003-2188-0011>

Dmitrii V. Savelev, Research Engineer, Scientific and Educational Center “Magnetoelectric materials and devices,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, RSCI SPIN-code 3273-4160, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Ekaterina V. Bolotina, Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ekaterina.bolotina1@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1004-2821>

Leonid Y. Fetisov, Dr. Sci., 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 наноэлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 681.2.0821.083:535.2:543.063
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-71-80>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Использование синхротронного излучения отдельного электрона для спектрорадиометрии оптического диапазона

А.С. Сигов¹, Е.Р. Лазаренко²,
Н.Б. Голованова¹, О.А. Минаева^{1, @},
С.И. Аневский¹, Р.В. Минаев³,
П.Ю. Пушкин¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), Москва, 125039 Россия

³ ООО «Электростекло», Москва, 119571 Россия

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

Резюме

Цели. Исследование метрологических характеристик источников и приемников оптического излучения в инфракрасной (ИК), видимой и ближней ультрафиолетовой (УФ) областях спектра в значительной мере основано на использовании уникальных метрологических свойств синхротронного излучения. Целью работы является развитие высокоточного метода определения числа ускоренных электронов накопительного кольца, основанного на использовании синхротронного излучения отдельного электрона для воспроизведения единиц величин спектрорадиометрии и фотометрии.

Методы. Определение числа ускоренных электронов позволяет для любого накопительного кольца рассчитывать характеристики синхротронного излучения на длинах волн, намного больших критической длины волны, т.е. в видимой, ближней УФ- и ИК-областях спектра. Это обеспечивает возможность, вне зависимости от энергии электронов, определить нормированные на число электронов основные метрологические характеристики, такие как сила света, яркость, освещенность, сила излучения, энергетическая освещенность, энергетическая яркость и другие.

Результаты. Применение метода определения числа ускоренных электронов при малых токах электронного накопительного кольца позволяет обеспечить в широком динамическом диапазоне $1-10^{10}$ электронов на орбите значение суммарного среднеквадратического отклонения не более 0.01% для диапазона экспозиций приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы) от 10^{-2} до $3 \cdot 10^3$ с.

Выводы. Применение радиометра-компаратора на основе телескопа с ПЗС-матрицей, откалиброванного по чувствительности на источнике синхротронного излучения, особенно актуально при контроле пороговых значений яркостного контраста и пространственного распределения яркости объекта и фона, а также определения метрологических характеристик оптико-электронных средств измерений, включая ПЗС-камеры, радиометры, спектрорадиометры и фотометры.

Ключевые слова: синхротронное излучение, порог чувствительности, яркостный контраст, пространственное распределение яркости, средства измерений

• Поступила: 05.06.2023 • Доработана: 23.06.2023 • Принята к опубликованию: 11.07.2023

Для цитирования: Сигов А.С., Лазаренко Е.Р., Голованова Н.Б., Минаева О.А., Аневский С.И., Минаев Р.В., Пушкин П.Ю. Использование синхротронного излучения отдельного электрона для спектрорадиометрии оптического диапазона. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):71–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-71-80>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Synchrotron radiation of a single electron application for optical spectroradiometry

Alexander S. Sigov ¹, Evgenij R. Lazarenko ²,
Natalia B. Golovanova ¹, Olga A. Minaeva ^{1, @},
Sergei I. Anevsky ¹, Roman V. Minaev ³,
Pavel Yu. Pushkin ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart), Moscow, 125039 Russia

³ Elektrosteklo, Moscow, 119571 Russia

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

Abstract

Objectives. The investigations of optical radiation sources and metrological detector characteristics in the infrared (IR), visible, and air ultraviolet (UV) spectral regions are partially based on the unique metrological properties of synchrotron radiation. The aim of this work is to develop a high-precision method for determining the storage ring accelerated electron number with synchrotron radiation of a single electron to establish spectroradiometry and photometry units.

Methods. By determining the number of accelerated electrons, any storage ring can be used to calculate the synchrotron radiation characteristics at wavelengths of many large then the critical wavelength in the visible, air UV, and IR regions of the spectrum. This makes it possible to determine the main metrological characteristics normalized to the number of electrons, such as luminous intensity, luminance, illuminance, radiant power, radiance, irradiance, etc., regardless of the energy of the electrons.

Results. When applying the method for determining the number of accelerated electrons at low currents of the electronic storage ring, a total standard deviation of the number of accelerated electrons is less than 0.01% for an exposure range of the CCD matrix from 10^{-2} to $3 \cdot 10^3$ s in a wide dynamic range of $1-10^{10}$ electrons per orbit.

Conclusions. The use of a CCD-based radiometer-comparator calibrated by responsivity on a synchrotron radiation source is particularly relevant in monitoring luminance contrast thresholds and spatial distribution of object and background brightness, as well as determining metrological characteristics of optoelectronic measuring instruments, including CCD cameras, radiometers, spectroradiometers and photometers.

Keywords: synchrotron radiation, responsivity threshold, luminance contrast, luminance spatial distribution, measuring instruments

• Submitted: 05.06.2023 • Revised: 23.06.2023 • Accepted: 11.07.2023

For citation: Sigov A.S., Lazarenko E.R., Golovanova N.B., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Minaev R.V., Pushkin P.Yu. Synchrotron radiation of a single electron application for optical spectroradiometry. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):71–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-71-80>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Решение актуальных задач спектрорадиометрии и фотометрии основано на использовании эталонных источников и приемников излучения в инфракрасной (ИК), видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра [1–3]. Методы спектрорадиометрии играют важную роль в различных областях науки и техники, включая диагностику плазмы, фотохимию и фотобиологию, астронавигацию, дистанционное зондирование Земли, диагностику солнечной активности, исследование свойств жидкостей в терагерцовом диапазоне, локацию удаленных объектов, наноэлектронику [4, 5].

Несмотря на успехи национальных метрологических институтов (НМИ) в создании эталонов спектрорадиометрии, существуют значительные трудности при оценке качества радиометров и фотометров, применяемых в научных исследованиях и при решении практических измерительных задач определения эффективности и опасности ультрафиолетового излучения, а также фотометрических характеристик излучателей на производстве, транспорте, в охране труда, санэпиднадзоре и других областях [6–8]. Международные ключевые сличения К2с абсолютной спектральной чувствительности эталонных приемников УФ-излучения, проведенные Международным бюро мер и весов, показали, что из 14 участников результаты сличений только НМИ Physikalisch-Technische Bundesanstalt¹ (Германия), ВНИИОФИ² (Россия) и NIST³ (США) соответствуют требованиям точности измерений в спектральном диапазоне 200–400 нм [9, 10].

В качестве первичных эталонов единиц фотометрии и спектрорадиометрии в ИК, видимой и ближней УФ областях спектра используются модели черного тела и источники синхротронного излучения [11, 12]. Ограничение яркостной температуры модели черного тела до 3500 К не позволяет расширить рабочий спектральный диапазон в коротковолновую УФ-область спектра, в то время как яркостная

температура синхротронного излучения регулируется за счет изменения энергии электронов от тысяч до десятков миллионов Кельвинов.

Воспроизведение и передача единиц фотометрии и спектрорадиометрии первичными эталонами связаны с рядом проблем, над которыми на протяжении многих лет работают ведущие НМИ. Так, для модели черного тела необходимы определение радиационной температуры, точная регистрация слабых потоков УФ-излучения на фоне мощного ИК-излучения, обеспечение равномерности излучающей области. Использование синхротрона в качестве эталонного излучателя требует повышения точности диагностики электронного пучка.

При применении криогенных радиометров в качестве первичных эталонных приемников основные погрешности связаны с низкой чувствительностью и теплообменом между приемной полостью, корпусом и сверхпроводящими элементами, а также с необходимостью сравнения потоков излучения в широком динамическом диапазоне [13]. Высокая интенсивность синхротронного излучения, отсутствие линий в спектре и высокая яркостная температура позволяют использовать, наряду с криогенным радиометром, эталонную ионизационную камеру и приемник Голея [14]. Кроме того, использование синхротронного излучения позволяет проводить метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий и рассчитывать спектральную чувствительность вторичных эталонных приемников излучения с использованием зависимости сигналов приемников от энергии ускоренных электронов [15, 16].

Для решения проблем, возникающих при исследовании метрологических характеристик источников и приемников оптического излучения в ИК, видимой и ближней УФ областях спектра особый интерес представляет развитие работ, направленных на использование уникальных метрологических свойств синхротронного излучения.

РАДИОМЕТРИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Спектральные энергетические характеристики синхротронного излучения рассчитываются с высокой точностью по результатам измерений радиуса электронной орбиты, энергии и числа ускоренных электронов [17]. Распределение спектральной

¹ <https://www.ptb.de/cms/en.html>. Дата обращения 05.06.2023. / Accessed June 05, 2023.

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений. <https://www.vniiofi.ru/> (in Russ.). Дата обращения 05.06.2023. / Accessed June 05, 2023.

³ National Institute of Standards and Technology. <https://www.nist.gov/>. Дата обращения 05.06.2023. / Accessed June 05, 2023.

плотности энергетической яркости (СПЭЯ) синхротронного излучения по излучающей области описывается следующим выражением:

$$L(x, y) = \frac{27Ne^2c}{32\pi^3R^3D\sigma_{x'}\sigma_{y'}} (\lambda_c/\lambda)^4 \gamma^8 [1 + (\gamma\Psi)^2]^2 \times \\ \times \left\{ K_{2/3}^2(\xi) + K_{1/3}^2(\xi)(\gamma\Psi)^2 / [1 + (\gamma\Psi)^2] \right\} \times \\ \times \exp \left[-\frac{(x' - x'_0)^2}{2\sigma_{x'}^2} - \frac{(y' - y'_0)^2}{2\sigma_{y'}^2} \right], \quad (1)$$

где L – СПЭЯ синхротронного излучения (Вт/м³·ср); x', y' – координаты двумерной излучающей области в плоскости орбиты и перпендикулярной плоскости; x'_0, y'_0 – координаты максимума распределения СПЭЯ синхротронного излучения; N – число ускоренных электронов; $\gamma = E/E_0$ – релятивистский фактор; E – энергия ускоренного электрона, $E_0 = 0.511$ МэВ – энергия покоя электрона; e – заряд электрона; c – скорость света; R – радиус орбиты электрона в точке излучения; D – интеграл двумерного гауссова распределения; $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$ – среднеквадратическое отклонение пространственного распределения СПЭЯ электронного сгустка в плоскости орбиты и перпендикулярной плоскости; $\lambda_c = (4/3)\pi R\gamma^3$ – критическая длина волны; λ – длина волны; Ψ – угол отклонения от плоскости орбиты; $K_{1/3}, K_{2/3}$ – модифицированные функции Бесселя (функции Макдональда); $\xi = [\lambda_c/(2\lambda)][1 + (\gamma\Psi)^2]^{3/2}$ – аргумент.

Интеграл двумерного гауссова распределения D рассчитывается по формуле:

$$D = \iint \frac{1}{2\pi\sigma_{x'}\sigma_{y'}} \exp \left[-\frac{(x' - x'_0)^2}{2\sigma_{x'}^2} - \frac{(y' - y'_0)^2}{2\sigma_{y'}^2} \right] dx' dy'.$$

На рис. 1 представлена зависимость модифицированных функций Бесселя (функции Макдональда) $K_{1/3}, K_{2/3}$ от длины волны, нормированной на критическую длину волны λ_c спектра синхротронного излучения [17].

Уравнение (1) описывает спектральное и угловое распределения энергетической яркости в поляризационных σ - и π -компонентах синхротронного излучения. Вектор поляризации σ -компонента лежит в плоскости электронной орбиты, перпендикулярной вектору индукции отклоняющего магнитного поля и описывается первым слагаемым уравнения (1), а вектор поляризации π -компонента лежит в плоскости, параллельной вектору индукции магнитного поля и описывается вторым слагаемым.

Интегрирование уравнения (1) по излучающей области электронного сгустка и углу отклонения

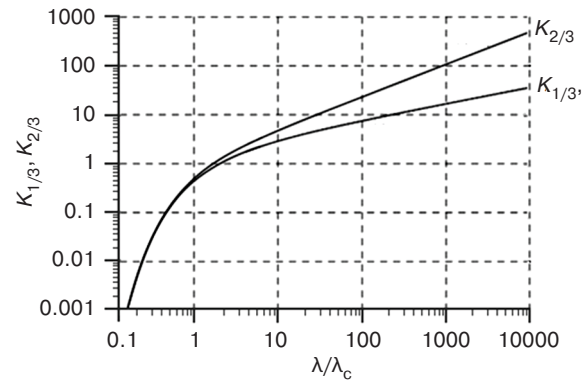


Рис. 1. Зависимость модифицированных функций Бесселя (функции Макдональда) $K_{1/3}, K_{2/3}$ от длины волны

от плоскости электронной орбиты позволяет получить универсальную функцию $f(\lambda/\lambda_0)$ спектрального распределения потока синхротронного излучения [18].

Использование универсальной функции, представленной на рис. 2, позволяет рассчитать характеристики синхротронного излучения, задавая критическую длину волны λ_c электронных накопительных колец.

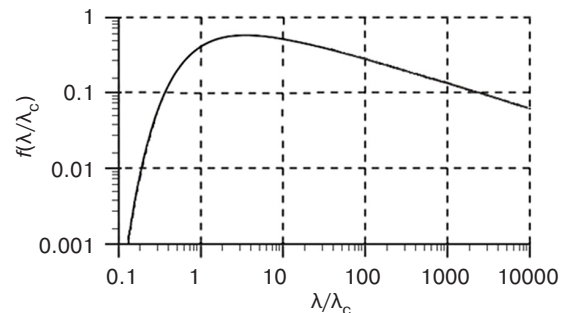


Рис. 2. Универсальная функция спектрального распределения потока синхротронного излучения

Энергия электронов электронного накопительного кольца определяется по результатам абсолютных измерений индукции магнитного поля в излучающей точке электронной орбиты или по длине волны обратного комптоновского рассеяния фотонов на ускоренных электронах, а также с использованием относительных спектральных измерений потока синхротронного излучения. Радиус орбиты электронного накопительного кольца определяется частотой ускоряющего высокочастотного поля.

Определение числа ускоренных электронов с высокой точностью является наиболее важной и сложной задачей спектрометрики синхротронного излучения. На источниках синхротронного излучения число ускоренных электронов НМИ измерялось сравнением СПЭЯ модели черного тела и синхротрона в видимой области спектра, т.е. для спектрометрики использовалось относительное спектральное

распределение энергетической яркости синхротронного излучения с абсолютизацией в видимом диапазоне по модели черного тела. На протяжении ряда лет с использованием источников синхротронного излучения для спектрорадиометрии и фотометрии проводилась разработка точного метода измерений числа электронов с погрешностью, не превышающей сотые доли процента. Метод измерений числа частиц основан на Фурье-преобразовании сигнала телескопа с ПЗС-матрицей, пропорционального СПЭЯ синхротронного излучения при выделении отдельного электрона на релятивистской орбите электронного накопительного кольца с фильтрацией высокочастотных пространственных гармоник для обеспечения широкого диапазона линейности чувствительности приемника излучения.

РАДИОМЕТР-КОМПАРАТОР

Радиометр-компаратор (производство – Россия) включает ахроматический телескоп-рефрактор с фокусным расстоянием 6 м и апертурой 150 мм, содержащий охлаждаемую ПЗС-матрицу, комплект интерференционных фильтров для УФ-, видимого и ИК-диапазонов спектра, а также светофильтров для коррекции спектральной чувствительности в соответствии с относительной спектральной световой эффективностью монохроматического излучения [19]. Использование охлаждаемой ПЗС-матрицы при вычитании темнового сигнала обеспечивает возможность измерений при снижении тока пучка в широком диапазоне экспозиций от 0.1 до 4000 с. Общий вид радиометра-компаратора на канале синхротронного излучения представлен на рис. 3.

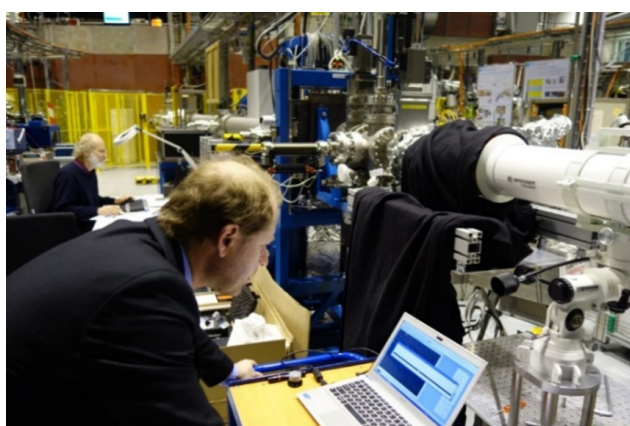


Рис. 3. Общий вид радиометра-компаратора на канале синхротронного излучения

Охлаждаемая ПЗС-матрица включает 3326×2504 пикселей размером 5.4×5.4 мкм с 16-битной дискретизацией значений сигналов. Радиометр-компаратор устанавливается на белом канале электронного накопительного кольца без монохроматизации

синхротронного излучения на фиксированном расстоянии от излучающей точки орбиты.

ИЗМЕРЕНИЕ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ НА ОРБИТЕ

Поток синхротронного излучения характеризуется однородным угловым распределением в горизонтальной плоскости электронной орбиты и имеет сложную угловую зависимость интенсивности поляризационных компонентов и степени поляризации в вертикальной плоскости [18]. Влияние осевых колебаний электронов сгустка дополнительно усложняет угловую зависимость интенсивности поляризационных компонентов в вертикальном направлении, определяемую сверткой углового распределения синхротронного излучения отдельного электрона и распределением электронов сгустка по углам отклонения от плоскости орбиты. Выбор апертуры телескопа определяется необходимостью интегрирования потока синхротронного излучения в вертикальной плоскости по приемной поверхности ПЗС-матрицы.

Для исключения искажений распределения энергетической освещенности, фиксируемой при интегрировании сигналов пикселей ПЗС-матрицы, чувствительность пикселей выравнивается для устранения зонной неоднородности коэффициента пропускания телескопа. На рис. 4 представлено распределение сигналов пикселей ПЗС-матрицы, соответствующее гауссову распределению энергетической яркости по излучающей области синхротрона.

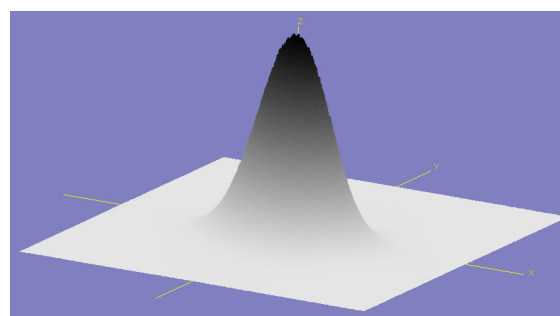


Рис. 4. Распределение сигналов пикселей ПЗС-матрицы

Изображение на ПЗС-матрице формируется при многократном прохождении электронов по релятивистской орбите. Для снижения влияния шумов ПЗС-матрицы при регистрации малых потоков синхротронного излучения используется прямое и обратное Фурье-преобразования с фильтрацией высокочастотных пространственных гармоник. Расчет энергетических характеристик синхротронного излучения отдельного электрона позволяет оценить уровень шумов и порог чувствительности

радиометра-компаратора, составляющий не более 10^{-10} Вт/(нм·м²·ср). Важным метрологическим свойством синхротронного излучения является идеальное гауссово распределение СПЭЯ по излучающей области электронного накопительного кольца за счет осевых, радиальных и фазовых колебаний электронов сгустка. При уменьшении числа электронов пропорционально снижается интегральный сигнал. При этом относительное распределение энергетической яркости по излучающей области не изменяется, что позволяет использовать гауссово распределение для получения равномерной чувствительности радиометра-компаратора по приемной поверхности ПЗС-матрицы.

Регулировка тока электронного пучка накопительного кольца в широком динамическом диапазоне проводится при контроле относительного числа электронов по интегральному потоку синхротронного излучения без изменений спектрального и углового распределения. Впервые регистрация отдельного электрона на орбите проводилась на электронном накопительном кольце первого поколения с использованием фотоумножителя. При выделении на орбите отдельного электрона для высокоточного воспроизведения единиц спектро-радиометрии и фотометрии СПЭЯ синхротронного излучения имеет гауссово распределение за счет высокой частоты обращения электрона, что позволяет исключить при регистрации сигнала высшие пространственные гармоники, т.е. кардинально снизить уровень шума и повысить точность при интегрировании сигналов пикселей в широком диапазоне экспозиций от миллисекунд до одного часа с применением прямого и обратного Фурье-преобразования при фильтрации высокочастотных пространственных гармоник.

В первую очередь необходимо обеспечить диапазон линейности чувствительности ПЗС-матрицы в десяти порядках величины с учетом случайных и систематических погрешностей определения времени срабатывания затвора, шумов считывания сигналов и возможного насыщения зарядов пикселей. Измерение сигнала ПЗС-матрицы проводится при изменении времени экспозиции, но при постоянном значении потока синхротронного излучения. Высокая стабильность энергетических характеристик синхротронного излучения при фиксированном токе электронного пучка позволяет сравнивать сигналы ПЗС-матрицы даже при максимальных экспозициях.

В начале цикла измерений абсолютного числа электронов с использованием потока синхротронного излучения отдельного электрона выбор минимальной экспозиции ПЗС-матрицы соответствует максимальному току пучка электронного

накопительного кольца. Последовательное снижение тока электронного пучка и снижение сигнала, пропорционального потоку синхротронного излучения, компенсируется за счет увеличения времени экспозиции. Различие сигналов, полученных до снижения тока и после увеличения экспозиции, свидетельствует о нелинейной зависимости чувствительности ПЗС-матрицы от времени экспозиции, что требует введения поправочных коэффициентов. Для снижения тока электронного пучка используется скрайбер, что позволяет ступенчато удалять электроны с орбиты накопительного кольца, так, чтобы на орбите остался последний электрон, который может удерживаться в течение нескольких часов.

На рис. 5 показано ступенчатое изменение сигналов ПЗС-матрицы при удалении электронов с орбиты электронного накопительного кольца.

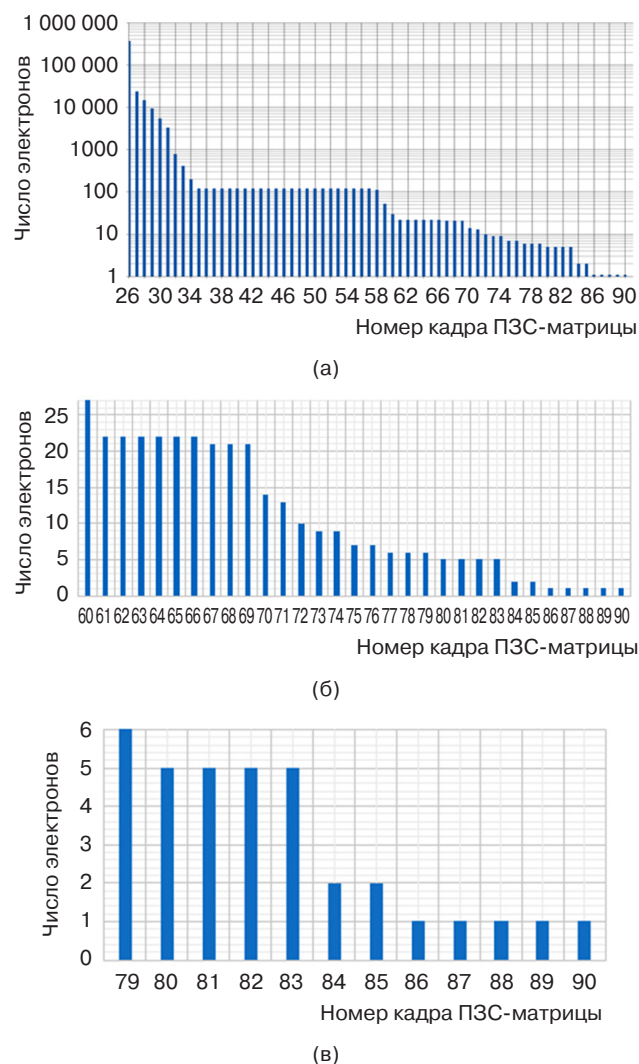


Рис. 5. Диаграмма ступенчатого снижения сигналов ПЗС-матрицы при удалении электронов с орбиты:
(а) диаграмма от 400 000 до 1 электрона;
(б) фрагмент диаграммы от 27 до 1 электрона;
(в) фрагмент диаграммы от 6 до 1 электрона

На рис. 5а в логарифмическом масштабе показано ступенчатое изменение сигнала ПЗС-матрицы, пропорционального числу электронов на орбите, начиная с 26-го кадра, с сигнала в 400 000 относительных единиц. С 26-го по 35-й кадр с использованием скрайбера сигнал быстро снижался до 110 единиц. Для оценки среднеквадратического отклонения (СКО) сигналов ПЗС-матрицы с 35-го по 57-й кадр на протяжении нескольких часов проверялась стабильность потока синхротронного излучения. За это время электронный сгусток не потерял ни одного электрона, и СКО сигналов не превышало 0.01%. Кадры 58 и 60 иллюстрируют снижение сигнала в 5 раз, и с 61-го кадра повторялась проверка стабильности потока синхротронного излучения с оценкой СКО сигналов.

На рис. 5б в линейном масштабе при ступенчатом снижении сигналов на 67-м, 72-м, 78-м и 80-м кадрах отмечено наименьшее снижение сигналов, кратное ступенчатым изменениям сигналов и соответствующее потоку синхротронного излучения отдельного электрона.

На рис. 5в в линейном масштабе показаны результаты сравнения сигналов последних кадров, где на 80-м кадре удален один электрон и на орбите осталось пять электронов. После проверки стабильности сигналов на 84-м кадре скрайбером удаляются сразу три электрона, и сигнал соответствует оставшимся двум электронам. После 85-го кадра с орбиты удаляется еще один электрон, и на 86-м кадре сигнал ПЗС-матрицы соответствует одному электрону, который удерживается на орбите длительное время, что позволяет связать чувствительность ПЗС-матрицы с потоком синхротронного излучения отдельного электрона. Определение соотношения сигналов на последних кадрах, показанных на рис. 5в, позволяет точно указать число электронов для каждого снятого кадра и выбрать на графиках масштаб, при котором относительная единица сигнала соответствует потоку синхротронного излучения отдельного электрона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод определения числа ускоренных электронов накопительного кольца, основанный на использовании синхротронного излучения отдельного электрона, предназначен для диагностики электронного сгустка при воспроизведении единиц величин спектрорадиометрии и фотометрии на основе фундаментальных физических констант – заряда электрона и скорости света в вакууме. При определении числа электронов от 1 до 10^{10} в диапазоне экспозиций от 10^{-2} до $3 \cdot 10^3$ с суммарное СКО не превышает 0.01%.

Разработанный метод позволяет для любого электронного накопительного кольца рассчитать СПЭЯ синхротронного излучения на длинах волн, значительно больших критической длины волны, т.е. в видимой, ближней УФ- и ИК-областях спектра. Это обеспечивает возможность, вне зависимости от энергии электронов, определить нормированные на число электронов основные метрологические характеристики, такие как сила света, яркость, освещенность, сила излучения, энергетическая освещенность, энергетическая яркость и другие. Таким образом, спектрорадиометрические и фотометрические характеристики синхротронного излучения в видимой, ближней УФ- и ИК-областях спектра, нормированные на число ускоренных электронов, являются неизменными константами для каждого электронного накопительного кольца.

Применение радиометра-компаратора на основе телескопа с ПЗС-матрицей, откалиброванного по чувствительности на источнике синхротронного излучения, особенно актуально при контроле пороговых значений яркостного контраста и пространственного распределения яркости объекта и фона, а также определения метрологических характеристик оптико-электронных средств измерений, включая ПЗС-камеры, радиометры, спектрорадиометры и фотометры.

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. Элькин Г.И., Саламатов В.Ю., Крутиков В.Н., Новиков Н.Ю. Состояние и основные направления работ в области обеспечения единства измерений в Российской Федерации. *Законодательная и прикладная метрология*. 2010;3:5–10. URL: <https://metro.ru/html/Stati/metrolob/napravlenia.html>
2. Аневский С.И., Минаева О.А., Крутиков В.Н., Минаев Р.В. и др. *Метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии*. М.: Издательство «Логос»; 2011. 592 с.

REFERENCES

1. El'kin G.I., Salamatov V.Yu., Krutikov V.N., Novikov N.Yu. The state and main directions of work in the field of ensuring the uniformity of measurements in the Russian Federation. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legislative and Applied Metrology*. 2010;3:5–10 (in Russ.). Available from URL: <https://metro.ru/html/Stati/metrolob/napravlenia.html>
2. Anevskii S.I., Minaeva O.A., Krutikov V.N., Minaev R.V., et al. *Metrological Support of Nanotechnologies and Nanoindustry Products*. Moscow: Logos; 2011. 592 p. (in Russ.).

3. Richter M., Ulm G. Metrology with Synchrotron Radiation. In: Jaeschke E., Khan S., Schneider J., Hastings J. (Eds.). *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*. Springer; 2020. P. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04507-8_63-1
4. Shevelko A.P. Spectral instruments for x-ray and VUV plasma diagnostics. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;1115(2):022042. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/2/022042>
5. Torretti F., Liu F., Bayraktar M., Scheers J., Bouza Z., Ubachs W., Hoekstra R., Versolato O. Spectral characterization of an industrial EUV light source for nanolithography. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019;53(5):055204. <http://doi.org/10.1088/1361-6463/ab56d4>
6. Berni L.Â., Vilela W.A., Beloto A.F., de Sena F.O. System for measuring the angular response of radiometers. In: *Proc. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications*. 2013. V. 8785. <https://doi.org/10.1117/12.2019888>
7. Fryc I. Spectral correction of detector used in illuminance measurements. In: *Proc. 11th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics (SPIE 3820)*. 1999. V. 3820. P. 343–348. <https://doi.org/10.1117/12.353083>
8. Han L. The principle and characteristics of photoelectric sensors. *Science and Technology Innovation and Application*. 2020;10:77–78.
9. Lutz W. The CCPR K2.c key comparison of spectral responsivity from 200 nm to 400 nm. *Metrologia*. 2014;51(6):S336. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/51/6/S336>
10. Аневский С.И., Золотаревский Ю.М., Иванов В.С., Крутиков В.Н., Минаева О.А., Минаев Р.В. Спектро-радиометрия ультрафиолетового излучения. *Измерительная техника*. 2015;11:26–30.
11. König S., Gutschwager B., Taubert R.D., Hollandt J. Metrological Characterization and Calibration of Thermographic Cameras for Quantitative temperature measurement. *Sens. Sens. Syst.* 2020;9(2):425–442. <https://doi.org/10.5194/jsss-9-425-2020>
12. Gottwald A., Krumrey M., Scholze F., et al. Metrology with synchrotron radiation at PTB. *Eur. Phys. J. Plus*. 2022;137(11):1238. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03417-9>
13. Woods S., Neira J., Proctor J., Rice J., Tomlin N., White M., Stephens M., Lehman J. Generalized Electrical Substitution Methods and Detectors for Absolute Optical Power Measurements. *Metrologia*. 2022;59(4):044002. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac72dc>
14. Anevsky S., Ivanov V., Kuznetsov V., Minaeva O., et al. Primary UV-radiation detector standards. *Metrologia*. 2003;40(1):S25. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/307>
15. Сигов А.С., Минаева О.А., Лебедев А.М., Минаев Р.В. Метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий с использованием синхротронного излучения. *Russ. Technol. J.* 2021;9(2): 38–46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47>
16. Сигов А.С., Голованова Н.Б., Минаева О.А., Аневский С.И., Шамин Р.В., Останина О.И. Решение актуальных задач спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):34–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>
3. Richter M., Ulm G. Metrology with Synchrotron Radiation. In: Jaeschke E., Khan S., Schneider J., Hastings J. (Eds.). *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*. Springer; 2020. P. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04507-8_63-1
4. Shevelko A.P. Spectral instruments for x-ray and VUV plasma diagnostics. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;1115(2):022042. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/2/022042>
5. Torretti F., Liu F., Bayraktar M., Scheers J., Bouza Z., Ubachs W., Hoekstra R., Versolato O. Spectral characterization of an industrial EUV light source for nanolithography. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019;53(5):055204. <http://doi.org/10.1088/1361-6463/ab56d4>
6. Berni L.Â., Vilela W.A., Beloto A.F., de Sena F.O. System for measuring the angular response of radiometers. In: *Proc. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications*. 2013. V. 8785. <https://doi.org/10.1117/12.2019888>
7. Fryc I. Spectral correction of detector used in illuminance measurements. In: *Proc. 11th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics (SPIE 3820)*. 1999. V. 3820. P. 343–348. <https://doi.org/10.1117/12.353083>
8. Han L. The principle and characteristics of photoelectric sensors. *Science and Technology Innovation and Application*. 2020;10:77–78.
9. Lutz W. The CCPR K2.c key comparison of spectral responsivity from 200 nm to 400 nm. *Metrologia*. 2014;51(6):S336. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/51/6/S336>
10. Anevskii S.I., Zolotarevskii Y.M., Ivanov V.S., et al. Spectroradiometry of ultraviolet radiation. *Meas. Tech.* 2016;28(11):1216–1222. <http://doi.org/10.1007/s11018-016-0873-9>
[Original Russian Text: Anevskii S.I., Zolotarevskii Yu.M., Ivanov V.S., Krutikov V.N., Minaeva O.A., Minaev R.V. Spectroradiometry of ultraviolet radiation. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2015;11:26–30 (in Russ.).]
11. König S., Gutschwager B., Taubert R.D., Hollandt J. Metrological Characterization and Calibration of Thermographic Cameras for Quantitative temperature measurement. *Sens. Sens. Syst.* 2020;9(2):425–442. <https://doi.org/10.5194/jsss-9-425-2020>
12. Gottwald A., Krumrey M., Scholze F., et al. Metrology with synchrotron radiation at PTB. *Eur. Phys. J. Plus*. 2022;137(11):1238. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03417-9>
13. Woods S., Neira J., Proctor J., Rice J., Tomlin N., White M., Stephens M., Lehman J. Generalized Electrical Substitution Methods and Detectors for Absolute Optical Power Measurements. *Metrologia*. 2022;59(4):044002. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac72dc>
14. Anevsky S., Ivanov V., Kuznetsov V., Minaeva O., et al. Primary UV-radiation detector standards. *Metrologia*. 2003;40(1):S25. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/307>
15. Sigov A.S., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Lebedev A.M., Minaev R.V. Metrological studies of the characteristics of multilayer surface coatings using synchrotron radiation. *Russ. Technol. J.* 2021;9(1):38–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47>

17. Schwinger J. On the Classical Radiation of Accelerated Electrons. *Phys. Rev.* 1949;75(12):1912. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.75.1912>
18. Wiedemann H. *Particle Accelerator Physics*. Springer Science & Business Media; 2007. P. 815–894.
19. Аневский С.И., Золотаревский Ю.М., Крутиков В.Н., Лебедев А.М., Минаев Р.В., Сенин Д.С., Станкевич В.Г. Использование эталонного источника синхротронного излучения для калибровки чувствительности телескопа с ПЗС-матрицей с высоким угловым разрешением. *Измерительная техника*. 2015;5:33–36.
16. Sigov A.S., Golovanova N.B., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Shamin R.V., Ostanina O.I. Solution of topical spectroradiometric problems using synchrotron radiation. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):34–44 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>
17. Schwinger J. On the Classical Radiation of Accelerated Electrons. *Phys. Rev.* 1949;75(12):1912. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.75.1912>
18. Wiedemann H. *Particle Accelerator Physics*. Springer Science & Business Media; 2007. P. 815–894.
19. Anevskii S.I., Zolotarevskii Y.M., Krutikov V.N., et al. The Use of a Standard Source of Synchrotron Radiation for Calibration of the Sensitivity of a Telescope with CCD Array and High Angular Resolution. *Meas. Tech.* 2015;58(5):520–525. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0747-6>
[Original Russian Text: Anevskii S.I., Zolotarevskii Yu.M., Krutikov V.N., Lebedev A.M., Minaev R.V., Senin D.S., Stankevich V.G. The Use of a Standard Source of Synchrotron Radiation for Calibration of the Sensitivity of a Telescope with CCD Array and High Angular Resolution *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2015;5:33–36 (in Russ.).]

Об авторах

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, 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. ResearcherID L-4103-2017, Scopus Author ID 35557510600, SPIN-код РИНЦ 2869-5663, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Лазаренко Евгений Русланович, заместитель руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) (125039, Россия, Москва, Пресненская наб., д. 10, стр. 2). E-mail: elazarenko@rst.gov.ru.

Голованова Наталия Борисовна, д.э.н., профессор, заместитель первого проректора ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, SPIN-код РИНЦ 7197-9948, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Минаева Ольга Александровна, д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, SPIN-код РИНЦ 5081-1976, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Аневский Сергей Иосифович, д.т.н., профессор кафедры метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Минаев Роман Владимирович, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела ООО «Электростекло» (119571, Россия, Москва, ул. 26-ти Бакинских Комиссаров, д. 5). E-mail: minaev@elktrosteklo.ru. Scopus Author ID 22235214600, <https://orcid.org/0009-0009-6335-5531>

Пушкин Павел Юрьевич, к.т.н., директор Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pushkin@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 9901-4887, <https://orcid.org/0000-0003-3684-550X>

About the authors

Alexander S. Sigov, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, President of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. ResearcherID L-4103-2017, Scopus Author ID 35557510600, RSCI SPIN-code 2869-5663, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Evgenij R. Lazarenko, Deputy Head of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart) (10/2, Presnenskaya nab., Moscow, 125039 Russia). E-mail: elazarenko@rst.gov.ru.

Natalia B. Golovanova, Dr. Sci. (Econ.), Deputy First Vice-Rector, MIREA – Russian Technological University, (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia) E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, RSCI SPIN-code 7197-9948, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Olga A. Minaeva, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Metrology and Standardization, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, RSCI SPIN-code 5081-1976, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Sergei I. Anevsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Metrology and Standardization, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Roman V. Minaev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Department, Elektrosteklo (5, 26 Bakinskikh Komissarov ul., Moscow, 119571 Russia). E-mail: minaev@elktrosteklo.ru. Scopus Author ID 22235214600, <https://orcid.org/0009-0009-6335-5531>

Pavel Yu. Pushkin, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pushkin@mirea.ru. RSCI SPIN-code 9901-4887, <https://orcid.org/0000-0003-3684-550X>

УДК 621.383.2.032.12+681.586.7
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-81-93>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

DC/DC-преобразователь для питания спектральных ламп

М.Ю. Никольшин ¹,
А.В. Фрунзе ²,
В.К. Битюков ¹, @

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² АНО НТП «Термоконт», Москва, 119361 Россия

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

Резюме

Цели. Цель работы – создание DC/DC-преобразователя для питания ламп с полым катодом, которые в настоящее время широко используются в качестве высокостабильных источников спектральных линий в установках спектрального абсорбционного анализа и в иных случаях. Зачастую для таких ламп используются сетевые источники питания, т.к. установки с использованием ламп с полым катодом выполняются в стационарном исполнении. Однако препятствий принципиального характера для выполнения такого рода установок в переносном варианте нет. Для этого, в первую очередь, следует отказаться от привязки питания к сети переменного тока. Особое внимание при этом должно быть обращено на питание самой спектральной лампы, т.к. от пульсаций ее питающего напряжения зависит амплитудная стабильность излучения. Следовательно, разработка импульсного DC/DC-преобразователя с высоким КПД и малыми пульсациями является актуальной и целесообразной проблемой.

Методы. Поставленная задача решена методами математических расчетов, схемотехнического моделирования в системе автоматизированного проектирования *LTSpice XVII* и экспериментальной проверки.

Результаты. Выполнен анализ топологий импульсных DC/DC-преобразователей, разработаны структурная и принципиальная электрические схемы преобразователя, проведены их расчеты и моделирование, разработана печатная плата. Для обеспечения высокостабильного излучения разработан и создан автономный высоковольтный DC/DC-преобразователь, имеющий малый уровень пульсаций (~250 мВ) выходного напряжения (~491 В) при токе нагрузки ~20 мА.

Выводы. Показана принципиальная возможность получения высокого напряжения при использовании топологии повышающего DC/DC-преобразователя с дросселем. Экспериментальная проверка подтвердила корректность расчетов и моделирования высоковольтного DC/DC-преобразователя для питания спектральных ламп с полым катодом.

Ключевые слова: спектральная лампа с полым катодом, газоразрядная лампа, импульсный преобразователь, DC/DC-преобразователь, высоковольтный преобразователь, моделирование

• Поступила: 27.01.2023 • Доработана: 07.05.2023 • Принята к опубликованию: 13.07.2023

Для цитирования: Никольшин М.Ю., Фрунзе А.В., Битюков В.К. DC/DC-преобразователь для питания спектральных ламп. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):81–93. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-81-93>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

DC/DC converter to power spectral lamps

Mikhail Yu. Nikolshin ¹,
Alexander V. Frunze ²,
Vladimir K. Bitukov ¹, @

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² TERMOKONT, Moscow, 119361 Russia

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

Abstract

Objectives. The paper describes the creation of a DC/DC converter for powering hollow cathode lamps widely used currently as highly stable sources of spectral lines in spectral absorption analyzers and other applications. Typically, mains power supplies are used for such lamps, since installations using hollow cathode lamps are manufactured as stationary. However, there are no principal obstacles to manufacturing portable versions by simply substituting the power supply. However, special attention should in this case be paid to the power supply of the spectral lamp itself, since the amplitude stability of the radiation depends on the smoothness of its supply voltage. Therefore, the development of the pulse DC/DC converter with high efficiency and low rippling is a relevant and expedient problem.

Methods. The set task is solved by methods of mathematical calculations, circuit simulation in *LTSpice XVII* computer-aided design system, and experimental verification.

Results. The structural and principal electrical circuit of a prototype converter is developed on the basis of a topological analysis of pulse DC/DC converters, along with its calculations and simulation, and a printed circuit board. The developed autonomous high-voltage DC/DC converter has a low ripple level (~250 mV) of the output voltage (~491 V) at a load current of ~20 mA to ensure highly stable radiation.

Conclusions. The possibility of obtaining a high voltage when using the topology of a step-up DC/DC converter with a choke is demonstrated. The experimental verification confirmed the correctness of calculations and modeling of a high-voltage DC/DC converter for powering hollow cathode spectral lamps.

Keywords: hollow cathode spectral lamp, gas discharge lamp, pulse converter, DC/DC converter, high-voltage converter, simulation

• Submitted: 27.01.2023 • Revised: 07.05.2023 • Accepted: 13.07.2023

For citation: Nikolshin M.Yu., Frunze A.V., Bitukov V.K. DC/DC converter to power spectral lamps. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):81–93. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-81-93>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Для получения высокостабильных спектров определенных длин волн используются лампы с полым катодом [1–5]. При возникновении разряда в лампе такого типа ее катод и инертный газ-наполнитель начинают излучать энергию в ультрафиолетовом и видимом спектральном диапазонах. Длины волн излучения определяются составом газа-наполнителя и катодного сплава. Например, лампа ЛФ-6М с цинковым напылением катода имеет основную спектральную линию 229.6 нм.

По принципу действия лампа с полым катодом является газоразрядной лампой, отсюда следует, что условия возникновения разряда не отличаются от аналогичных у других газоразрядных ламп, например, у индикаторных ламп с неоновым наполнением и тиратронов. Однако питание индикаторов возможно обеспечивать со значительным уровнем пульсаций, что недопустимо для спектральных ламп, т.к. пульсации тока, протекающего через лампу, вызывают изменение амплитуды спектральных составляющих. Учитывая, что спектральные лампы используются в контрольно-измерительной аппаратуре, интенсивность формируемых спектральных составляющих должна быть как можно более стабильной. Стабильность интенсивности излучения зависит как от свойств самой лампы, так и от параметров питающего напряжения. Свойства лампы, влияющие на стабильность интенсивности излучения, такие как эмиссия, чистота стекла, долговечность и т.п., в настоящей работе не рассматриваются.

Известно [6], что стабильность параметров источника питания достигается применением системы отрицательной обратной связи (ООС). Применительно к устройствам со спектральными лампами это достигается введением петли ООС либо по току потребления лампы, либо по уровню излучаемого светового потока. Причем уменьшение пульсаций излучения лампы в значительной степени связано с понижением пульсаций ее питающего напряжения.

Как правило, приборы, использующие спектральные газоразрядные лампы, имеют сетевое питание [7]. Это определяет стационарный характер их использования. Сетевой источник питания традиционно выполняют по схеме с непрерывным регулированием. Такие устройства позволяют получить на выходе стабильное напряжение с малыми пульсациями. При этом вопросы об их КПД и массогабаритных параметрах не являются актуальными. В [7] предложен один из вариантов реализации такого источника питания для спектральных ламп, в котором для получения высокого напряжения использован принцип умножения сетевого напряжения.

Однако актуален и принципиально возможен и переносной форм-фактор использования приборов со спектральной лампой. Для таких автономных устройств целесообразно применение импульсного источника питания в силу меньших его массогабаритных параметров по сравнению с линейными источниками вторичного электропитания.

ПАРАМЕТРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЕГО СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Технические требования к выходному напряжению и силе тока нагрузки DC/DC-преобразователя определяются параметрами выпускаемых отечественных ламп с полым катодом, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры напряжения зажигания и силы тока отечественных ламп с полым катодом

Тип лампы	Напряжение зажигания, В	Сила тока лампы, мА
ЛТ-2	450	20
ЛВ-2	300	20
ЛТ-6М	500	12

Можно сформулировать следующие базовые требования к импульсному преобразователю для ламп с полым катодом: выходное напряжение 500 В; ток нагрузки не менее 0.02 А; пульсации выходного напряжения при токовой нагрузке 20 мА не более 0.5 В; входное напряжение ~15 В.

Эти параметры вполне можно получить с помощью DC/DC-преобразователя, построенного по схеме классического повышающего преобразователя (рис. 1) [8, 9].

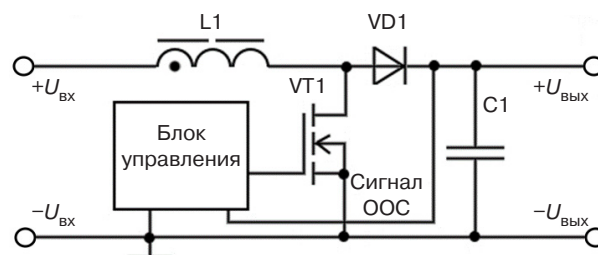


Рис. 1. Схема силовой части повышающего DC/DC-преобразователя. Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81¹

¹ ГОСТ 2.710-81. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

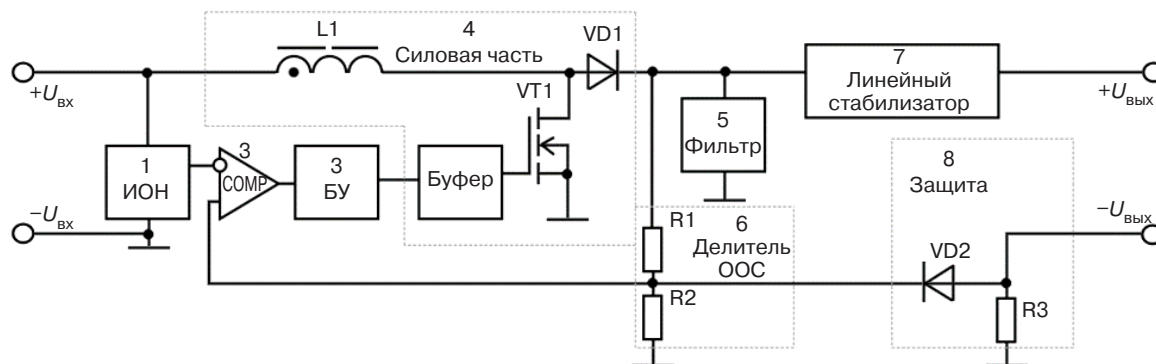


Рис. 2. Структурная схема DC/DC-преобразователя

Регулировка выходного напряжения преобразователя осуществляется широтно-импульсной (ШИМ) или частотно-импульсной модуляцией. Особенности этих модуляций рассмотрены в [8–12].

Блок управления изменяет коэффициент заполнения импульсов при достижении заданного порога выходного напряжения. В качестве основного элемента блока управления необходимо использовать схему, которая изменяет коэффициент заполнения, либо частоту импульсов при достижении некоего порога выходного напряжения. В качестве такового можно использовать широко распространенный интегральный таймер КР1441ВИ1² аналог микросхемы TLC555³, представляющей собой КМОП-версию⁴ NE555), который можно включить в режиме астабильного мультивибратора, т.е. генератора прямоугольных импульсов с заданной скважностью. Регулировка выходного напряжения в схеме обеспечивается изменением тока между контактом Control (вывод 5 для 8-выводного корпуса) и общим проводом схемы. При этом будет меняться частота выходных импульсов. В качестве регулировочного элемента, который изменяет ток контакта Control, используется биполярный транзистор.

В качестве датчика, который будет детектировать напряжение 500 В на выходе преобразователя, необходима схема, четко фиксирующая факт достижения указанного напряжения. Связано это с тем, что коммутатор вывода Control имеет, во-первых, область активного режима, при котором он открыт

не полностью, и во-вторых, имеет технологический разброс напряжений открывания. Например, один биполярный транзистор может быть открыт полностью при 0.76 В, другой же при 0.78 В, третий при 0.75 В и т.д. Разброс напряжений вызовет разброс напряжений стабилизации, т.е. открывание транзистора должно обеспечиваться сторонней схемой, которая имеет минимальный разброс напряжения срабатывания.

В качестве такого датчика возможно использовать компаратор, к примеру, К554СА301А⁵ (аналог LM311⁶), к инвертирующему входу которого подключен источник опорного напряжения (ИОН), реализованный на параметрическом стабилизаторе напряжения, а к неинвертирующему – средняя точка делителя выходного напряжения, рассчитанного таким образом, что при входном напряжении 500 В на его средней точке будет напряжение, равное выходному напряжению ИОН. При превышении напряжения на неинвертирующем входе компаратор закрывает встроенный выходной транзистор, тем самым устанавливая на выходе высокое напряжение. Это высокое напряжение открывает транзистор, подключенный к выводу Control микросхемы КР1441ВИ1, тем самым останавливая генерацию. При снижении уровня выходного напряжения ниже 500 В компаратор меняет свое состояние из-за превышения уровня опорного напряжения над выходным напряжением делителя, а транзистор закрывается, вновь вызывая генерацию импульсов.

Структурная схема преобразователя показана на рис. 2.

Функциональное назначение блоков DC/DC-преобразователя, отмеченных на рис. 2 цифрами, следующее:

1 – ИОН. Предназначен для формирования стабильного напряжения, являющегося опорным

² Производство ОАО «Микрон», г. Зеленоград, Россия. [Manufactured by Mikron, Zelenograd, Russia.]

³ TLC555 datasheet. https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2008261939_HGSEMI-TLC555N_C725329.pdf. Дата обращения 20.05.2023. / Accessed May 20, 2023.

⁴ КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) – технология и схемотехника интегральных микросхем, выполненная на основе *p*- и *n*-канальных транзисторов с изолированным затвором. [A complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) is the integrated circuit technology and circuit design based on *p*- and *n*-channel transistors with insulated gate.]

⁵ Производство ОАО «Микрон», г. Зеленоград, Россия. [Manufactured by Mikron, Zelenograd, Russia.]

⁶ LM311 datasheet. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm211-d.pdf>. Дата обращения 20.05.2023. / Accessed May 20, 2023.

для срабатывания компаратора 2 при достижении заданного выходного напряжения.

2 – Компаратор (COMP). Пока напряжение на выходе делителя ООС 6 менее напряжения, вырабатываемого ИОН, компаратор имеет на своем выходе низкий уровень напряжения. Низкий уровень на входе блока управления 3 разрешает генерацию импульсов. При превышении напряжения на выходе делителя ООС 6 над уровнем ИОН компаратор на выходе устанавливает высокий уровень напряжения, который запрещает блоку управления 3 генерировать импульсы.

3 – Блок управления (БУ). Формирует импульсы прямоугольной формы, которые управляют силовой частью 4 преобразователя путем включения или выключения МОП-транзистора⁷ VT1.

4 – Силовая часть. В ее состав входят дроссель L1, на котором наводится ЭДС индукции, ключевой МОП-транзистор VT1, коммутирующий правый по схеме отвод дросселя L1 либо к диоду VD1, либо к «земле», выпрямительный диод VD1 и буферный каскад. Буферный каскад необходим для согласования слаботоочного выходного каскада блока управления 3 с большим током заряда затвора МОП-транзистора VT1 при его открывании и закрывании за малый промежуток времени.

5 – Фильтр. Предназначен для сглаживания выходного напряжения.

6 – Делитель ООС. Коэффициент деления делителя определяет выходное напряжение: когда напряжение на выходе делителя ООС, подключенного к неинвертирующему входу компаратора 2, станет выше выходного напряжения ИОН 1 (которое подведено к инвертирующему его входу), компаратор 2 установит высокий уровень, и блок управления 3 перестанет генерировать импульсы, тем самым останавливая преобразование до тех пор, пока уровень на выходе компаратора вновь не станет низким. Это достигается только в случае если напряжение на выходе делителя 6, поддерживаемое емкостным фильтром 5, вновь не станет меньше напряжения ИОН 1. Выходное напряжение $U_{\text{дел}}$ делителя определяется по формуле

$$U_{\text{дел}} = U_{\text{ин}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ин}}$ – входное напряжение делителя (в данной схеме это выходное напряжение преобразователя), R_1 и R_2 – сопротивления плеч делителя отрицательной обратной связи.

⁷ МОП-транзистор («металл-оксид-полупроводник») – полевой транзистор с изолированным затвором. [The metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) is a field-effect transistor with insulated gate.]

7 – Линейный стабилизатор. Для снижения уровня пульсаций выходного напряжения использован компенсационный стабилизатор напряжения с непрерывным регулированием. Схема его приведена на рис. 3 (элементы R16, VD6–VD10, VT7, C7). Выходное напряжение стабилизатора равно сумме напряжений стабилизации стабилитронов VD6–VD10 плюс напряжение база-эмиттер транзистора VT7 (порядка 0.5–0.7 В). Расчеты показали, что при выходном напряжении импульсного преобразователя 530 В, выходном напряжении линейного стабилизатора 500 В и токе нагрузки 20 мА на регулирующем транзисторе будет рассеиваться мощность 0.6 Вт.

8 – Защита. При превышении током номинальной величины, определяемой сопротивлением резистора R3, напряжение на неинвертирующем входе компаратора 2 станет выше уровня напряжения ИОН 1, что вызовет прекращение генерации импульсов блоком управления 3. По сути, это параллельный канал обратной связи. Диод VD2 предназначен для предотвращения протекания тока от делителя ООС 6 через резистор R3. Сопротивление резистора R3 вычисляется исходя из напряжения переключения компаратора $U_{\text{ИОН}}$, протекающего тока нагрузки, при котором срабатывает защита $I_{\text{защ}}$, и прямого падения напряжения $U_{\text{VD2 пр}}$ на диоде VD2 по формуле:

$$R_3 = \frac{U_{\text{ИОН}} + U_{\text{VD2 пр}}}{I_{\text{защ}}}. \quad (2)$$

Для тока срабатывания защиты 25 мА, опорного напряжения 3.3 В и прямого падения напряжения на диоде 0.6 В сопротивление резистора R3 равно 156 Ом. Этот резистор включен последовательно с нагрузкой, и на нем неизбежно упадет некоторая часть выходного напряжения. Рабочее напряжение спектральных ламп находится в промежутке 250–300 В, а рекомендуемый ток поддержания разряда – до 2/3 максимального, т.е. 8–12 мА. Стоит отметить, что срок службы спектральных ламп нормируется в миллиампер-часах, т.е. снижение тока повышает не только эмпирический, но и документально зафиксированный паспортный срок службы лампы. Эквивалентное сопротивление лампы, соответственно, будет лежать в промежутке от 20.8 до 37.5 кОм. В наихудшем случае, т.е. когда сопротивление лампы минимально, падение напряжения на R2, вычисляемое по формуле (1), составит 3.7 В, т.е. менее 1% от выходного напряжения, что на практике совершенно незаметно. Если же необходимо точное соответствие выходного напряжения паспорту, то его можно скорректировать установкой выходного напряжения не на холостом ходу, а под

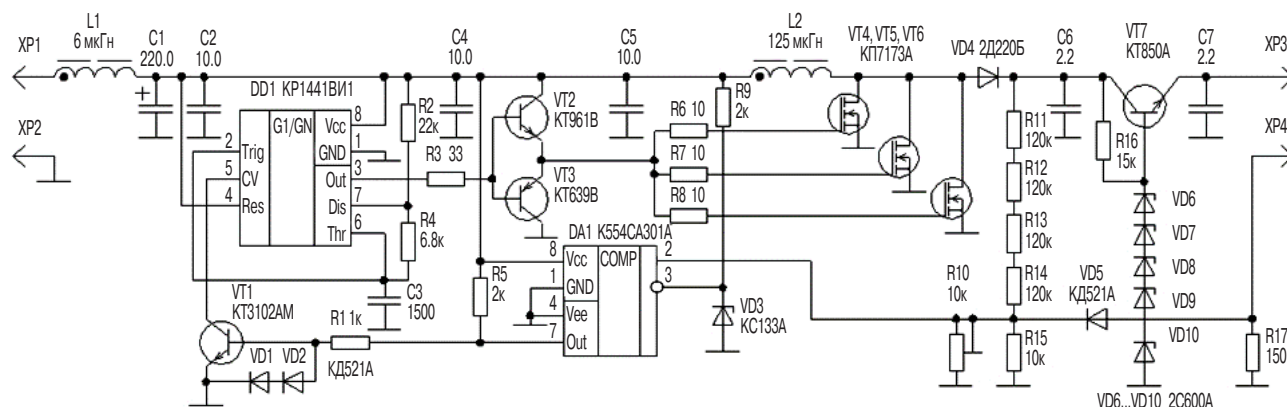


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема DC/DC-преобразователя

нагрузкой, в качестве которой может выступать резистор, сопротивление которого будет эквивалентно сопротивлению конкретного типа лампы.

Стоит подробнее остановиться на выборе типа и номинала дросселя L1. Как известно, существуют два режима работы повышающего преобразователя – режим неразрывных токов и режим разрывных токов. Режим неразрывных токов означает, что ток через обмотку дросселя L1 протекает во все фазы работы преобразователя. Он изменяется, но никогда не становится равным нулю. В режиме разрывных токов ток через обмотку дросселя L1 при замыкании ключевого транзистора успевает упасть до нуля. С точки зрения понижения уровня пульсаций предпочтительнее режим неразрывных токов. Однако расчет дросселя по методике [8] показывает, что значение индуктивности для режима неразрывных токов для ШИМ будет лежать в пределах от 1.5 до 5.0 мГн (в зависимости от частоты работы преобразователя). Такой дроссель имеет значительные размеры, массу и стоимость. Это предопределило использование в преобразователе режим разрывных токов с индуктивностью дросселя порядка 50–150 мГн. Неизбежное повышение пульсаций при этом было нивелировано применением линейного стабилизатора напряжения.

ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА

Принципиальная электрическая схема DC/DC-преобразователя для питания спектральных ламп представлена на рис. 3.

Элементы L1, C1 и C2 образуют входной фильтр. Дроссель L1 сглаживает входной ток, тем самым снижая уровень импульсных помех у источника питания преобразователя.

На элементах DD1, R2, R4 и C3 выполнен задающий генератор. Частота импульсов до перехода в режим стабилизации составляет 27.7 кГц, а коэффициент заполнения равен 0.8.

Силовая часть преобразователя построена на элементах R3, VT2–VT6, R6–R8, L2. Обращает на себя внимание схемотехническая особенность построения силовой части – параллельное включение МОП-транзисторов VT5, VT6, VT7, работающих в ключевом режиме. КП7173А⁸ – один из немногих отечественных⁹ МОП-транзисторов, подходящих для данного применения по уровню напряжения «сток-исток». К сожалению, сопротивление его открытого канала оставляет желать лучшего и может достигать 2 Ом (согласно данным о его полном аналоге STP4NK60Z¹⁰). Очевидно, что при силе тока стока 4 А и коэффициенте заполнения 0.5 среднее квадратичное значение рассеиваемой мощности составит 4 Вт. При этом не учтены потери, вызываемые нахождением рабочей точки транзистора в активном режиме во время открывания и закрывания канала. Такая рассеиваемая мощность допустима для транзистора, но вынуждает использовать для него охлаждающие, а это существенно понижает КПД преобразователя. Одним из путей решения этой проблемы является параллельное включение нескольких транзисторов.

Параллельное включение МОП-транзисторов допустимо, т.к. даже в случае (неизбежного) разброса сопротивлений каналов транзистор с наименьшим сопротивлением будет больше греться из-за большего протекающего тока. При повышении температуры кристалла МОП-транзистора сопротивление его открытого канала возрастает, тем самым вызывая снижение тока.

⁸ Справочные данные на КП7173А. [Reference data on KP7173A.] <https://integral.by/sites/default/files/pdf/kp7173.pdf>. Дата обращения 20.05.2023. / Accessed May 20, 2023.

⁹ Производство ОАО «Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь. [Manufactured by Integral, Minsk, Belarus.]

¹⁰ STP4NK60Z datasheet: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stp4nk60z.pdf>. Дата обращения 20.05.2023. / Accessed May 20, 2023.

Таблица 2. Рассеиваемая мощность параллельно включенных транзисторов

Количество транзисторов, шт	Эквивалентное сопротивление, Ом	Суммарная рассеиваемая мощность при силе тока 4 А и коэффициенте заполнения 0.5, Вт	Рассеиваемая мощность на 1 транзистор в случае равенства сопротивлений каналов, Вт
3	0.667	1.35	0.45
4	0.5	1.00	0.25
5	0.4	0.80	0.20

Расчет необходимого количества ключевых транзисторов продиктован током, который протекает через них, а также их нагревом.

Максимальная температура перехода транзистора КП7173А составляет +150 °С, тепловое сопротивление «кристалл-корпус» составляет 1.78 К/Вт. Тепловое сопротивление «кристалл-среда» для корпуса КТ-28-2 (ТО-220), в котором смонтирован кристалл транзистора КП7173А, составляет, по различным данным, от 50 °С/Вт до 70 °С/Вт. При использовании преобразователя в условиях УХЛ 4.2¹¹ (максимальная температура воздуха составляет +40 °С), приняв запас в +25 °С на нагрев внутри изделия, а также выбрав максимальную температуру перехода транзистора в +100 °С, получают допустимый перегрев корпуса в +35 °С. В случае теплового сопротивления «кристалл-среда» 70 °С/Вт получают максимальную рассеиваемую мощность, равную 0.5 Вт. Следовательно, трех транзисторов (рассеиваемая мощность на каждом 0.45 Вт, температура кристалла 96.5 °С, температура корпуса 54.2 °С) с точки зрения тепловых режимов без использования охладителей будет достаточно¹².

Транзисторы VT2 (КТ639В¹³) и VT3 (КТ961В¹⁴) являются драйверными для полевых транзисторов VT4, VT5 и VT6, т.к. затвор МОП-транзистора представляет собой емкость, которую для открытия и закрытия транзистора необходимо быстро заряжать и разряжать. Полный заряд Q затвора [13] для

транзистора STP4NK60Z составляет 26 нКл, как указано в его технической документации. Зная полный заряд и необходимое время T сообщения этого заряда, сила тока I определяется по формуле:

$$I = \frac{Q}{T}. \quad (3)$$

Для заряда в 78 нКл (три параллельно включенных транзистора) и времени заряда 100 нс ток заряда составит 780 мА¹⁵. Выход микросхемы КР1441ВИ1 на такой ток не рассчитан, следовательно, необходим буферный каскад. При этом ток, потребляемый по входу буферным каскадом, будет в $h_{21\beta}$ раз меньше отдаваемого тока. Согласно [14], минимальный коэффициент передачи тока $h_{21\beta}$ для транзисторов КТ961В и КТ639В составляет 100, из чего следует что максимальный ток, отдаваемый микросхемой, сократится до 7.8 мА. Резистор R5 служит для ограничения тока, а резисторы R9–R11, помимо ограничения тока, также подавляют резонансные колебания по цепи «емкость-«затвор-исток»-индуктивность стока» [15]. В качестве накопительного дросселя L2 используется дроссель Д13–14 с последовательно включенными обмотками (125 мкГн, 4 А, 0.05 Ом, 2 МГц). Выпрямление выходного напряжения осуществляется диодом VD4 типа 2Д220Б¹⁶.

Схема стабилизации выходного напряжения выполнена на компараторе DA1, транзисторе VT1 и его обвязке, параметрическом стабилизаторе напряжения (ИОН) на стабилитроне VD3 (3.3 В), делителе R11–R15. Верхнее плечо делителя R11–R15 состоит из четырех последовательно соединенных резисторов для повышения максимально допустимого приложенного к ним напряжения. Резистор R10 – подстроечный, вращением его движка выставляется выходное напряжение 530 В. В случае его обрыва выходное напряжение установится на уровне 160 В. При включении преобразователя выходное напряжение начинает расти, следовательно, начинает увеличиваться

¹¹ ГОСТ 15050-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М.: Стандартинформ; 2010. [GOST 15050-69. Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic aspects influence. Moscow: Standardinform; 2010 (in Russ.).]

¹² При тепловом сопротивлении 50 °С/Вт температура кристалла составит 87.5 °С, температура корпуса 49.2 °С. [At the thermal resistance of 50 °С/W, the crystal temperature is 87.5 °С while the body temperature is 49.2 °С.]

¹³ Производство АО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск, Россия. [Manufactured by GRUPPA KREMNI EL, Bryansk, Russia.]

¹⁴ Производство ОАО «Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь. [Manufactured by Integral, Minsk, Belarus.]

¹⁵ 26 нКл заряда затвора – предельный случай, типовое значение составляет 18.8 нКл. [The limiting case is 26 nC of gate charge; the typical value is 18.8 nC.]

¹⁶ Производство НПП ТЭЗ, г. Томилино, Россия. [Manufactured by the Scientific and Production Enterprise TOMILINO ELECTRONIC PLANT, Tomilino, Russia.]

Таблица 3. Используемые компоненты и их аналоги

Тип по схеме	Модель	Аналог (полный или частичный)	Примечание
KP1441BI1	TLC555	Полный	–
K554CA301A	LM311	Полный	–
KП7173А	SPP20N60C3	Частичный	Добавлен резистор 1.4 Ом в сток для приближения к $R_{СИ\ отк}$ КП7173А, где $R_{СИ\ отк}$ – сопротивление сток-исток в открытом состоянии транзистора
2Д220Б	DI_US1J ¹	Частичный	Совпадает по емкостям, обратному напряжению $U_{обр}$, прямому току $I_{пр}$, однако имеет меньшее время обратного восстановления (75 нс против 600 нс)
2С600А	PH_BZX585-B75 ² , PH_BZX585-B51 ²⁰	Полный	В модели использована сборка из стабилитронов на 75 и 51 В, на суммарное напряжение стабилизации 601 В
KC133А ³	BZX84C3V3 ¹⁹	Полный	–
КТ961В	BD139 ⁴	Полный	–
КТ639В	BD140 ²²	Частичный	Совпадает по напряжению коллектор-эмиттер $U_{кэ}$, току коллектора $I_{к}$ и граничной частоте $F_{гр}$
КТ850А	BD139	Частичный	Совпадает по $U_{кэ}$, $I_{к}$ и $F_{гр}$
КТ3102А ⁵	2N3904 ⁶	Частичный	Имеет меньшую $h_{21э}$, однако в данном конкретном случае это не имеет значения

¹ Производство компании «Vishay», США. [Manufactured by Vishay, USA.]

² Производство компании «Nexperia», Нидерланды. [Manufactured by Nexperia, Netherlands.]

³ Производство АО «НЗПП Восток», г. Новосибирск, Россия. [Manufactured by Novosibirsk Semiconductor Device Plant, Novosibirsk, Russia.]

⁴ Производство компании «ST Microelectronics», Швейцария. [Manufactured by ST Microelectronics, Switzerland.]

⁵ Производство АО «Группа Кремний Эл», г. Брянск, Россия. [Manufactured by GRUPPA KREMNI EL, Bryansk, Russia.]

⁶ Производство компании «Diotec Semiconductor», Германия. [Manufactured by Diotec Semiconductor, Germany.]

и напряжение на выходе делителя. Как только оно сравняется или станет выше опорного напряжения 3.3 В, компаратор установит высокий уровень на выходе, открыв транзистор VT1 и замкнув вывод 5 микросхемы DD1 на общий провод, что вызовет прекращение генерации импульсов. Напряжение на выходе при этом будет поддерживаться емкостным фильтром. Как только напряжение на выходе делителя упадет ниже 3.3 В, компаратор установит низкий уровень, закрыв транзистор VT1 и тем самым вновь разрешая генерацию импульсов.

Емкостной фильтр выходного напряжения выполнен на конденсаторе С6. Использовано параллельное включение 10 керамических конденсаторов 0.22 мкФ × 630 В типоразмера 2220 суммарной емкостью 2.2 мкФ.

Линейный стабилизатор выполнен на транзисторе VT7 КТ850А¹⁷, стабилитронах VD6-VD10 2С600А¹⁸ и токозадающем резисторе R16. Использовано по-

¹⁷ Производство АО «Группа Кремний Эл», г. Брянск, Россия. [Manufactured by GRUPPA KREMNI EL, Bryansk, Russia.]

¹⁸ Производство АО «НЗПП Восток», г. Новосибирск, Россия. [Manufactured by Novosibirsk Semiconductor Device Plant, Novosibirsk, Russia.]

следовательное включение пяти стабилитронов для получения напряжения стабилизации 500 В, т.к. стабилитронов на 500 В отечественная промышленность не выпускает.

Защита по току выполнена на элементах R18 и VD7. При превышении тока через нагрузку (следовательно, и через резистор R17) 25 мА падение напряжения на резисторе R17 за вычетом падения напряжения на диоде VD5 составит 3.3 В. Это заставит компаратор DD2 перевести выход в высокий уровень, тем самым прекратив генерацию импульсов. Диод VD5 предназначен для предотвращения протекания тока от делителя ООС к резистору R17.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Моделирование выполнялось в программе LTSpice XVII [16]. Были использованы модели активных компонентов, приведенные в табл. 3.

Схема модели приведена на рис. 4.

Моделирование осуществлялось при помощи директивы .tran 0 500m 1u uic – анализ переходного процесса, время начала снятия данных 0 с, время окончания снятия данных 0.5 с, шаг моделирования 1 мкс, включены переходные процессы в реактивностях.

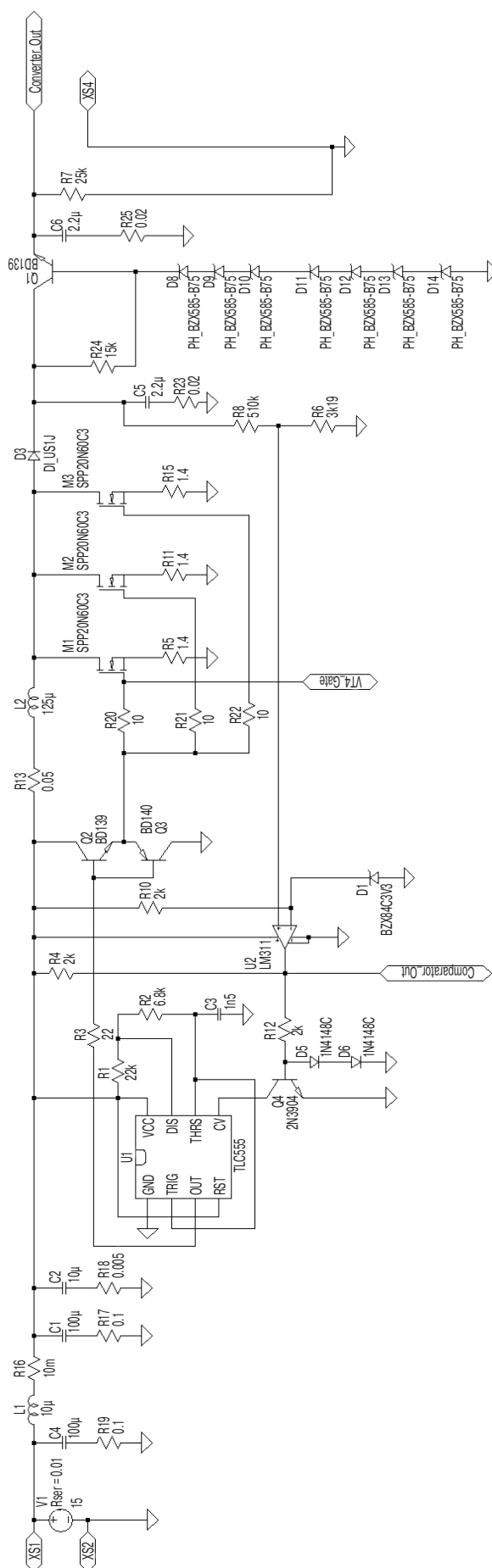


Рис. 4. Принципиальная схема преобразователя в LTSpice

Основные характерные диаграммы приведены на рис. 5.

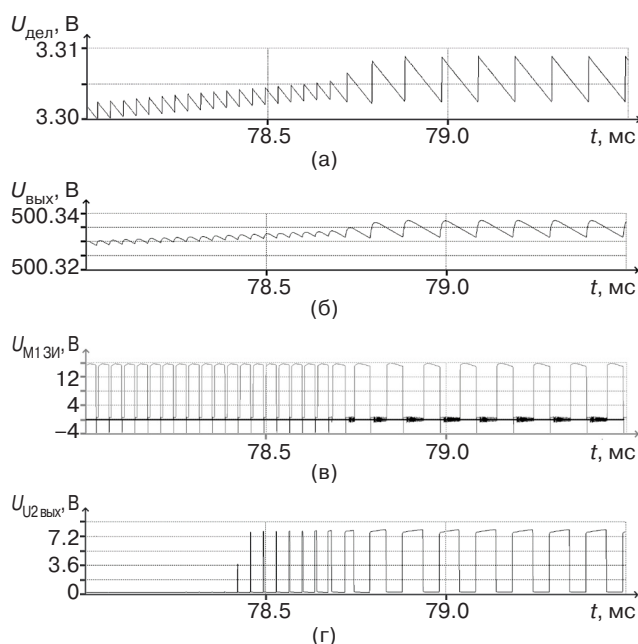


Рис. 5. Характерные диаграммы работы преобразователя: (а) напряжение на выходе делителя обратной связи $U_{\text{дел}}$, (б) выходное напряжение преобразователя $U_{\text{вых}}$, (в) напряжение на затворе полевого транзистора M1 $U_{M1_3И}$, (г) напряжение на выходе компаратора U2 $U_{U2_вых}$

Преобразователь в модели выходит на рабочий режим приблизительно через 79 мс после старта. В это время напряжение на выходе делителя обратной связи $U_{\text{дел}}$ доходит до уровня опорного напряжения компаратора. Выход компаратора $U_{U2_вых}$ устанавливается в уровень «высокое состояние». Высокий уровень сигнала на выходе компаратора, который образуется по достижении выходного напряжения 500 В, вызывает останов генерации на выходе микросхемы TLC555.

СБОРКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Преобразователь собран на двухсторонней печатной плате из фольгированного стеклотекстолита. Рисунок печатных дорожек выполнен полностью на нижней стороне платы. Верхняя сторона платы использована под общий провод, тем самым минимизировано ее сопротивление и индуктивность, что важно в импульсных высокочастотных схемах [17]. Монтаж смешанный. Фото печатной платы приведено на рис. 6.

Экспериментальный стенд преобразователя состоял из лабораторного блока питания Element PSN-305D¹⁹, который обеспечивал питание преобразователя;

¹⁹ Производство компании «Element», КНР. [Manufactured by Element, China.]



Рис. 6. Собранная плата преобразователя

ручного мультиметра Fluke 17B²⁰ в режиме вольтметра для измерения выходного напряжения; настольного мультиметра Uni-T UT802²¹ в режиме миллиамперметра для измерения выходного тока. Для снятия форм напряжений использовался цифровой осциллограф Rigol MSO 4024²². Фотографии стенда приведены на рис. 7 и 8, осциллограмма пульсаций на выходе преобразователя под нагрузкой – на рис. 9.

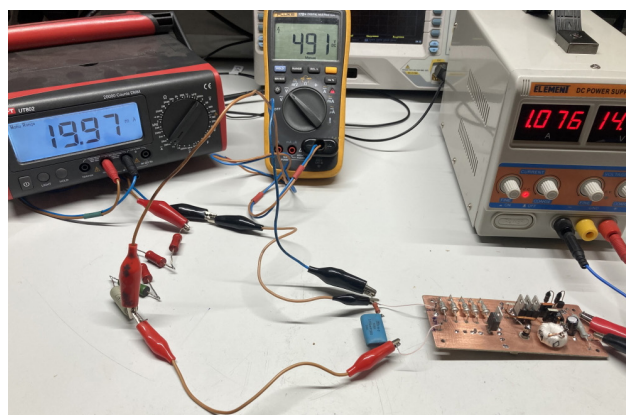


Рис. 7. Проверка нагрузочной способности преобразователя

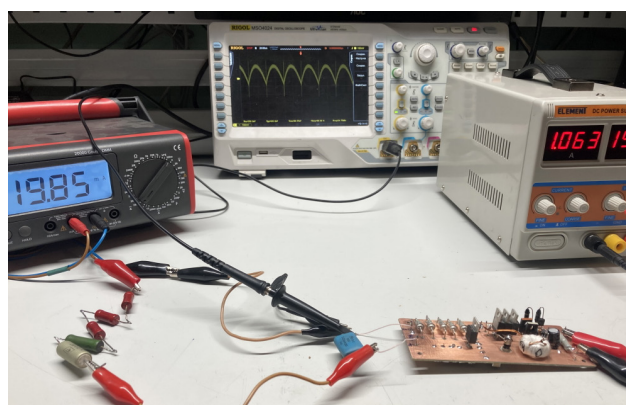


Рис. 8. Проверка уровня пульсаций на выходе преобразователя под нагрузкой

²⁰ Производство компании «Fluke», КНР. [Manufactured by Fluke, China.]

²¹ Производство компании «Uni-Trend Group», КНР. [Manufactured by Uni-Trend Group, China.]

²² Производство компании «Rigol Technologies», КНР. [Manufactured by Rigol Technologies, China.]

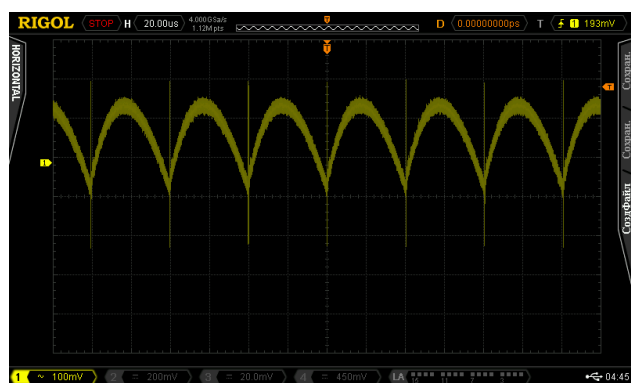


Рис. 9. Осциллограмма пульсаций выходного напряжения под нагрузкой

Преобразователь имеет выходное напряжение 491 В при токе 20 мА, что подтверждает его нагрузочную способность. В качестве нагрузки использовался составной резистор суммарным сопротивлением 25 кОм.

Для проверки уровня пульсаций осциллограф был подключен к выходу преобразователя через дифференцирующую RC-цепочку с номиналами 0.022 мкФ и 100 кОм. Частота среза фильтра высоких частот образованной такой цепочкой, составляет 72 Гц по уровню 3 дБ.

Пиковый уровень пульсаций составлял 250 мВ (0.05% относительно 500 В), что подтверждает вышеизложенные выкладки относительно малого уровня пульсаций рассматриваемого преобразователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты разработки, моделирования, схемотехнической сборки и экспериментального исследования специализированного импульсного DC/DC-преобразователя для питания спектральных ламп. Разработка принципиальной схемы проводилась с расчетом на минимальное число настроечных операций при сборке (как показано, от данной операции возможно и отказаться), а также на отсутствие необходимости использования теплоотвода и минимизацию использования импортной элементной базы. Моделирование DC/DC-преобразователя осуществлялось частично на приближенных аналогах, для чего в схему были введены дополнительные элементы для приближения параметров моделей к реально используемым компонентам. Печатная плата для преобразователя трассировалась с учетом минимизации индуктивности и сопротивления высокочастотных проводников и общего провода. Работоспособность преобразователя (в т.ч. с эквивалентом нагрузки для достижения требуемого выходного тока) и соответствие измерений результатам моделирования подтвердили корректность расчетов и моделирования. Преобразователь обеспечивает напряжение 491 В при токе порядка 20 мА и пиковом уровне пульсаций в 250 мВ (0.05%).

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. Москалев Б.И. *Разряд с полым катодом*. М.: Энергия; 1969. 184 с.
2. Максимов Д.Е., Рудневский Н.К. *Спектральный анализ с применением разряда в полым катодом*. Горький: ГГУ; 1979. 119 с.
3. Максимов Д.Е., Рудневский Н.К., Рудневский А.Н., Шабанова Т.М. *Спектральный анализ с применением разряда в полым катодом*. Горький: ГГУ; 1983. 71 с.
4. Гармаш А.В. *Введение в спектроскопические методы анализа. Оптические методы анализа*. М.: РАН ВХК; 1995. 38 с.
5. Битюков В.К., Горбунов Р.А., Симачков Д.С., Фрунзе А.В. Высокостабильный источник спектральных линий. *Оптика и спектроскопия*. 2019;126(4): 528–532. <http://doi.org/10.21883/OS.2019.04.47525.50-18>
6. Каганов В.И., Битюков В.К. *Основы радиоэлектроники и связи*. М.: Горячая линия-Телеком; 2012. 542 с.

REFERENCES

1. Moskalev B.I. *Razryad s polym katodom (Discharge with Hollow Cathode)*. Moscow: Energiya; 1969. 184 p. (in Russ.).
2. Maksimov D.E., Rudnevskii N.K. *Spektral'nyi analiz s primeneniem razryada v polom katode (Spectral Analysis Using Hollow Cathode Discharge)*. Gor'kii: GGU; 1979. 119 p. (in Russ.).
3. Maksimov D.E., Rudnevskii N.K., Rudnevskii A.N., Shabanova T.M. *Spektral'nyi analiz s primeneniem razryada v polom katode (Spectral Analysis Using Hollow Cathode Discharge)*. Gor'kii: GGU; 1983. 71 p. (in Russ.).
4. Garmash A.V. *Vvedenie v spektroskopicheskie metody analiza. Opticheskie metody analiza (Introduction to Spectroscopic Methods of Analysis. Optical Methods of Analysis)*. Moscow: RAN VKhK; 1995. 38 p. (in Russ.).

7. Скворцов Е.А., Симачков Д.С. Устройство по созданию высокостабильного излучения на основе ламп с полым катодом. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком – 2021»*: Сборник научных статей V международной научно-практической конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2021. С. 405–408. URL: <https://www.elibrary.ru/aclqox>
8. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Источники вторичного электропитания*. М.: Инфра-Инженерия; 2020. 376 с.
9. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Понижающе-повышающий DC/DC преобразователь с единственной индуктивностью. *Микроэлектроника*. 2022;51(1):60–70. <https://doi.org/10.31857/S0544126921060041>
10. Сергеев Б.С. *Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания: Справочник*. М.: Радио и связь; 1992. 224 с.
11. Мелешин В.И. *Транзисторная преобразовательная техника*. М.: Техносфера; 2005. 632 с.
12. Найвелт Г.С., Мазель К.Б., Хусаинов Ч.И. и др. *Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник*; под ред. Г.С. Найвелта. М.: Радио и связь; 1985. 576 с.
13. Бабенко В.П., Битюков В.К. Измерение заряда затвора для ключей на мощных MOSFET транзисторах. В сб.: *Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения. Материалы Второй всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения; 2017. С. 37–41. URL: <https://www.elibrary.ru/zebetl>
14. Зайцев А.А., Миркин А.И., Мокряков В.В. *Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: Справочник*; под ред. А.В. Голомедова. М.: КУБК-а; 1995. 640 с.
15. Новиков П. Затворный резистор. Часть 1. Силовая электроника. 2018;6(75):4–8.
16. Володин В.Я. *LTspice: компьютерное моделирование электронных схем*. СПб.: БХВ-Петербург; 2010. 400 с.
17. Барнс Дж. *Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами*: пер. с англ. М.: Мир; 1990. 238 с.
5. Bityukov B.K., Gorbunov R.A., Simachkov D.S., Frunze A.V. A Highly Stable Source of Spectral Lines. *Opt. Spectrosc.* 2019;126(4):450–453. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19040040> [Original Russian Text: Bityukov B.K., Gorbunov R.A., Simachkov D.S., Frunze A.V. A Highly Stable Source of Spectral Lines. *Optika i spektroskopiya*. 2019;126(4):528–532 (in Russ.). <http://doi.org/10.21883/OS.2019.04.47525.50-18>]
6. Kaganov V.I., Bityukov V.K. *Osnovy radioelektroniki i svyazi (Fundamentals of Radioelectronics and Communications)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2012. 542 p. (in Russ.).
7. Skvortsov E.A., Simachkov D.S. High-stability radiation device based on hollow cathode lamps. In: *Actual Problems and Perspectives for the Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (Radioinfocom 2021): Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2021. P. 405–408 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/aclqox>
8. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Istochniki vtorichnogo elektropitaniya (Secondary Power Sources)*. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2020. 376 p. (in Russ.).
9. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. DC/DC Buck-Boost Converter with Single Inductance. *Russ. Microelectron.* 2021;50(6):471–480. <https://doi.org/10.1134/S1063739721060044>
10. Sergeev B.S. *Skhemotekhnika funktsional'nykh uzlov istochnikov vtorichnogo elektropitaniya (Schematics of Functional Units of Secondary Power Sources. Reference-book)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1992. 224 p. (in Russ.).
11. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika (Transistor Converter Technology)*. Moscow: Tekhnosfera; 2005. 632 p. (in Russ.).
12. Naivel't G.S., Mazel' K.B., Khusainov Ch.I., et al. *Istochniki elektropitaniya radioelektronnoi apparatury (Power Supply Sources REA: reference-book)*. Naivel't G.S. (Ed.). Moscow: Radio i svyaz'; 1985. 576 p. (in Russ.).
13. Babenko V.P., Bityukov V.K. Gate charge measurement for high power MOSFET switches. In: *Modern Problems of Vocational Education: Experience and Solutions. Materials of the Second All-Russian scientific-practical conference with international participation*. 2017. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2017. P. 37–41 (in Russ.).
14. Zaitsev A.A., Mirkin A.I., Mokryakov V.V. *Poluprovodnikovye pribory. Tranzistory srednei i bol'shoi moshchnosti (Semiconductor Devices. Medium and High Power Transistors: Handbook)*. Golomedov A.V. (Ed.). Moscow: KUbk-a; 1995. 640 p. (in Russ.).
15. Novikov P. Gate resistor. Part 1. *Silovaya elektronika = Power Electronics*. 2018;6(75):4–8 (in Russ.).
16. Volodin V.Ya. *LTspice: komp'yuternoe modelirovanie elektronnykh skhem (LTspice: Computer Simulation of Electronic Circuits)*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg; 2010. 400 p. (in Russ.).
17. Barnes J.R. *Electronic System Design: Interference and Noise Control Techniques*. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1990. 238 p. (in Russ.). [Barnes J.R. *Electronic System Design: Interference and Noise Control Techniques*. New Jersey: Prentice Hall; 1987. 244 p.]

Об авторах

Никольшин Михаил Юрьевич, аспирант, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: florenica@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 6339-2251, <https://orcid.org/0009-0004-5353-7781>

Фрунзе Александр Вилленович, д.т.н., директор, Автономная некоммерческая организация по исследованию, разработке и внедрению научно-технических приборов «Термоконт» (119361, Россия, Москва, ул. Озерная, д. 42). E-mail: alex.fru@mail.ru. Scopus Author ID 6507641791, SPIN-код РИНЦ 7558-6141, <https://orcid.org/0009-0006-8602-3650>

Битюков Владимир Ксенофонович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института 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, Researcher ID Y-8325-2018, SPIN-код РИНЦ 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

About the authors

Mikhail Yu. Nikolshin, Postgraduate Student, 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: florenica@yandex.ru. RSCI SPIN-code 6339-2251, <https://orcid.org/0009-0004-5353-7781>

Alexander V. Frunze, Dr. Sci. (Eng.), Director of TERMOKONT Autonomous Non-Profit Organization for Research, Development and Implementation of Scientific and Technical Devices (42, Ozeraya ul. Moscow, 119361 Russia). E-mail: alex.fru@mail.ru. Scopus Author ID 6507641791, RSCI SPIN-code 7558-6141, <https://orcid.org/0009-0006-8602-3650>

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. Scopus Author ID 6603797260, Researcher ID Y-8325-2018, RSCI SPIN-code 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 681.5.015
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-94-105>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Об адаптивной идентификации систем с несколькими нелинейностями

Н.Н. Карабутов[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Задача идентификации систем с несколькими нелинейностями является актуальной. Решение этой задачи зависит от наличия обратных связей, способов соединения нелинейных звеньев, свойств сигналов. Специфика нелинейных систем накладывает отпечаток на методы синтеза систем управления. В условиях полной априорной определенности обычно применяют линеаризацию систем. Если существует априорная неопределенность, то задача синтеза системы идентификации обеспечения усложняется. Целью настоящей работы является разработка подхода к идентификации нелинейных динамических систем с несколькими нелинейностями. Для решения проблемы применяется подход, основанный на декомпозиции системы на ряд подсистем и разработке метода адаптивной идентификации, использующего только доступную информацию о системе и измерениях. Необходимо оценить частотные свойства сигналов, которые должны гарантировать оценку параметров системы и обеспечивать структурную идентифицируемость нелинейностей в системе; оценить работоспособность синтезированной адаптивной системы.

Методы. Применяются метод адаптивной идентификации системы, неявное идентификационное представление, S-синхронизация нелинейной системы, метод векторных функций Ляпунова.

Результаты. Введено условие постоянства возбуждения переменных состояния с учетом S-синхронизируемости нелинейной части системы. Дано обобщение условия постоянства возбуждения. Предложен способ декомпозиции системы в выходном пространстве. Получены адаптивные алгоритмы на основе второго метода Ляпунова. Доказана ограниченность траекторий адаптивной системы в параметрическом и координатном пространствах на основе векторных функций Ляпунова. Получены условия, гарантирующие экспоненциальную устойчивость траекторий системы. Рассмотрены системы генерации автоколебаний и нелинейной коррекции нелинейной системы.

Выводы. Результаты моделирования подтвердили возможность применения предлагаемого подхода для решения задач адаптивной идентификации с учетом оценки структурной идентифицируемости (S-синхронизируемости) нелинейной части системы. Исследовано влияние структуры и связей системы на качество получаемых параметрических оценок. Предлагаемые методы могут использоваться при разработке систем идентификации и управления сложными динамическими системами.

Ключевые слова: адаптивная идентификация, идентифицируемость, устойчивость, постоянство возбуждения, векторная функция Ляпунова, автоколебания

• Поступила: 06.02.2023 • Доработана: 03.05.2023 • Принята к опубликованию: 21.07.2023

Для цитирования: Карабутов Н.Н. Об адаптивной идентификации систем с несколькими нелинейностями. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):94–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-94-105>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

On adaptive identification of systems having multiple nonlinearities

Nikolay N. Karabutov [@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The solution to the relevant problem of identifying systems with multiple nonlinearities depends on such factors as feedback, ways of connecting nonlinear links, and signal properties. The specifics of nonlinear systems affect control systems design methods. As a rule, the basis for the development of a mathematical model involves the linearization of a system. Under conditions of uncertainty, the identification problem becomes even more relevant. Therefore, the present work sets out to develop an approach to the identification of nonlinear dynamical systems under conditions of uncertainty. In order to obtain a solution to the problem, an adaptive identification method is developed by decomposing the system into subsystems.

Methods. Methods applied include the adaptive identification method, implicit identified representation, S-synchronization of a nonlinear system, and the Lyapunov vector function method.

Results. A generalization of the excitation constancy condition based on fulfilling the S-synchronizability for a nonlinear system is proposed along with a method for decomposing the system in the output space. Adaptive algorithms are obtained on the basis of the second Lyapunov method. The boundedness of the adaptive system trajectories in parametric and coordinate spaces is demonstrated. Approaches for self-oscillation generation and nonlinear correction of a nonlinear system are considered along with obtained exponential stability conditions for the adaptive system

Conclusions. Simulation results confirm the possibility of applying the proposed approach to solving the problems of adaptive identification while taking the estimation of the structural identifiability (S-synchronization) of the system nonlinear part into account. The influence of the structure and relations of the system on the quality of the obtained parametric estimates is investigated. The proposed methods can be used in developing identification and control systems for complex dynamic systems.

Keywords: adaptive identification, identifiability, stability, excitation constancy, Lyapunov vector function, self-oscillation

• Submitted: 06.02.2023 • Revised: 03.05.2023 • Accepted: 21.07.2023

For citation: Karabutov N.N. On adaptive identification of systems having multiple nonlinearities. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):94–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-94-105>

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

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Идентификации систем с несколькими нелинейностями (СНН) посвящен ряд исследований [1–11]. В [1] рассмотрен случай, когда система содержит несколько последовательно включенных нелинейностей и предложен способ идентификации. Обнаружение нелинейности выполнено с помощью синусоидальных тестов. Аналогичный подход, основанный на методе описания функций, применен в [2] для параметрической идентификации системы с двумя нелинейными элементами в разных местах. В [3] предложен подход к оценке параметров передаточной функции нелинейной системы второго порядка, содержащей две нелинейности. Предварительно выполняется гармоническая линеаризация нелинейностей. В [4] отмечены трудности идентификации СНН. Подход к оценке параметров основан на основе аппроксимации функций. Различные методы, основанные на аппроксимации нелинейности, рассмотрены в [5–7]. В [7, 8] изучаются подходы к идентификации дискретных систем с обратной связью. Применен метод наименьших квадратов и получены условия идентифицируемости [8].

Работа [9] посвящена идентификации системы с нелинейными механическими колебаниями. Модель имеет вид «серого ящика» и основана на применении нелинейных базисных функций с использованием ограниченного числа измеренных выходных переменных. Другие подходы к идентификации рассмотрены в [10–14]. Они основаны на учете физических законов при выборе структуры модели [11], применении частотных методов для системы с обратной связью [12] и теории обучения [13].

Обзор [15] посвящен анализу методов идентификации нелинейных процессов в динамике конструкций. В основном применяются модификации частотного подхода. Отмечены недостатки подходов, основанных на линеаризации, гармоническом балансе, методе поверхности восстанавливающей силы. В [16] применялись регрессионный анализ и преобразование Гилберта. В [17] для идентификации бифуркационных процессов использовались методы теории хаоса.

Различные подходы, основанные на оценивании параметров передаточной функции системы с обратной связью (СОС), представлены в [18–21]. Часто идентификацию СОС сводят к идентификации разомкнутой системы. В [22, 23] отмечаются трудности идентификации СОС.

Итак, из представленного обзора следует, что в большинстве исследований применяются частотные методы идентификации нелинейной системы. В некоторых случаях предлагаются подходы к оценке структуры нелинейности. Обычно применяются различные

процедуры линеаризации нелинейности из заданного класса. Идентификации систем с несколькими нелинейностями уделялось меньше внимания. Это связано со сложностью таких систем. В этих случаях применяются различные подходы и методы идентификации, основанные на локализации нелинейности.

Проблема идентификация СНН является сложной и недостаточно изученной. Она требует решения ряда задач, рассмотрение которых дается ниже.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается система S_F

$$\dot{X}(t) = AX(t) + DF_1(X, t) + BU(t), \quad (1)$$

$$LY(t) = CX(t) + F_2(X, t), \quad (2)$$

где $X \in \mathbb{R}^m$ – вектор состояния; $A \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – матрица состояния; $D \in \mathbb{R}^{m \times q}$; $F_1(X, t): \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^q$ – нелинейная вектор-функция; $U \in \mathbb{R}^k$ – вектор входа (управления); $B \in \mathbb{R}^{m \times k}$; $Y \in \mathbb{R}^n$ – вектор выхода; $C \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $F_2(X, t): \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ – вектор возмущений (ошибок измерения); L – оператор, определяющий способ формирования вектора Y ; t – время. В некоторых случаях L может быть дифференциальным оператором, отражающим динамические свойства системы измерений.

Рассмотрим множество данных

$$\mathbb{I}_0 = \{Y(t), U(t), t \in [t_0, t_N]\}, t_N < \infty. \quad (3)$$

Предположение 1. Элементы $\varphi_{1,i}(x_j) \in F_1$, $\varphi_{2,i}(x_j) \in F_2$ (нелинейные функции, принадлежащие F) являются гладкими однозначными функциями.

В некоторых случаях может выполняться условие $\varphi_i^1(x_j) = \varphi_i^1(\varphi_k^1(x_j))$, $i \neq k$. Для оценки параметров матриц A , D , B , C применим модель

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}(t) = \hat{A}(t)\hat{X}(t) + \hat{D}(t)F_1(X, t) + \hat{B}(t)U(t), \\ L\hat{Y}(t) = CX(t) + F_2(X, t), \end{cases} \quad (4)$$

где $\hat{A}(t)$, $\hat{D}(t)$, $\hat{B}(t)$ – матрицы с настраиваемыми параметрами.

Задача: для системы (1), удовлетворяющей предположению 1, на основе анализа $\mathbb{I}_0$ построить модель (4) и найти такие законы настройки параметров матриц $\hat{A}(t)$, $\hat{D}(t)$ и $\hat{B}(t)$, чтобы

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{Y}(t) - Y(t)\| \leq \delta_y,$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма, $\delta_y \geq 0$ – задает точность работы модели (4).

УСЛОВИЕ ПОСТОЯНСТВА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Условие постоянства возбуждения (ПВ) играет важную роль в задачах параметрического оценивания. Если система является нелинейной, то выполнение этого условия может оказаться недостаточным. Как показано в [24, 25], система должна обладать свойством S-синхронизируемости, чтобы можно было учитывать нелинейные свойства системы.

Пусть существуют: 1) ограниченный вектор $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^m$ и соответствующее ему множество частот $\Omega_p(\omega)$; 2) множество допустимых частот входа $\Omega_S(\omega)$, обеспечивающих S-синхронизируемость системы. Тогда условие ПВ для матрицы $\mathbf{B}_p(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{P}^T(t)$ имеет вид

$$\mathcal{PE}_{\alpha, \bar{\alpha}}^S : (\alpha \mathbf{I}_1 \leq \mathbf{B}_p(t) \leq \bar{\alpha} \mathbf{I}_1) \& (\Omega_p(\omega) \subseteq \Omega_S(\omega)) \quad (5)$$

для $\alpha > 0$ и $\forall t \geq t_0$ на некотором интервале $T > 0$, где $\bar{\alpha} > 0$ – некоторое число, $\mathbf{I}_1 \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – единичная матрица. Обычно $\mathbf{P}(t)$ представляет собой вектор изменений и переменных состояния.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИДЕНТИФИКАЦИИ

Ниже излагается процедура идентификации системы $\mathbf{S}_F$, основанная на структурно-параметрическом подходе (СПП) [26]. В зависимости от имеющейся априорной информации может применяться несколько этапов, реализующих СПП. Система (1), (2) имеет сложный вид, и для синтеза адаптивных алгоритмов необходима априорная информация о ее структуре. Полагаем, что известен состав подсистем, входящих в систему $\mathbf{S}_F$. Следовательно, на основе размерности вектора выхода системы матрицу $\mathbf{A}$ можно разбить на n блоков (подсистем $\mathbf{S}_{F, n} \subseteq \mathbf{S}_F$, $\{\mathbf{s}_{F, i}\} \in \mathbf{S}_{F, n}$, $j < n$). Выполним анализ подсистем (блоков) и выделим те, которые содержат нелинейности, т.е. $\mathbf{S}_{F, \text{nonlin}} \subseteq \mathbf{S}_{F, n}$. Далее к каждому элементу $\mathbf{S}_{F, \text{nonlin}, k} \in \mathbf{S}_{F, \text{nonlin}}$ применим СПП. Если подсистема $\{\mathbf{s}_{F, i}\} \in \mathbf{S}_{F, n} \setminus \mathbf{S}_{F, \text{nonlin}}$ не содержит нелинейностей, то к ней применяем процедуру адаптивной идентификации.

Замечание 1. Структурно-параметрический подход основан на S-синхронизируемости системы и выполнении условия (5).

В условиях неопределенности СПП можно разбить на две процедуры: 1) структурный анализ $\mathbf{S}_F$, 2) параметрическое оценивание (адаптивная идентификация). Эти этапы подробно описаны в [26] и поэтому на них останавливаться не будем.

Замечание 2. На структурную идентифицируемость (S-синхронизируемость) системы большое влияние оказывает способ соединения подсистем

и взаимовлияние переменных. В этом случае для оценки идентифицируемости нелинейных элементов системы необходимо строить диаграмму взаимовлияния в системе [27]. Анализ взаимосвязей позволяет исключить эффект от влияющих переменных и принять решение о структурной идентифицируемости системы (нелинейности). Построение диаграммы взаимовлияния возможно только при выполнении условия $\mathcal{PE}_{\alpha, \bar{\alpha}}^S$.

Замечание 3. Оценка S-синхронизируемости системы основана на анализе специального класса динамических структур $\mathcal{S}_{ey}$, отражающих структуру нелинейностей соответствующей подсистемы $\mathbf{S}_{F, \text{nonlin}, k}$. Метод их построения описан в [24, 25].

Замечание 4. Полученные оценки структуры нелинейностей в (1), (2) являются основой для реализации адаптивной параметрической идентификации системы $\mathbf{S}_F$.

Замечание 5. Если априорная информация о нелинейных свойствах известна, то этап структурного анализа $\mathbf{S}_F$ -системы можно пропустить.

АДАПТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ $\mathbf{S}_F$

Рассмотрим подсистему $\mathbf{s}_{F, i} \in \mathbf{S}_F$, $\dim \mathbf{s}_{F, i} = n_i$, $\mathcal{L}$ – линейный оператор в (2). Пусть для $\mathbf{s}_{F, i}$ известно множество $\mathbb{I}_{o, i} \subset \mathbb{I}_o$. Подсистема $\mathbf{s}_{F, i}$ описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_{\mathbf{s}_{F, i}} = \mathbf{A}_{\mathbf{s}_{F, i}} \mathbf{X}_{\mathbf{s}_{F, i}} + \mathbf{D}_{1, \mathbf{s}_{F, i}} \mathbf{F}_{1, \mathbf{s}_{F, i}}(\mathbf{X}) + \mathbf{B}_{\mathbf{s}_{F, i}} \mathbf{U}_{\mathbf{s}_{F, i}}, \\ y_{\mathbf{s}_{F, i}} = x_{\mathbf{s}_{F, i}}^1. \end{cases} \quad (6)$$

Представим (6) в виде дифференциального уравнения n_i -го порядка

$$W_{\mathbf{s}_{F, i}}(v) y_{\mathbf{s}_{F, i}} = \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \left(d_{1, \mathbf{s}_{F, i}}^{k, h} f_{\mathbf{s}_{F, i}}^{h, j} + b_{\mathbf{s}_{F, i}}^{k, j} u_{\mathbf{s}_{F, i}}^j \right), \quad (7)$$

где $\mathbf{X}_{\mathbf{s}_{F, i}} \in \mathbb{R}^{n_i}$ – вектор состояния подсистемы $\mathbf{s}_{F, i}$, $x_{\mathbf{s}_{F, i}}^1$ – первый элемент $\mathbf{X}$; $\mathbf{D}_{1, \mathbf{s}_{F, i}}$, $\mathbf{F}_{1, \mathbf{s}_{F, i}}$ и $\mathbf{B}_{\mathbf{s}_{F, i}}$ – матрицы соответствующих размерностей; $d_{1, \mathbf{s}_{F, i}}^{k, h} \in \mathbf{D}_{1, \mathbf{s}_{F, i}}$, $f_{\mathbf{s}_{F, i}}^j \in \mathbf{F}_{1, \mathbf{s}_{F, i}}$, $b_{\mathbf{s}_{F, i}}^{k, j} \in \mathbf{B}_{\mathbf{s}_{F, i}}$, $u_{\mathbf{s}_{F, i}}^j \in \mathbf{U}_{\mathbf{s}_{F, i}}$; $v = d/dt$, $W_{\mathbf{s}_{F, i}}(v)$ – полином степени n_i . Матрица $\mathbf{A}_{\mathbf{s}_{F, i}} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ является гурвицевой. Разделим левую и правую части (7) на полином степени $n_i - 1$

$$H_{\mathbf{s}_{F, i}}(v) = \prod_{k=1}^{n_i-1} (v + \mu_k), \quad (8)$$

и получим

$$\dot{y}_{s_{F,i}} = -\eta_{s_{F,i}} y_{s_{F,i}} + \sum_{k=1}^{n_i-1} \sum_{j=1}^{n_i-1} \left(\tilde{d}_{s_{F,i}}^{k,h} p_{f_{s_{F,i}}}^{h,j} + \tilde{b}_{s_{F,i}}^{k,j} p_{u_{s_{F,i}}}^j \right), \quad (9)$$

где ν, μ_k – положительные числа, $\eta_{s_{F,i}} > 0$, $\tilde{d}_{s_{F,i}}^{k,h}$ и $\tilde{b}_{s_{F,i}}^{k,j}$ зависят от параметров подсистемы $s_{F,i}$ и μ_k , переменные $p_{z_{s_{F,i}}}^j$ ($z = f, u$) удовлетворяют уравнению

$$\dot{p}_{z_{s_{F,i}}}^j = -\mu_j p_{z_{s_{F,i}}}^j + z_{s_{F,i}}^j. \quad (10)$$

Замечание 6. Структура правой части (9) определяется видом матрицы $A_{s_{F,i}}$ и полиномом $H_{s_{F,i}}(\nu)$.

Адаптивная модель для оценки параметров (9), (10):

$$\dot{\hat{y}}_{s_{F,i}} = -k_{s_{F,i}} (\hat{y}_{s_{F,i}} - y_{s_{F,i}}) + \hat{\kappa}_{s_{F,i}} y_{s_{F,i}} + \sum_{k=1}^{n_i-1} \sum_{j=1}^{n_i-1} \left(\hat{d}_{s_{F,i}}^{k,h} p_{f_{s_{F,i}}}^{h,j} + \hat{b}_{s_{F,i}}^{k,j} p_{u_{s_{F,i}}}^j \right), \quad (11)$$

где $k_{s_{F,i}} > 0$, $\hat{\kappa}_{s_{F,i}}$, $\hat{d}_{s_{F,i}}^{k,h}$, $\hat{b}_{s_{F,i}}^{k,j}$ – настраиваемые параметры.

Уравнение для ошибки идентификации:

$$\dot{e}_{s_{F,i}} = -k_{s_{F,i}} e_{s_{F,i}} + \Delta \kappa_{s_{F,i}} y_{s_{F,i}} + \sum_{k=1}^{n_i-1} \sum_{j=1}^{n_i-1} \left(\Delta \tilde{d}_{s_{F,i}}^{k,h} p_{f_{s_{F,i}}}^{h,j} + \Delta \tilde{b}_{s_{F,i}}^{k,j} p_{u_{s_{F,i}}}^j \right), \quad (12)$$

где $\Delta \tilde{d}_{s_{F,i}}^{k,h} = \hat{d}_{s_{F,i}}^{k,h} - \tilde{d}_{s_{F,i}}^{k,h}$, $\Delta \tilde{b}_{s_{F,i}}^{k,j} = \hat{b}_{s_{F,i}}^{k,j} - \tilde{b}_{s_{F,i}}^{k,j}$, $e_{s_{F,i}} = \hat{y}_{s_{F,i}} - y_{s_{F,i}}$, $\Delta \kappa_{s_{F,i}} = \hat{\kappa}_{s_{F,i}} - \eta_{s_{F,i}}$.

Рассмотрим функцию Ляпунова $V_{e,i}(e_{s_{F,i}}) = 0.5e_{s_{F,i}}^2$. Тогда для $\dot{V}_{e,i}(e_{s_{F,i}})$ получаем

$$\dot{V}_{e,i}(e_{s_{F,i}}) = e_{s_{F,i}} \left[-k_{s_{F,i}} e_{s_{F,i}} + \Delta \kappa_{s_{F,i}} y_{s_{F,i}} + \sum_{k=1}^{n_i-1} \sum_{j=1}^{n_i-1} \left(\Delta \tilde{d}_{s_{F,i}}^{k,h} p_{f_{s_{F,i}}}^{h,j} + \Delta \tilde{b}_{s_{F,i}}^{k,j} p_{u_{s_{F,i}}}^j \right) \right].$$

Если переменные $p_{f_{s_{F,i}}}^{h,j}$, $p_{u_{s_{F,i}}}^j$ обладают свойством $\mathcal{PE}_{\alpha,\bar{\alpha}}^S$, то из условия $\dot{V}_i(e_{s_{F,i}}) < 0$ получаем

$$\begin{aligned} \Delta \kappa_{s_{F,i}} &= -\gamma_{\kappa,s_{F,i}} e_{s_{F,i}} y_{s_{F,i}}, \\ \Delta \tilde{d}_{s_{F,i}}^{k,h} &= -\gamma_{k,h,s_{F,i}} e_{s_{F,i}} p_{f_{s_{F,i}}}^{h,j}, \\ \Delta \tilde{b}_{s_{F,i}}^{k,j} p_{u_{s_{F,i}}}^j &= -\gamma_{k,j,s_{F,i}} e_{s_{F,i}} p_{u_{s_{F,i}}}^j, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\gamma_{k,j,s_{F,i}} > 0$ – коэффициент усиления.

Из (13) нетрудно получить алгоритмы для настройки параметров модели (11).

Итак, адаптивная система идентификации подсистемы $s_{F,i}$ описывается уравнениями (12), (13). Обозначим ее как $AS_{F,i}$.

Рассмотрим функцию Ляпунова

$$\begin{aligned} V_{\Delta,i} &= 0.5\gamma_{\kappa,s_{F,i}}^{-1} \left(\Delta \kappa_{s_{F,i}} \right)^2 + \\ &+ 0.5\text{Sp} \left(\Delta \mathbf{D}_{1,s_{F,i}} \Gamma_{k,h,s_{F,i}}^{-1} \Delta \mathbf{D}_{1,s_{F,i}}^T \right) + \\ &+ 0.5\text{Sp} \left(\Delta \mathbf{B}_{s_{F,i}} \Gamma_{k,j,s_{F,i}}^{-1} \Delta \mathbf{B}_{s_{F,i}}^T \right), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\Gamma_{k,h,s_{F,i}} = \text{diag}(\gamma_{k,h,s_{F,i}})$, $\text{Sp}(\cdot)$ – след матрицы, $\Gamma_{k,j,s_{F,i}}^{-1} = \text{diag}(\gamma_{k,j,s_{F,i}}^{-1})$, $\Delta \mathbf{D}_{1,s_{F,i}}$ и $\Delta \mathbf{B}_{s_{F,i}}$ содержат соответственно элементы $\Delta \tilde{d}_{s_{F,i}}^{k,h}$ и $\Delta \tilde{b}_{s_{F,i}}^{k,j}$. Пусть

$\Delta \mathbf{K}_{s_{F,i}} \triangleq \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{D}_{1,s_{F,i}}, \Delta \mathbf{B}_{s_{F,i}} \end{bmatrix}$ и $V_{s_{F,i}}(t) = V_e(t) + V_{\Delta,i}(t)$.

Теорема 1. Пусть: 1) функции $V_{e,i}(t)$, $V_{\Delta,i}(t)$ являются положительно определенными и допускают бесконечно малый высший предел при $|e| \rightarrow \infty$ и $\|\Delta \mathbf{K}_{s_{F,i}}\| \rightarrow \infty$, $|\Delta \kappa_{s_{F,i}}| \rightarrow \infty$; 2) матрица $\mathbf{A}_{s_{F,i}} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ является гурвицевой; 3) $p_{f_{s_{F,i}}}^{h,j}$, $p_{u_{s_{F,i}}}^j$ обладают свойством $\mathcal{PE}_{\alpha,\bar{\alpha}}^S$. Тогда все траектории системы $AS_{F,i}$ ограничены, лежат в области

$$G_t = \left\{ (e_{s_{F,i}}, \Delta \kappa_{s_{F,i}}, \Delta \mathbf{K}_{s_{F,i}}) : V_{s_{F,i}}(t) \leq V_{s_{F,i}}(t_0) \right\}$$

и справедлива оценка

$$2k_{s_{F,i}} \int_{t_0}^t V_{e,i}(\tau) d\tau \leq V_{s_{F,i}}(t_0) - V_{s_{F,i}}(t).$$

Пусть для $V_{\Delta,i}(t)$ справедлива оценка (назовем ее A1):

$$0.5 \underline{\vartheta} \left\{ \text{Sp} \left(\Delta \mathbf{K}_{\mathbf{F},i} (t) \Delta \mathbf{K}_{\mathbf{F},i}^T (t) \right) + \left(\Delta \kappa_{\mathbf{F},i} \right)^2 \right\} \leq V_{\Delta,i} (t) \leq \\ \leq 0.5 \bar{\vartheta} \left\{ \text{Sp} \left(\Delta \mathbf{K}_{\mathbf{F},i} (t) \Delta \mathbf{K}_{\mathbf{F},i}^T (t) \right) + \left(\Delta \kappa_{\mathbf{F},i} \right)^2 \right\},$$

где $\Gamma_{\mathbf{F},i} = \Gamma_{k,h,\mathbf{F},i} + \Gamma_{k,j,\mathbf{F},i}$, $+$ – знак прямой суммы матриц, $\beta_l(\Gamma_{\mathbf{F},i})$, $\beta_l(\Gamma_{\mathbf{F},i})$ – минимальное и максимальное собственные числа матрицы $\Gamma_{\mathbf{F},i}$, $\underline{\vartheta} = \min \left(\beta_l^{-1}(\Gamma_{\mathbf{F},i}), \gamma_{\kappa,\mathbf{F},i}^{-1} \right)$, $\bar{\vartheta} = \max \left(\beta_l^{-1}(\Gamma_{\mathbf{F},i}), \gamma_{\kappa,\mathbf{F},i}^{-1} \right)$.

Теорема 2. Пусть выполняются условия: 1) положительно определенные функции Ляпунова $V_{e,i}(t) = 0.5 e_{\mathbf{F},i}^T(t)$,

$$V_{\Delta,i}(t) = 0.5 \gamma_{\kappa,\mathbf{F},i}^{-1} \left(\Delta \kappa_{\mathbf{F},i} \right)^2 + \\ + 0.5 \text{Sp} \left(\Delta \mathbf{D}_{l,\mathbf{F},i} \Gamma_{k,h,\mathbf{F},i}^{-1} \Delta \mathbf{D}_{l,\mathbf{F},i}^T \right) + \\ + 0.5 \text{Sp} \left(\Delta \mathbf{B}_{\mathbf{F},i} \Gamma_{k,j,\mathbf{F},i}^{-1} \Delta \mathbf{B}_{\mathbf{F},i}^T \right)$$

допускают бесконечно малый высший предел при $|e_{\mathbf{F},i}(t)| \rightarrow 0$, $|\Delta \kappa_{\mathbf{F},i}| \rightarrow 0$, $\|\Delta \mathbf{K}_{\mathbf{F},i}\| \rightarrow 0$; 2) матрица $\mathbf{W}_{\mathbf{F},i}(t) = \mathbf{P}_{f_{\mathbf{F},i}^{h,j}, u_{\mathbf{F},i}^j}^T(t) \mathbf{P}_{f_{\mathbf{F},i}^{h,j}, u_{\mathbf{F},i}^j}(t)$ и $y_{\mathbf{F},i}$ являются кусочно-непрерывными ограниченными и $\mathbf{W}_{\mathbf{F},i}(t) \in \mathcal{PE}_{\alpha, \bar{\alpha}}^S$, $y_{\mathbf{F},i}(t) \in \mathcal{PE}_{\alpha_{y_i}, \bar{\alpha}_{y_i}}^S$; 3) справедливо равенство

$$e_{\mathbf{F},i} \sum_{k=1}^{n_i-1} \sum_{j=1}^{n_i-1} \left(\Delta \tilde{d}_{\mathbf{F},i}^{k,h} p_{f_{\mathbf{F},i}^{h,j}} + \Delta \tilde{b}_{\mathbf{F},i}^{k,j} p_{u_{\mathbf{F},i}^j} \right) = \\ = \pi \left\{ \text{Sp} \left(\Delta \mathbf{K}_{\mathbf{F},i} (t) P_{f_{\mathbf{F},i}^{h,j}, u_{\mathbf{F},i}^j}^T P_{f_{\mathbf{F},i}^{h,j}, u_{\mathbf{F},i}^j} \Delta \mathbf{K}_{\mathbf{F},i}^T (t) \right) + \right. \\ \left. + \left(\Delta \hat{e}_{\mathbf{F},i} y_{\mathbf{F},i} \right)^2 + e_{\mathbf{F},i}^2 \right\}$$

в области $O_v(O)$, где $\pi > 0$, $O = \{0, 0^{n_i \times n_i}\} \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^{n_i \times n_i} \times \mathbb{J}_{0,\infty}$, $0^{n_i \times n_i} \in \mathcal{R}^{n_i \times n_i}$ – нулевая матрица, O_v – некоторая окрестность точки O , $t \in [0, \infty] = \mathbb{J}_{0,\infty}$ – интервал времени; 4) справедлива оценка A1 для функции $V_{\Delta,i}(t)$; 5) выполняется система неравенств

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{e,i} \\ \dot{V}_{\Delta,i} \end{bmatrix} \leq \underbrace{\begin{bmatrix} -k_{\mathbf{F},i} & \frac{\bar{\alpha} \bar{\vartheta}}{2k_{\mathbf{F},i}} \\ \frac{8}{3} \pi & -\frac{3}{8} \pi \alpha_i \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_v} \begin{bmatrix} V_{e,i} \\ V_{\Delta,i} \end{bmatrix}$$

для $\dot{V}_{e,i}$, $\dot{V}_{\Delta,i}$; 6) верхнее решение для $\mathbf{V}_{e,i,\Delta_i}(t) = [V_{e,i}(t) V_{\Delta,i}(t)]^T$ удовлетворяет уравнению $\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{A}_v \mathbf{S}$, если справедливо неравенство

$$V_{\rho}(t) \leq s_{\rho}(t) \quad \forall (t \geq t_0) \quad \& \quad (V_{\rho}(t_0) \leq s_{\rho}(t_0)),$$

$\rho = e, i$; Δ, i для элементов $V_{e,i}(t)$, $V_{\Delta,i}(t)$. Тогда адаптивная система $\mathbf{A} \mathbf{S}_{\mathbf{F},i}$ является экспоненциально устойчивой с оценкой

$$\mathbf{V}_{e,i,\Delta_i}(t) \leq e^{\mathbf{A}_v(t-t_0)} \mathbf{S}(t_0),$$

если

$$k_{\mathbf{F},i} > 0, k_{\mathbf{F},i} \geq \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\bar{\alpha}\bar{\vartheta}}{\alpha_i}}. \quad (15)$$

Доказательство теорем основано на подходе, изложенном в [26].

Теорема 2 показывает: если информационная матрица

$$\mathbf{W}_{\mathbf{F},i}(t) = \mathbf{P}_{f_{\mathbf{F},i}^{h,j}, u_{\mathbf{F},i}^j}^T(t) \mathbf{P}_{f_{\mathbf{F},i}^{h,j}, u_{\mathbf{F},i}^j}(t)$$

является постоянно возбуждаемой, то адаптивная система $\mathbf{A} \mathbf{S}_{\mathbf{F},i}$ позволяет получить истинные оценки параметров системы $\mathbf{S}_{\mathbf{F},i}$. При этом параметры системы должны удовлетворять условию (15).

ПРИМЕРЫ

Рассмотрим систему с нелинейной коррекцией системы. Она содержит усилитель с электродвигателем и релейное управление, описываемое функцией $f_1(u)$. В качестве корректирующего устройства используется нелинейная обратная связь (feedback, индекс fb в обозначениях) по скорости с параболической характеристикой $f_2(x_2)$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = -a_1 x_2 - a_2 x_3 + b f_1(u), \\ y = x_1, \end{cases} \quad (16)$$

$$f_1(u) = \begin{cases} c, & \text{если } u \geq d, \\ 0, & \text{если } -d \leq u \leq d, \\ -c, & \text{если } u < -d, \end{cases}$$

где $u = g - x_1 - f_2(x_2)$ – управление; $f_2(x_2) = k_{fb} x_2^2 \text{sign}(x_2)$; g – вход системы; $c > 0$, $d > 0$; $k_{fb} > 0$; x_i – переменная состояния; a_i , b – параметры системы.

Уравнение (13) и полиномы в (7), (8) имеют вид

$$\left(v + \eta - \frac{v_1}{v + \mu_1} - \frac{v_2}{v + \mu_2} \right) y = \left(\frac{b_1}{v + \mu_1} + \frac{b_2}{v + \mu_2} \right) f_1(u). \quad (17)$$

Формула (17) получается следующим образом. Сначала система (16) записывается в пространстве $(y(t), f_1(u))$. Получаем представление (7). Так как система имеет третий порядок, то для нахождения уравнения для $\dot{y}(t)$, согласно результатам раздела «Адаптивная идентификация системы S_F », обе части полученного уравнения (7) делим на полином $H(v) = (v + \mu_1)(v + \mu_2)$. Далее раскладываем левую и правую части (7) на простые дроби и приходим к уравнению (17).

Полагаем $v = d/dt$. Из (17) получаем аналог уравнений (8), (9) для системы (16):

$$\dot{y} = -\eta y + v_1 p_{y,\mu_1} + v_2 p_{y,\mu_2} + b_1 p_{f_1,\mu_1} + b_2 p_{f_1,\mu_2}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{p}_{y,\mu_1} &= -\mu_1 p_{y,\mu_1} + y, & \dot{p}_{y,\mu_2} &= -\mu_2 p_{y,\mu_2} + y, \\ \dot{p}_{f_1,\mu_1} &= -\mu_1 p_{f_1,\mu_1} + f_1, & \dot{p}_{f_1,\mu_2} &= -\mu_2 p_{f_1,\mu_2} + f_1, \end{aligned} \quad (19)$$

где $b_1 = 1.4$, $b_2 = -0.4$, $\eta = 0.35$, $v_1 = -1$, $v_2 = 1.35$, $\mu_1 = 2.05$, $\mu_2 = 2.25$. Параметры нелинейности f_1 : $c_1 = 2$, $d = 0.5$. Вход $g(t) = \sin(0.2t)$.

Адаптивная модель и алгоритмы:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}} &= -k_y e - \hat{\eta} y + \hat{v}_1 p_{y,\mu_1} + \\ &+ \hat{v}_2 p_{y,\mu_2} + \hat{b}_1 p_{f_1,\mu_1} + \hat{b}_2 p_{f_1,\mu_2}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\eta}} &= -\gamma_\eta e y, & \dot{\hat{v}}_1 &= -\gamma_{v_1} e p_{y,\mu_1}, \\ \dot{\hat{v}}_2 &= -\gamma_{v_2} e p_{y,\mu_2}, & \dot{\hat{b}}_1 &= -\gamma_{b_1} e p_{f_1,\mu_1}, \\ \dot{\hat{b}}_2 &= -\gamma_{b_2} e p_{f_1,\mu_2}, \end{aligned} \quad (21)$$

где $e = \hat{y} - y$.

Уравнение для ошибки $e(t)$

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -k e - \Delta \eta y + \Delta v_1 p_{y,\mu_1} + \\ &+ \Delta v_2 p_{y,\mu_2} + \Delta b_1 p_{f_1,\mu_1} + \Delta b_2 p_{f_1,\mu_2}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $k > 0$, $\Delta \sigma = \hat{\sigma} - \sigma$, $\sigma = \eta, v_1, v_2, b_2, b_1$. Коэффициенты γ_i в (21) изменялись в диапазоне (0.002; 0.009).

Пусть $\Delta K \triangleq [\Delta \eta, \Delta v_1, \Delta v_2, \Delta b_1, \Delta b_2]^T$. Закон настройки ΔK следует из (21):

$$\Delta \dot{K} = -\Gamma_K e P_y, \quad (23)$$

где $\Gamma_K = \text{diag}(\gamma_\eta, \gamma_{v_1}, \gamma_{v_2}, \gamma_{b_1}, \gamma_{b_2})$,

$$P_y = [y, p_{y,\mu_1}, p_{y,\mu_2}, p_{f_1,\mu_1}, p_{f_1,\mu_2}]^T.$$

Ограниченность траекторий системы (22), (23) следует из теоремы 1. Результаты работы адаптивной системы представлены на рис. 1–4. Настройка параметров модели (20) показана на рис. 1, 2. Рис. 3 отражает изменение ошибки оценивания $e(t)$. Такое изменение ошибки связано с изменением выхода системы.

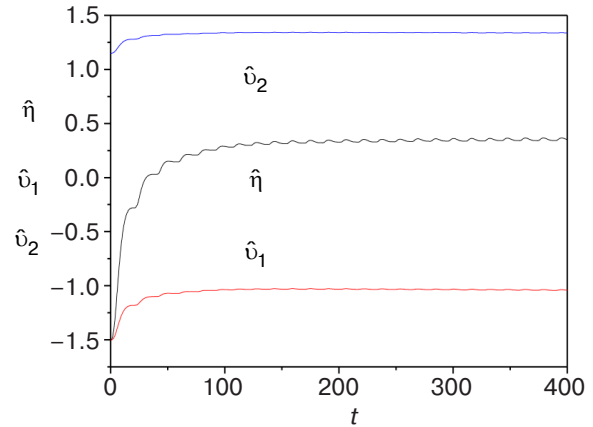


Рис. 1. Настройка параметров модели (20)

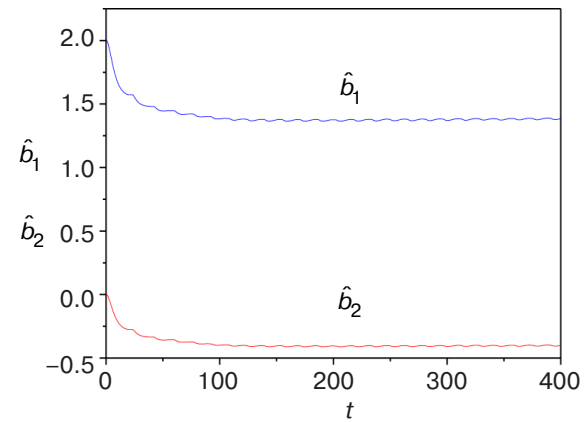


Рис. 2. Настройка параметров $\hat{b}_i$ модели (20)

В [28] отмечено, что по функции $f_2(x_2)$ система является неидентифицируемой на множестве измерений. В этом случае можно воспользоваться косвенной информацией о зависимости $u_1 = \omega - x_1$ от x_2 . Это справедливо, т.к. существует взаимосвязь между u_1 и u .

2. Рассмотрим систему генерации автоколебаний, состоящую из объекта (переменные y_1, y_2), нелинейного (переменная y_3) и линейного (переменная y_4) преобразователей и линейного усилителя-преобразователя с нелинейным исполнительным устройством (переменная y_5). $f_i(x)$ ($i = 1, 3$) является функцией насыщения с зоной нечувствительности

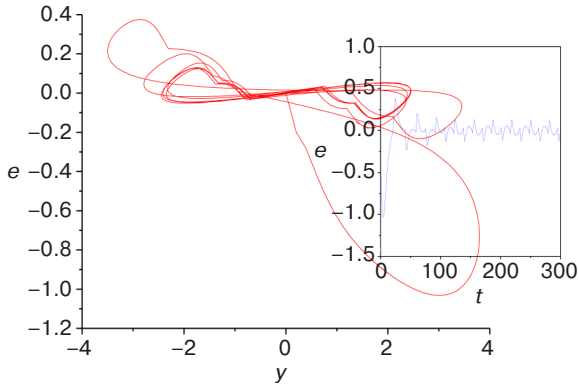


Рис. 3. Изменение ошибки оценивания

$$f_i(x) = \begin{cases} c, & \text{если } x \geq d_{2,i}, \\ 2(x - d_{1,i}), & \text{если } d_{1,i} < x < d_{2,i}, \\ 0, & \text{если } -d_{1,i} \leq x \leq d_{1,i}, \\ 2(x + d_{1,i}), & \text{если } -d_{1,i} < x, \\ -c, & \text{если } x < -d_{2,i}, \end{cases}$$

где $c > 0$, $d_{1,i} > 0$, $d_{2,i} > 0$ – некоторые числа,

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{Y}} &= \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{D}\mathbf{F}(\mathbf{Y}) \\ \mathbf{Y} &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g & 0 & 0 & k_0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{T_2} & 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_3} \end{bmatrix}, \mathbf{F}(\mathbf{Y}) = \begin{bmatrix} f_1(y_1) \\ f_3(y_3 + y_4) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (24)$$

где $T_i > 0$ – постоянная времени, $g \geq 0$. В качестве входа используется переменная y_5 .

Фазовый портрет объекта представлен на рис. 4. Он показывает, что в системе возникают автоколебания. Для идентификации параметров системы (24) воспользуемся идеями адаптивного наблюдателя для объекта, изложенными выше. Необходимо преобразовать только два первых уравнения в (24). Для этого представляем их в виде (38) и полученное уравнение делим на $v + \mu$. Далее преобразуем переменные y_1, y_5

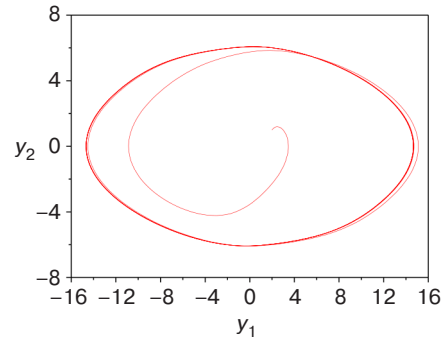


Рис. 4. Фазовый портрет объекта (24)

$$\begin{aligned} \dot{p}_{y_1, \mu} &= -\mu p_{y_1, \mu} + y_1, \\ \dot{p}_{y_5, \mu} &= -\mu p_{y_5, \mu} + y_5, \end{aligned} \quad (25)$$

и получаем идентификационное представление

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= a_{11}y_1 + a_{12}p_{y_1} + a_{15}p_{y_5}, \\ \dot{y}_3 &= -a_3y_3 + a_{31}f_1(y_1), \\ \dot{y}_4 &= -a_4y_4 + a_{42}y_2, \\ \dot{y}_5 &= -a_5y_5 + a_{53}f_3(y_3 + y_4). \end{aligned} \quad (26)$$

Адаптивная система для оценки параметров системы (26) имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}}_1 &= -k_1e_1 + \hat{a}_{11}y_1 + \hat{a}_{12}p_{y_1} + \hat{a}_{15}p_{y_5}, \\ \dot{\hat{y}}_2 &= +\hat{a}_{11}y_1 + \hat{a}_{12}p_{y_1} + \hat{a}_{15}p_{y_5}, \\ \dot{\hat{y}}_3 &= -k_3e_3 + \hat{a}_{31}(f_1(y_1) - y_3), \\ \dot{\hat{y}}_4 &= -k_4e_4 + \hat{a}_{41}y_4 + \hat{a}_{42}\hat{y}_2, \\ \dot{\hat{y}}_5 &= -k_5e_5 + \hat{a}_{51}(y_5 + f_3(y_3 + y_4)), \end{aligned} \quad (27)$$

где $e_i = \hat{y}_i - y_i$, $i = 1, 3, 4, 5$.

Если ввести функции Ляпунова $V_i(e_i) = 0.5e_i^2$, то из условия $\dot{V}_i \leq 0$ получим адаптивные алгоритмы настройки параметров системы (27):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{a}}_{11} &= -\gamma_{11}e_1y_1, \quad \dot{\hat{a}}_{12} = -\gamma_{12}e_1p_{y_1}, \\ \dot{\hat{a}}_{15} &= -\gamma_{15}e_1p_{y_5}, \quad \dot{\hat{a}}_{31} = -\gamma_{31}e_3(f_1(y_1) - y_3), \\ \dot{\hat{a}}_{41} &= -\gamma_{41}e_4y_4, \quad \dot{\hat{a}}_{42} = -\gamma_{42}e_4\hat{y}_2, \\ \dot{\hat{a}}_{51} &= -\gamma_{51}e_5(y_5 + f_3(y_3 + y_4)), \end{aligned} \quad (28)$$

где $\gamma_{ij} > 0$.

Системы (26), (27) моделировались с параметрами: $a_{11} = 0.55$, $a_{12} = -0.6$, $a_{15} = -1.15$, $k_1 = 2$, $\mu = 0.5$, $a_{31} = 2.21$, $k_3 = 0.8$, $k_4 = 1.5$, $a_{41} = 1.15$, $a_{42} = 0.56$, $k_5 = 1.25$, $a_{51} = 1.1$. Параметры функций f_1, f_3 : $d_{11} = 0.5$, $d_{21} = 1.5$, $c = 2$, $d_{13} = 0.25$, $d_{23} = 1.25$. Коэффициенты γ_{ij} изменялись в интервале (0.001; 0.05).

Адаптивная система имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= -k_1 e_1 + \Delta a_{11} y_1 + \Delta a_{12} p_{y_1} + \Delta a_{15} p_{y_5}, \\ e_2 &= +\Delta a_{11} y_1 + \Delta a_{12} p_{y_1} + \Delta a_{15} p_{y_5}, \\ \dot{e}_3 &= -k_3 e_3 + \Delta a_{31} (f_1(y_1) - y_3), \\ \dot{e}_4 &= -k_4 e_4 - \Delta a_{41} y_4 + \Delta a_{42} \hat{y}_2, \\ \dot{e}_5 &= -k_5 e_5 - \Delta a_{51} (y_5 + f_3(y_3 + y_4)),\end{aligned}\quad (29)$$

$$\begin{aligned}\Delta \dot{a}_{11} &= -\gamma_{11} e_1 y_1, \quad \Delta \dot{a}_{12} = -\gamma_{12} e_1 p_{y_1}, \\ \Delta \dot{a}_{15} &= -\gamma_{15} e_1 p_{y_5}, \quad \Delta \dot{a}_{31} = -\gamma_{31} e_3 (f_1(y_1) - y_3), \\ \Delta \dot{a}_{41} &= \gamma_{41} e_4 y_4, \quad \Delta \dot{a}_{42} = -\gamma_{42} e_4 \hat{y}_2, \\ \Delta \dot{a}_{51} &= \gamma_{51} e_5 (y_5 + f_3(y_3 + y_4)),\end{aligned}\quad (30)$$

где $\Delta a_{ij}(t) = \hat{a}_{ij}(t) - a_{ij}$.

Результаты работы системы (29), (30) показаны на рис. 5–7. Рис. 5, 6 представляют процесс настройки параметров системы (27), а рис. 7 отражает изменение выходных невязок системы (27). Результаты подтверждают ограниченность траекторий адаптивной системы.

Несмотря на выполнение условия $y_5 \in \mathcal{PE}_{\alpha, \bar{\alpha}}^S$ для входа системы (24) и S-синхронизируемость системы обеспечить условие асимптотической устойчивости не удастся. Связано это с наличием нелинейностей в системе.

Рассмотрим функции Ляпунова

$$\begin{aligned}V_{e,1-5}(t) &= 0.5 \sum_{i=1, i \neq 2}^5 e_i^2(t), \quad \mathbf{V}_{e,\Delta} = \\ &= [V_{e,1}, V_{\Delta,1}, V_{e,3}, V_{\Delta,3}, V_{e,4}, V_{\Delta,4}, V_{e,5}, V_{\Delta,5}]^T, \\ V_{\Delta,1-5}(t) &= 0.5 \underbrace{(\gamma_{11}^{-1} \Delta a_{11}^2(t) + \gamma_{12}^{-1} \Delta a_{12}^2(t) + \gamma_{15}^{-1} \Delta a_{15}^2(t))}_{V_{\Delta,1}} + \\ &+ \underbrace{0.5 \gamma_{31}^{-1} \Delta a_{31}^2(t)}_{V_{\Delta,3}} + \underbrace{0.5 (\gamma_{41}^{-1} \Delta a_{41}^2(t) + \gamma_{42}^{-1} \Delta a_{42}^2(t))}_{V_{\Delta,4}} + \\ &+ \underbrace{0.5 \gamma_{51}^{-1} \Delta a_{51}^2(t)}_{V_{\Delta,5}}.\end{aligned}\quad (31)$$

Теорема 3. Пусть выполняются условия:

1) положительно определенные функции Ляпунова $V_{\Delta,i}(t) = 0.5 \gamma_{ij}^{-1} (\Delta a_{ij})^2$, $V_{e,i}(t) = 0.5 e_i(t)$, $V_{\Delta,1}(t) = 0.5 (\gamma_{11}^{-1} \Delta a_{11}^2(t) + \gamma_{12}^{-1} \Delta a_{12}^2(t) + \gamma_{15}^{-1} \Delta a_{15}^2(t))$ допускают бесконечно малый высший предел при $|e_i(t)| \rightarrow 0$, $|\Delta a_{ij}| \rightarrow 0$;

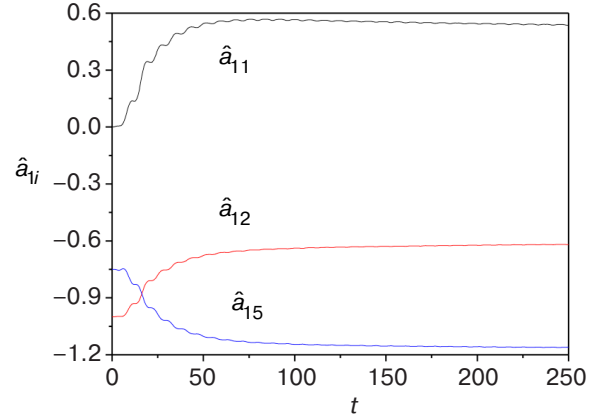


Рис. 5. Настройка параметров моделей для оценки y_1

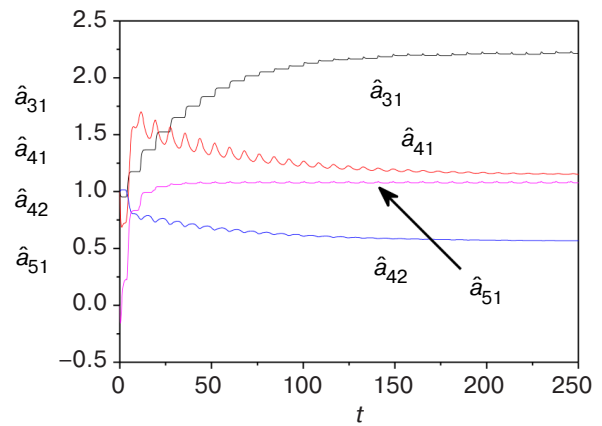


Рис. 6. Настройка параметров моделей для оценки y_3, y_4, y_5

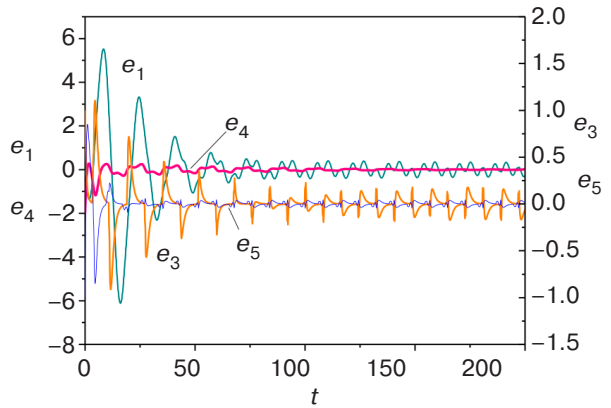


Рис. 7. Изменение невязки выходов моделей (27) (зеленая линия – e_1 , красная линия – e_4 , оранжевая линия – e_3 , синяя линия – e_5)

2) y_i являются кусочно-непрерывными ограниченными и $\alpha = \max \left(\bar{\alpha}_{y_1}, \bar{\alpha}_{p_{y_1}}, \bar{\alpha}_{p_{y_5}} \right)$, $y_i(t) \in \mathcal{PE}_{\alpha_{y_i}, \bar{\alpha}_{y_i}}^S$, $p_{y_1} \in \mathcal{PE}_{\alpha_{p_{y_1}}, \bar{\alpha}_{p_{y_1}}}^S$, $p_{y_5} \in \mathcal{PE}_{\alpha_{p_{y_5}}, \bar{\alpha}_{p_{y_5}}}^S$, $i = 1, 3, 4, 5$;

3) для $V_{\Delta,1}(t) = 0.5 \Delta \mathbf{G}_1^T(t) \Gamma_1^{-1} \Delta \mathbf{G}_1(t)$ справедливо неравенство

$$0.5 \underline{\vartheta}_1 \Delta \mathbf{G}_1^T(t) \Delta \mathbf{G}_1(t) \leq V_{\Delta,1}(t) \leq 0.5 \bar{\vartheta}_1 \Delta \mathbf{G}_1^T(t) \Delta \mathbf{G}_1(t),$$

где $\Gamma_1 = \text{diag}(\gamma_{11}, \gamma_{11}, \gamma_{15})$, $\bar{\mathbf{g}}_1 = \beta_1^{-1}(\Gamma_1)$,
 $\Delta \mathbf{G}_1(t) = [\Delta a_{11}(t), \Delta a_{12}(t), \Delta a_{15}(t)]^T$, $\bar{\mathbf{g}}_1 = \beta_1^{-1}(\Gamma_1)$,
 $\beta_1(\Gamma_1)$, $\beta_1(\Gamma_1)$ – минимальное и максимальное собственные числа матрицы Γ_1 ;

$$4) \alpha_{f_1, y_3} - \underline{v}_3 \leq (f_1(y_1) - y_3)^2 \leq \bar{\alpha}_{f_1, y_3} + v_3, \\ \underline{v}_3 \geq 0, v_3 \geq 0;$$

$$5) \gamma_4 = \max(\gamma_{41}, \gamma_{42});$$

6) выполняется равенство

$$e_i \Delta a_{ij} \omega_i = \pi_i \left(e_i^2 + (\Delta a_{ij})^2 \omega_i^2 \right)$$

в области $O_v(O)$, где $\pi_i > 0$, $O = \{0^4, 0^n\} \subset \mathbb{R}^4 \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{J}_{0, \infty}$, $0^4, 0^n$ – нулевые вектора, n – число настраиваемых параметров, O_v – некоторая окрестность точки O , $t \in [0, \infty] = \mathbb{J}_{0, \infty}$;

7) для $V_{e, \Delta}(t)$ справедлива матричная система неравенств $\dot{V}_{e, \Delta} \leq \mathbf{A}_{e, \Delta} V_{e, \Delta} + \mathbf{B}_{e, \Delta}$, где $\mathbf{A}_{e, \Delta}$ – блочно-диагональная матрица

$$\mathbf{A}_{e, \Delta} = \text{diag}(\mathbf{A}_{e, \Delta, 1}, \mathbf{A}_{e, \Delta, 3}, \mathbf{A}_{e, \Delta, 4}, \mathbf{A}_{e, \Delta, 5}), \\ \mathbf{B}_{e, \Delta} = [0 \ 0 \ \bar{v}_3 \bar{\mathbf{g}}_3 \ \pi_3 \chi \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

подматрицы $\mathbf{A}_{e, \Delta, i}$ имеют вид, аналогичный $\mathbf{A}_v$ из теоремы 2;

8) верхнее решение для $V_{e, \Delta}(t)$ удовлетворяет уравнению $\dot{\mathbf{S}}_{e, \Delta} = \mathbf{A}_{e, \Delta} \mathbf{S}_{e, \Delta} + \mathbf{B}_{e, \Delta}$, если существуют такие функции $s_i(t) \geq 0$, что $V_{e, \Delta, i}(t) \leq s_i(t) \ \forall (t \geq t_0) \ \& \ V_{e, \Delta, i}(t_0) \leq s_i(t_0)$, $i = 1, 3, 4, 5$, где $\mathbf{S}_{e, \Delta} \in \mathbb{R}^6$, s_i – элементы вектора $\mathbf{S}_{e, \Delta}$. Тогда адаптивная система (29), (30) является экспоненциально диссипативной с оценкой

$$\mathbf{V}_{e, \Delta}(t) \leq e^{\mathbf{A}_{e, \Delta}(t-t_0)} \mathbf{S}(t_0) + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}_{e, \Delta}(t-\tau)} \mathbf{B}_{e, \Delta} d\tau,$$

$$\text{если} \quad k_1 \geq \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\alpha \beta_1(\bar{\mathbf{A}}_1)}{\alpha_{P_1} k_1 \beta_1(\bar{\mathbf{A}}_1)}}, \quad k_3 \geq \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\bar{\alpha}_{f_1, y_3}}{(\alpha_{f_1, y_3} - \underline{v}_3)}}, \\ k_4 \geq \frac{2}{3} \sqrt{2 \frac{\alpha_{y_1, \hat{y}_2}}{\bar{\alpha}_{y_1, \hat{y}_2}}}, \quad k_5 \geq \frac{2}{3} \sqrt{2 \frac{\bar{\alpha}_{y_5} + c^2}{\alpha_{y_5, f_3}}}.$$

Доказательство теоремы 3 аналогично доказательству теоремы 2.

Из теоремы 3 следует, что предельные свойства системы (29), (30) зависят от нелинейных свойств, обратной связи и соблюдения условия постоянства возбуждения. В частности, это относится к блоку 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к адаптивной идентификации систем с несколькими нелинейностями. Он основан на преобразовании системы с целью исключения неизмеряемых переменных состояния. Выполнен синтез адаптивной системы идентификации. Предложен подход к декомпозиции системы на ряд подсистем для упрощения процесса адаптации. Доказана ограниченность траекторий в адаптивной системе. Рассмотрена проблема S-синхронизируемости системы и предложена модификация условия постоянства возбуждения информационного множества системы, учитывающего специфику структурной идентифицируемости нелинейной части системы. Применен метод векторных функций Ляпунова для доказательства экспоненциальной устойчивости системы идентификации.

Рассмотрена система с нелинейной коррекцией нелинейной системы. Получены адаптивные алгоритмы оценки параметров системы. Показана ограниченность траекторий системы. Рассмотрена нелинейная система генерации автоколебаний с нелинейной обратной связью. Предложена адаптивная система параметрической идентификации. Исследовано влияние обратной связи и нелинейностей на ограниченность траекторий. Результаты моделирования подтверждают полученные теоретические результаты. Предлагаемые методы могут использоваться при разработке систем идентификации и управления сложными динамическими системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Aykan M., Özgüven H.N. Parametric identification of nonlinearity from incomplete FRF Data using describing function inversion. In: Adam D., Kersch G., Carrella A. (Eds.). *Topics in Nonlinear Dynamics. V. 3. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. New York: Springer; 2012. P. 311–322. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2416-1_25
2. Zhao Z., Li C., Ahlin K., Du. H. Nonlinear system identification with the use of describing functions – a case study. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2016;8:33–38. URL: <https://www.extrica.com/article/17407/pdf>
3. Павлов Ю.Н., Недашковский В.М., Тихомирова Е.А. Идентификация нелинейных динамических систем, имеющих в своем составе несколько нелинейностей. *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015;07:217–234. [Pavlov Y.N., Nedashkovskii V.M., Tihomirova E.A. Identification of nonlinear dynamic systems possessing some non-linearities. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*. 2015;07:217–234 (in Russ.).]
4. Prawin J., Rao A.R.M., Sethi A. Parameter identification of systems with multiple disproportional local nonlinearities. *Nonlinear Dyn.* 2020;100(1):289–314. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05538-1>

5. Pai P.F., Palazotto A.N. Detection and identification of nonlinearities by amplitude and frequency modulation analysis. *Mech. Syst. Signal Process.* 2008;22(5): 1107–1132. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.11.006>
6. Safari S., Monsalve J.M.L. Direct optimisation based model selection and parameter estimation using time-domain data for identifying localised nonlinearities. *J. Sound Vib.* 2021;501(2051):16056. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116056>
7. Noël J.P., Schoukens J. Grey-box State-space Identification of Nonlinear Mechanical Vibrations. *Int. J. Control.* 2018;91(5):1118–1139. <https://doi.org/10.1080/00207179.2017.1308557>
8. Li C. Closed-loop identification for a class of nonlinearly parameterized discrete-time systems. *Automatica.* 2021;131:109747. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109747>
9. Chen H., Kurt M., Lee Y., McFarland D., Bergman L., Vakakis A. Experimental system identification of the dynamics of a vibro-impact beam with a view towards structural health monitoring and damage detection. *Mech. Syst. Signal Process.* 2014;46(1):91–113. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.12.014>
10. Binczak S., Busvelle E., Gauthier J.-P., Jacquir S. Identification of Unknown Functions in Dynamic Systems. URL: <https://pageperso.lis-lab.fr/eric.busvelle/papers/bioid.pdf>
11. Singh A., Moore K.J. Identification of multiple local nonlinear attachments using a single measurement case. *J. Sound Vib.* 2021;513:116410. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116410>
12. Van den Hof P.M.J. Closed-loop issues in system identification. In: Sawaragi Y., Sagara S. (Eds.). *System Identification (SYSID'97): Proc. 11th IFAC Symp. System Identification.* 1997. *IFAC Proceedings Series.* 1997. V. 3. P. 1547–1560. URL: http://publications.pvandenhof.nl/Paperfiles/Vanden%20Hof_SYSID97_Plenary.pdf
13. Andersson C., Ribeiro A.H., Tiels K., Wahlström N., Schön T.B. Deep Convolutional Networks in System Identification. In: *IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC).* 2019. <https://doi.org/10.1109/CDC40024.2019.9030219>
14. Gedon D., Wahlström N., Schön T.B., Ljung L. *Deep State Space Models for Nonlinear System Identification.* arXiv:2003.14162v3 [eess.SY]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.14162>
15. Kerschen G., Worden K., Vakakis A., Golinval J.-C. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. *Mech. Syst. Signal Process.* 2006;20(3): 505–592. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.04.008>
16. Holmes P. The dynamics of repeated impacts with a sinusoidally vibrating table. *J. Sound Vib.* 1982;84(2): 173–189. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(82\)80002-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(82)80002-3)
17. Azeez M.A.F., Vakakis A.F. Numerical and experimental analysis of a continuously overhung rotor undergoing vibro-impacts. *Int. J. Non-Linear Mechanics.* 1999;34(3): 415–435. [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(98\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(98)00022-5)
18. Van den Hof P.M.J. Closed-loop issues in system identification. *Annu. Rev. Control.* 1998;22:173–186. [https://doi.org/10.1016/S1367-5788\(98\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1367-5788(98)00016-9)
19. Aljamaan I. *Nonlinear Closed-Loop System identification in the Presence of Non-Stationary Noise Source.* Doctoral Thesis. Calgary, Canada: University of Calgary; 2016. URL: <http://hdl.handle.net/11023/3070>
20. Forsell U., Ljung L. Closed-loop identification revisited. *Automatica.* 1999;35(7):1215–1241. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(99\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00022-9)
21. Mejari M., Piga D., Bemporad A. A bias-correction method for closed-loop identification of Linear Parameter-Varying systems. *Automatica.* 2018;87: 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.09.014>
22. Piga D., Tyth R. A bias-corrected estimator for nonlinear systems with output-error type model structures. *Automatica.* 2014;50(9):2373–2380. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.07.021>
23. Gilson M., Van den Hof P.M.J. On the relation between a bias-eliminated least squares (BELS) and an IV estimator in closed-loop identification. *Automatica.* 2001;37(10):1593–1600. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(01\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(01)00119-4)
24. Карабутов Н.Н. *Введение в структурную идентифицируемость нелинейных систем.* М.: URSS/ЛЕНАНД; 2021. 144 с. ISBN 978-5-9710-9022-9 [Karabutov N.N. *Vvedenie v strukturnuyu identifikatsionnost' nelineynykh sistem (Introduction to Structural Identifiability of Nonlinear Systems).* Moscow: URSS/LENAND; 2021. 144 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-9022-9]
25. Карабутов Н.Н. S-синхронизация, структурная идентифицируемость и идентификация нелинейных динамических систем. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2020;21(6):323–336. <https://doi.org/10.17587/mau.21.323-336> [Karabutov N.N. S-synchronization Structural Identifiability and Identification of Nonlinear Dynamic Systems. *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie.* 2020;21(6): 323–336 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.21.323-336>]
26. Karabutov N. Structural-parametrical design method of adaptive observers for nonlinear systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA).* 2018;10(2):1–16. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.02.01>
27. Karabutov N. Geometrical frameworks in identification problem. *Intelligent Control and Automation.* 2018;12(2):17–43. <https://doi.org/10.4236/ica.2021.122002>
28. Karabutov N. Structural Identifiability of Systems with Multiple Nonlinearities. *Contemp. Math.* 2021;2(2): 103–172. <https://doi.org/10.37256/cm.222021763>

Об авторе

Карабутов Николай Николаевич, д.т.н., профессор, кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Лауреат Государственной премии в области науки и техники. E-mail: karabutov@mirea.ru. Scopus Author ID 6603372930, ResearcherID P-5683-2015, SPIN-код РИНЦ 9646-9721, <https://orcid.org/0000-0002-3706-7431>

About the author

Nikolay N. Karabutov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Problems Control, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Laureate of the Russian Federation State Prize in Science and Technology. E-mail: karabutov@mirea.ru. Scopus Author ID 6603372930, ResearcherID P-5683-2015, SPIN-код РИНЦ 9646-9721, <https://orcid.org/0000-0002-3706-7431>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 536.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-106-117>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Новый энергетический эффект в областях нецилиндрического типа с термоизолированной движущейся границей

Э.М. Карташов @

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
@ Автор для переписки, e-mail: professor.kartashov@gmail.com

Резюме

Цели. Разработка математически модельных представлений энергетического эффекта в областях нецилиндрического типа с термоизолированной движущейся границей. Введение в аналитическую теплофизику и прикладную термомеханику нового граничного условия теплоизоляции движущейся границы как для локально равновесных процессов теплопереноса в рамках классической феноменологии Фурье, так и для более сложных локально-неравновесных процессов в рамках феноменологии Максвелла – Каттанео – Лыкова – Вернотта, учитывающих конечную скорость распространения теплоты. Рассмотрение прикладной задачи аналитической теплофизику и теории теплового удара для области с движущейся термоизолированной границей, свободной от внешних и внутренних воздействий. Получение точного аналитического решения сформулированных математических моделей для уравнений гиперболического типа. Исследование полученных решений с помощью вычислительного эксперимента при различных значениях, входящих в него параметров. Описание волнового характера кинетики рассматриваемых процессов.

Методы. Используются методы и теоремы операционного исчисления, контурные интегралы Римана – Меллина при вычислении оригиналов сложных изображений с двумя точками ветвления. С учетом вычислительных трудностей при нахождении аналитических решений краевых задач для уравнений гиперболического типа в области с движущейся границей, развит новый математический аппарат эквивалентности функциональных конструкций для оригиналов полученных операционных решений.

Результаты. Представлено развитие новых математических моделей локально-неравновесного теплопереноса и теории теплового удара для уравнений гиперболического типа в области с движущейся термоизолированной границей. Показано, что, несмотря на отсутствие внешних и внутренних источников теплоты, наличие термоизолированной движущейся границы приводит к появлению в области градиента температуры и, следовательно, к появлению в области температурного поля и соответствующих ему термоупругих напряжений, имеющих волновой характер. Стохастический анализ указанного энергетического эффекта позволил высказать предположение о переходе кинетической энергии движущейся термоизолированной границы в тепловую энергию области. Приведенные модельные представления указанного эффекта подтвердили высказанное предположение.

Выводы. Развита и исследована математическая модель для локально-неравновесных процессов теплопереноса и теории термических напряжений на основе определяющих соотношений теории теплового удара для уравнений гиперболического типа в области с термоизолированной движущейся границей. Проведен численный эксперимент и показана возможность перехода от одной формы аналитического решения теплофизической задачи к другой эквивалентной форме нового типа. Описанный энергетический эффект проявляется как для уравнений параболического типа на основе классической феноменологии Фурье, так и для уравнений гиперболического типа на основе обобщенной феноменологии Максвелла – Каттанео – Лыкова – Вернотта.

Ключевые слова: движущаяся теплоизолированная граница, температурное поле, температурные напряжения, уравнения гиперболического типа

• Поступила: 30.11.2022 • Доработана: 21.04.2023 • Принята к опубликованию: 21.07.2023

Для цитирования: Карташов Э.М. Новый энергетический эффект в областях нецилиндрического типа с термоизолированной движущейся границей. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):106–117. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-106-117>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

New energy effect in non-cylindrical domains with a thermally insulated moving boundary

Eduard M. Kartashov [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: professor.kartashov@gmail.com

Abstract

Objectives. To develop mathematical model representations of the energy effect in non-cylindrical domains having a thermally insulated moving boundary; to introduce a new boundary condition for thermal insulation of a moving boundary both for locally equilibrium heat transfer processes in the framework of classical Fourier phenomenology, as well as for more complex locally non-equilibrium processes in the framework of Maxwell–Cattaneo–Lykov–Vernott phenomenology, taking into account the finite rate of heat propagation into analytical thermophysics and applied thermomechanics; to consider an applied problem of analytical thermophysics according to the theory of thermal shock for a domain with a moving thermally insulated boundary free from external and internal influences; to obtain an exact analytical solution of the formulated mathematical models for hyperbolic type equations; to investigate the solutions obtained using a computational experiment at various values of the parameters included in it; to describe the wave nature of the kinetics of the processes under consideration.

Methods. Methods and theorems of operational calculus, Riemann–Mellin contour integrals are used in calculating the originals of complex images with two branch points. A new mathematical apparatus for the equivalence of functional constructions for the originals of the obtained operational solutions, which considers the computational difficulties in finding analytical solutions to boundary value problems for equations of hyperbolic type in the domain with a moving boundary, is developed.

Results. Developed mathematical models of locally nonequilibrium heat transfer and the theory of thermal shock for equations of hyperbolic type in a domain with a moving thermally insulated boundary are presented. It is shown that, despite the absence of external and internal sources of heat, the presence of a thermally insulated moving boundary leads to the appearance of a temperature gradient in the domain and, consequently, to the appearance of a temperature field and corresponding thermoelastic stresses in the domain, which have a wave character. A stochastic analysis of this energy effect forms the basis for a proposed transition of the kinetic energy of a moving thermally insulated boundary into the thermal energy of the domain. The presented model representations of the indicated effect confirmed the stated assumption.

Conclusions. Mathematical models for locally nonequilibrium heat transfer processes and the theory of thermal stresses are developed and investigated on the basis of constitutive relations of the theory of thermal shock for equations of hyperbolic type in a domain with a thermally isolated moving boundary. A numerical experiment is presented to demonstrate the possibility of transiting from one form of analytical solution of a thermophysical problem to another equivalent form of a new type. The described energy effect manifests itself both for parabolic type equations based on the classical Fourier phenomenology, as well as for hyperbolic type equations based on the generalized Maxwell–Cattaneo–Lykov–Vernott phenomenology.

Keywords: moving thermally insulated boundary, temperature field, temperature stresses, equations of hyperbolic type

• Submitted: 30.11.2022 • Revised: 21.04.2023 • Accepted: 21.07.2023

For citation: Kartashov E.M. New energy effect in non-cylindrical domains with a thermally insulated moving boundary. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):106–117. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-106-117>

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

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Автор впервые столкнулся с излагаемым ниже эффектом возникновения градиента концентрации в области с движущейся во времени непроницаемой границей при изучении явления адсорбционно-го понижения прочности и долговечности хрупких полимеров в поверхностно-активных средах [1]. Изучение литературы показало, что указанное явление затрагивает многие области науки и техники и, по существу, до настоящего времени практически не описано в научных публикациях. Применительно к тепловым процессам будет показано, что в области с движущейся термоизолированной границей, несмотря на отсутствие внутренних и внешних источников теплоты, тем не менее, возникает градиент температуры, поскольку кинетическая энергия движения границы переходит в тепловую энергию области. Стохастический анализ указанного энергетического эффекта для среднего значения температуры на основе анализа соответствующей дисперсии показал подобие поведения дисперсии поведению, возникшему в области среднего значения температурных напряжений, создающих риски возникновения трещин и возможного начала разрушения материала [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Остановимся кратко на теплофизических задачах в областях с движущимися во времени границами (области нецилиндрического типа).

Круг вопросов, при рассмотрении которых приходится сталкиваться с краевыми задачами нестационарной теплопроводности в нецилиндрических областях типа $[0, y(t)]$, $t > 0$ или $[y(t), \infty)$, $t > 0$, где $y(t)$ – непрерывная функция, весьма широк. Подобные проблемы возникают при теоретическом изучении процессов переноса энергии, связанных с изменением

агрегатного состояния вещества, в теории прочности, теории плотин, механике почв, термике нефтяных пластов, электродинамических задачах, задачах фильтрации, теории зонной очистки материалов, кинетической теории роста кристаллов, термомеханике при изучении теплового удара и т.д. [3].

С математической точки зрения краевые задачи переноса в области с движущимися границами принципиально отличны от классических. Вследствие зависимости границы области от времени к этому типу задач неприменимы классические методы уравнений математической физики, т.к., оставаясь в рамках этих методов, не удастся согласовать решение уравнения теплопроводности с движением границы области. Этим объясняется тот факт, что в аналитической теплофизике к настоящему времени рассмотрены лишь простейшие случаи с равномерно движущейся границей или частично с корневой зависимостью.

Пусть $\bar{\Omega}_t$ – нецилиндрическая область, сечение которой плоскостью-характеристикой $t = \text{const} \geq t_0 > 0$ есть выпуклая область D_t изменения $M(x, y, z)$ с границей S_t , зависящей от времени $t \geq 0$, $\bar{n}$ – внешняя нормаль к S_t – вектор, непрерывный в точках S_t , так что $\bar{\Omega}_t = \{M \in \bar{D}_t = D_t + S_t, t \geq 0\}$.

Пусть $T(M, t)$ – температурная функция, удовлетворяющая условиям задачи, a – температуропроводность, f – функция источника; Φ_0 – начальная температура; β_1, β_2 – коэффициенты; C^0, C^1, C^2 – классы функций.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T(M, t) + f(M, t), M \in D_t, t > 0, \quad (1)$$

$$T(M, t)|_{t=0} = \Phi_0(M), M \in \bar{D}_{t=0}, \quad (2)$$

$$\beta_1 \frac{\partial T(M, t)}{\partial n} + \beta_2 T(M, t) = \varphi(M, t), M \in S_t, t \geq 0. \quad (3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} f(M, t) \in C^0(\overline{\Omega_t}); \Phi_0(M) \in C^1(\overline{\Omega_t}); \\ \varphi(M, t) \in C^0(S_t \times t \geq 0); \beta_1^2 + \beta_2^2 > 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Искомое решение: $T(M, t) \in C^2(\Omega_t) \cap C^0(\overline{\Omega_t})$, $\text{grad}_M T(M, t) \in C^0(\overline{\Omega_t})$.

Граничное условие (3) включает случаи температурного нагрева, теплового нагрева, нагрева средой (или охлаждения во всех трех случаях). Если $\overline{D}$ – каноническая (цилиндрическая) область с неподвижной границей S (упругое полупространство, бесконечная пластина, цилиндр, шар и т.д.), то условие теплоизоляции границы S области D записывается в виде

$$\left. \frac{\partial T(M, t)}{\partial n} \right|_{M \in S} = 0, \quad t > 0 \quad (5)$$

и является классическим граничным условием в аналитической теплофизике при постановке соответствующих задач для уравнений параболического типа. Однако наличие движущейся границы принципиально меняет вид граничного условия ее теплоизоляции, и это обстоятельство не учитывается в литературе в различного рода приложениях, связанных с теплоизоляцией движущейся границы.

Для вывода указанного условия рассмотрим область $\Omega_t = (0 < z < y(t), t > 0)$, где $y(t)$ – непрерывно-дифференцируемая функция; $v(t) = dy(t)/dt$ – скорость перемещения границы; $T(z, t)$ – температурное поле в Ω_t ; $F(z, t)$ – непрерывно распределенный в Ω_t нестационарный источник теплоты ($F(z, t)/c\rho = f(z, t)$), где c – теплоемкость, ρ – плотность. Имеем для Ω_t :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + f(z, t), \quad (z, t) \in \Omega_t. \quad (6)$$

Запишем уравнение теплового баланса в момент времени $(t + \Delta t)$, считая границу $z = y(t)$ теплоизолированной:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} \Delta t + c\rho \Delta t \int_0^{y(t)+\Delta y} f(z, t) dz = \\ = c\rho \int_0^{y(t)} [T(z, t + \Delta t) - T(z, t)] dz + c\rho \int_{y(t)}^{y(t)+\Delta y} T(z, t + \Delta t) dz, \end{aligned}$$

где λ – теплопроводность.

Ко второму из интегралов справа применим теорему о среднем

$$\begin{aligned} -a \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} \Delta t + \Delta t \int_0^{y(t)+\Delta y} f(z, t) dz = \\ = \int_0^{y(t)} [T(z, t + \Delta t) - T(z, t)] dz + T(z, t + \Delta t) \Big|_{z=y+\theta \Delta y} \Delta y, \end{aligned}$$

где $0 < \theta < 1$. Разделив обе части равенства на Δt и перейдя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим

$$-a \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} + \int_0^{y(t)} f(z, t) dz = \int_0^{y(t)} \frac{\partial T}{\partial t} dz + v(t) T(z, t) \Big|_{z=y(t)}.$$

Подставим под знак интеграла вместо $\partial T/\partial t$ правую часть уравнения теплопроводности (6), проведем интегрирование и приведем подобные члены. В результате окончательно получим условие

$$\left. \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right|_{z=y(t)} + \frac{v(t)}{a} T(z, t) \Big|_{z=y(t)} = 0, \quad t > 0, \quad (7)$$

которое и представляет собой условие тепловой изоляции для подвижной границы. Если скорость движения границы $v(t) = 0$, то приходим к условию $(\partial T/\partial n)|_S = 0$, означающему теплоизоляцию неподвижной граничной поверхности.

С конца 60-х годов прошлого столетия появляются систематические публикации по гиперболическим моделям переноса с учетом конечной скорости распространения теплоты^{1,2} [4–16]. Сейчас популярно выделять большой класс моделей, основанных на уравнении

$$\frac{\partial T(M, t)}{\partial t} = a \Delta T(M, t) - \tau_r \frac{\partial^2 T(M, t)}{\partial t^2}, \quad (M, t) \in \Omega_t, \quad (8)$$

где τ_r – время релаксации теплового потока, связанное со скоростью распространения теплоты соотношением $v_T = \sqrt{a/\tau_r}$. Краевыми задачами для уравнения (8) описываются высокоинтенсивный теплообмен в устройствах импульсной и лазерной техники; лазерная обработка металлов; процессы плазменного напыления; процессы, происходящие в энергетических каналах ядерных реакторов и в псевдооживленном слое, дисперсных системах и зернистых материалах, слоистых полупроводниковых структурах; при описании электронной

¹ Еремин А.В. *Методология моделирования тепломассопереноса, упругих колебаний и электромагнитных волн с учетом пространственно-временной нелокальности*: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Самара; 2021. 30 с. [Eremin A.V. *Modeling methodology of heat and mass transfer, elastic vibrations and electromagnetic waves with allowance for spatial and temporal nonlocality*. Abstract. Cand. Sci. Thesis (Eng.). Samara; 2021. 30 p. (in Russ.).]

² Жуков В.В. *Исследование внутренних механизмов переноса тепла, массы, импульса с учетом релаксационных явлений*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара; 2021. 18 с. [Zhukov V.V. *Investigation of internal mechanisms of heat, mass, and momentum transfer with allowance for relaxation phenomena*. Abstract. Cand. Sci. Thesis (Eng.). Samara; 2021. 18 p. (in Russ.).]

теплопроводности и в высокотемпературной плазме; при математическом моделировании фронтовых процессов терморазложения; в кристаллах катализаторов и при выращивании гомоэпитаксиальных пленок германия, возникающих в ходе экзотермических химических реакций и др. В [3] изучены вопросы корректной постановки краевых задач для уравнений (8), показано, что запись граничных условий второго и третьего рода существенно отличается от (3) для уравнений параболического типа. Однако вопрос о теплоизоляции движущейся границы для уравнения (8) до сих пор остается открытым. С этой целью рассмотрим феноменологическое соотношение Максвелла – Каттанео – Лыкова – Вернотта [4, 6–7]:

$$\bar{q}(M, t) = -\lambda \operatorname{grad} T(M, t) - \tau_r \frac{\partial \bar{q}(M, t)}{\partial t},$$

$\bar{q}$ – вектор плотности теплового потока, лежащее в основе аналитической теории локально-неравновесных процессов переноса теплоты в нецилиндрической области. Запишем это равенство в виде:

$$\left(1 + \tau_r \frac{\partial}{\partial t}\right) \bar{q}(M, t) = -\lambda \operatorname{grad} T(M, t), \quad M \in D_t, \quad t > 0, \quad (9)$$

или

$$\bar{q}(M, t + \tau_r) = -\lambda \operatorname{grad} T(M, t), \quad M \in D_t, \quad t > 0, \quad (10)$$

используя разложение в ряд Маклорена (9) функции $\bar{q}(M, t + \tau_r)$ в окрестности точки $\tau_r = 0$.

Соотношение (10) можно переписать в виде:

$$\bar{q}(M, t) = -\lambda \operatorname{grad} T(M, t - \tau_r), \quad M \in D_{t-\tau_r}, \quad t > \tau_r. \quad (11)$$

Используя уравнение энергии $\operatorname{div} \partial T(M, t) / \partial t = -\operatorname{div} [\bar{q}(M, t)]$ и соотношение (11), уравнение (8) можно записать в виде:

$$\frac{\partial T(M, t)}{\partial t} = a \Delta T(M, t - \tau_r), \quad M \in D_{t-\tau_r}, \quad t > \tau_r. \quad (12)$$

Рассмотрим теперь интересующую нас область $z > y(t)$, $t > 0$, в которой (12) будет

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(z, t - \tau_r)}{\partial z^2}, \quad z > y(t - \tau_r), \quad t > \tau_r. \quad (13)$$

При постоянных начальных условиях, отсутствии внутренних источников теплоты и внешних условий нагрева при теплоизоляции движущейся границы справедливо условие

$$\operatorname{cp} \int_{y(t-\tau_r)}^{\infty} T(z, t) dz = \operatorname{const}, \quad t > \tau_r. \quad (14)$$

Дифференцируя обе части (14) по t и используя уравнение (13), приходим к соотношению

$$\left[\frac{\partial T(z, t - \tau_r)}{\partial z} + \frac{1}{a} \cdot \frac{dy(t - \tau_r)}{dt} T(z, t) \right]_{z=y(t-\tau_r)} = 0, \quad t > \tau_r, \quad (15)$$

которое можно переписать в виде:

$$\left[\frac{\partial T(z, t)}{\partial z} + \frac{v(t)}{a} T(z, t + \tau_r) \right]_{z=y(t)} = 0, \quad t > 0, \quad (16)$$

где $v(t) = dy/dt$. Выражение (16) является условием теплоизоляции движущейся границы для локально-неравновесных процессов переноса теплоты, описываемых уравнениями гиперболического типа. В частных случаях (локально-равновесные процессы, $\tau_r = 0$) или области цилиндрического типа ($v(t) = 0$) приходим к условиям теплоизоляции, рассмотренным выше.

ЭФФЕКТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ С ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ГРАНИЦЕЙ

Граничные условия (7), (16) в соответствующих модельных представлениях нестационарной теплопроводности создают эффект возникновения градиента температуры в области и, как следствие, несмотря на отсутствие внешнего и внутреннего теплового воздействия, появляются соответствующие термоупругие напряжения. Формально возникает представление о невозможности проявления указанного эффекта, однако аналитические решения модельных задач показывают обратное. В [2] высказано предположение, что кинетическая энергия движущейся теплоизолированной границы переходит в тепловую энергию области, что и вызывает тепловые и термические эффекты. В связи с этим рассмотрим упругое полупространство $z > l + vt$, $t > 0$ с равномерно движущейся теплоизолированной границей при отсутствии внешних и внутренних тепловых нагрузок в постановке тепловой задачи для уравнения гиперболического типа:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \tau_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}, \quad z > l + vt, \quad t > 0, \quad (17)$$

$$T(z, t)|_{t=0} = T_0, \quad \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad z \geq l, \quad (18)$$

$$\left[\frac{\partial T(z, t)}{\partial z} + \frac{v}{a} T(z, t + \tau_r) \right]_{z=l+vt} = 0, \quad t > 0, \quad (19)$$

$$|T(z, t)| < \infty, z \geq l + vt, t \geq 0. \quad (20)$$

Граничное условие (19) можно записать в виде:

$$\left[\frac{\partial T(z, t)}{\partial z} + \frac{v}{a} T(z, t) + \frac{v\tau_r}{a} \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} \right]_{z=l+vt} = 0, t > 0. \quad (21)$$

Введем безразмерные переменные

$$z' = (z - l)/l; \quad \tau = at/l^2; \quad v_0 = vl/a; \quad \tau_0 = a\tau_r/l^2;$$

$$T^*(z', \tau) = [T(z, t) - T_0]/T_0$$

и далее подвижную систему координат $\xi = z' - v_0\tau$, $\tau > 0$, полагая $T^*(z', \tau) = W(\xi, \tau)$.

Соотношения (17)–(21) теперь будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \tau} &= (1 - \tau_0 v_0^2) \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} + v_0 \frac{\partial W}{\partial \xi} + \\ &+ 2v_0 \tau_0 \frac{\partial^2 W}{\partial \xi \partial \tau} - \tau_0 \frac{\partial^2 W}{\partial \tau^2} = 0, \xi > 0, \tau > 0, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} W(\xi, \tau)|_{\tau=0} &= 0, \quad \frac{\partial W(\xi, \tau)}{\partial \tau}|_{\tau=0} = \\ &= v_0 \frac{\partial W(\xi, \tau)}{\partial \xi}|_{\tau=0} = 0, \xi \geq 0, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} (1 - \tau_0 v_0^2) \frac{\partial W(\xi, \tau)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} &= \\ &= -v_0 \left[W(\xi, \tau) + \tau_0 \frac{\partial W(\xi, \tau)}{\partial \tau} + 1 \right] \Big|_{\xi=0}, \tau > 0, \end{aligned} \quad (24)$$

$$|W(\xi, \tau)| < \infty, \xi \geq 0, \tau \geq 0. \quad (25)$$

В пространстве изображений по Лапласу:

$$\bar{W}(\xi, p) = \int_0^\infty W(\xi, \tau) \exp(-p\tau) d\tau$$

операционное решение преобразованной задачи (22)–(25)

$$\begin{aligned} (1 - \tau_0 v_0^2) \frac{d^2 \bar{W}}{d\xi^2} + v_0 (1 + 2\tau_0 p) \frac{d\bar{W}}{d\xi} - \\ - p(1 + \tau_0 p) \bar{W} = 0, \xi > 0, \end{aligned}$$

$$(1 - \tau_0 v_0^2) \frac{d\bar{W}}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = -v_0 \left[(1 + \tau_0 p) \bar{W} + \frac{1}{p} \right] \Big|_{\xi=0},$$

$$|\bar{W}(\xi, p)| < \infty, \xi \geq 0$$

запишем в виде:

$$\bar{W}(\xi, p) = \bar{\Psi}_1(\xi, p) \bar{\Psi}_2(\xi, p), \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_1(\xi, p) &= \frac{v_0}{\left[(-v_0/2) + \sqrt{\tau_0} \sqrt{(p+2\alpha)(p+2\beta)} \right]} \times \\ &\times \exp \left[-\frac{(v_0/2)\xi}{1 - \tau_0 v_0^2} \right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_2(\xi, p) &= \\ &= \frac{1}{p} \exp \left\{ -\left[\frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - \tau_0 v_0^2} \sqrt{(p+2\alpha)(p+2\beta)} + \frac{\tau_0 v_0 \xi}{1 - \tau_0 v_0^2} p \right] \right\}, \quad (28) \\ \alpha &= \frac{1 + \sqrt{1 - \tau_0 v_0^2}}{4\tau_0}; \quad \beta = \frac{1 - \sqrt{1 - \tau_0 v_0^2}}{4\tau_0}. \end{aligned}$$

Для нахождения оригиналов изображений (27)–(28) рассмотрим предварительно новые преобразования операционного исчисления, представляющие интерес для гиперболических моделей переноса. В [3] приведен оригинал изображения

$$\begin{aligned} \frac{1}{p} \exp \left[-\xi \sqrt{(p+2\alpha)(p+2\beta)} \right] \leftarrow \\ \leftarrow \left[\exp(-\rho\xi) + \sigma\xi \int_{\xi}^t \exp(-\rho\tau) \frac{I_1(\sigma\sqrt{\tau^2 - \xi^2})}{\sqrt{\tau^2 - \xi^2}} d\tau \right] \times \quad (29) \\ \times \eta(t - \xi) = W_1(\xi, t) \eta(t - \xi). \end{aligned}$$

Здесь $\sigma = \alpha - \beta$, $\rho = \alpha + \beta$, $I_1(z)$ – модифицированная функция Бесселя, $\eta(z)$ – функция Хевисайда. С другой стороны, вычисляя оригинал изображения слева в (29) с помощью контурного интеграла Римана – Меллина с двумя точками ветвления по методике, развитой в [3], находим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{p} \exp \left[-\xi \sqrt{(p+2\alpha)(p+2\beta)} \right] \leftarrow \left\{ \exp(-2\xi\sqrt{\alpha\beta}) - \right. \\ \left. - \frac{1}{\pi} \int_0^{2\sigma} \frac{\sin \xi \sqrt{y(2\sigma - y)}}{y + 2\beta} \exp[-(y + 2\beta)t] dy \right\} \eta(t - \xi) = \quad (30) \\ = W_2(\xi, t) \eta(t - \xi). \end{aligned}$$

Покажем, что $W_1(\xi, t) = W_2(\xi, t)$.

Имеем:

$$\begin{aligned} W_1(\xi, t) &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left[- \int_{\xi}^t \exp(-\rho \tau) I_0(\sigma \sqrt{\tau^2 - \xi^2}) d\tau \right] = \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left[- \int_{\xi}^t \exp(-\rho \tau) J_0(\sigma \sqrt{\xi^2 - \tau^2}) d\tau \right]. \end{aligned} \quad (31)$$

Продифференцируем обе части (31) по t :

$$\begin{aligned} [W_1(\xi, t)]'_t &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left[- \exp(-\rho t) J_0(\sigma \sqrt{\xi^2 - t^2}) \right] = \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left[- \exp(-2\beta t) \exp(-\sigma t) J_0(\sigma \sqrt{\xi^2 - t^2}) \right]. \end{aligned}$$

Воспользуемся далее достаточно редким интегралом [3]:

$$\begin{aligned} \int_0^a \frac{\exp(-px)}{\sqrt{ax - x^2}} \cos c \sqrt{ax - x^2} dx &= \\ &= \pi \exp(-ap/2) J_0 \left(\frac{a}{2} \sqrt{c^2 - p^2} \right). \end{aligned}$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} [W_1(\xi, t)]'_t &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\sigma} \sin \xi \sqrt{y(2\sigma - y)} \times \\ &\times \exp[-(y + 2\sigma)t] dy. \end{aligned} \quad (32)$$

Интегрируя обе части (32) по t и используя для нахождения постоянной интегрирования теорему о конечном значении $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \bar{f}(p)$, дающую в (30) $C = \exp(-2\xi\sqrt{\alpha\beta})$, получаем окончательно:

$$\begin{aligned} W_1(\xi, t) &= \exp(-2\xi\sqrt{\alpha\beta}) - \\ &- \frac{1}{\pi} \int_0^{2\sigma} \frac{\sin \xi \sqrt{y(2\sigma - y)}}{y + 2\beta} \exp[-(y + 2\beta)t] dy = W_2(\xi, t). \end{aligned}$$

Таким образом, находим оригинал:

$$\begin{aligned} \frac{1}{p} \exp \left[- \frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - \tau_0 v_0^2} \sqrt{(p + 2\alpha)(p + 2\beta)} \right] \leftarrow \\ \leftarrow \left\{ \exp \left[- \frac{(v_0/2)\xi}{1 - \tau_0 v_0^2} \right] - \frac{1}{\pi} \int_0^{2\sigma} \frac{1}{y + 2\beta} \sin \frac{\xi \sqrt{\tau_0} \sqrt{y(2\sigma - y)}}{1 - \tau_0 v_0^2} \times \right. \\ \left. \times \exp[-(y + 2\beta)\tau] dy \right\} \eta \left(\tau - \frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - \tau_0 v_0^2} \right). \end{aligned} \quad (33)$$

Теперь, используя (33), находим оригинал изображения $\bar{\Psi}_2(\xi, p)$ (28):

$$\begin{aligned} \Psi_2(\xi, \tau) &= \\ &= \left\{ \exp \left[- \frac{(v_0/2)\xi}{1 - \tau_0 v_0^2} \right] - \frac{1}{\pi} \int_0^{2\sigma} \frac{1}{y + 2\beta} \sin \frac{\xi \sqrt{\tau_0} \sqrt{y(2\sigma - y)}}{1 - \tau_0 v_0^2} \times \right. \\ &\times \exp \left[-(y + 2\beta) \left(\tau - \frac{\tau_0 v_0 \xi}{1 - \tau_0 v_0^2} \right) \right] dy \left. \right\} \eta \left(\tau - \frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - v_0 \sqrt{\tau_0}} \right). \end{aligned} \quad (34)$$

Оригинал изображения $\bar{\Psi}_1(\xi, p)$ (27) имеет вид:

$$\begin{aligned} \Psi_1(\xi, \tau) &= \exp \left(- \frac{(v_0/2)\xi}{1 - \tau_0 v_0^2} \right) \times \\ &\times \left[\frac{v_0 \sqrt{\tau_0}}{\sqrt{\pi}} \int_{2\beta}^{2\alpha} \frac{\sqrt{(2\alpha - y)(y - 2\beta)} \exp(-y\tau)}{(v_0^2/4) + \tau_0(2\alpha - y)(y - 2\beta)} dy \right]. \end{aligned} \quad (35)$$

Искомый оригинал изображения $\bar{W}(\xi, p)$ (26) теперь будет иметь вид:

$$\begin{aligned} W(\xi, \tau) &= \left[\int_{\frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - v_0 \sqrt{\tau_0}}}^{\tau} \Psi_1(\xi, \tau - \tau') \Psi_2(\xi, \tau') d\tau' \right] \times \\ &\times \eta \left(\tau - \frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - v_0 \sqrt{\tau_0}} \right). \end{aligned} \quad (36)$$

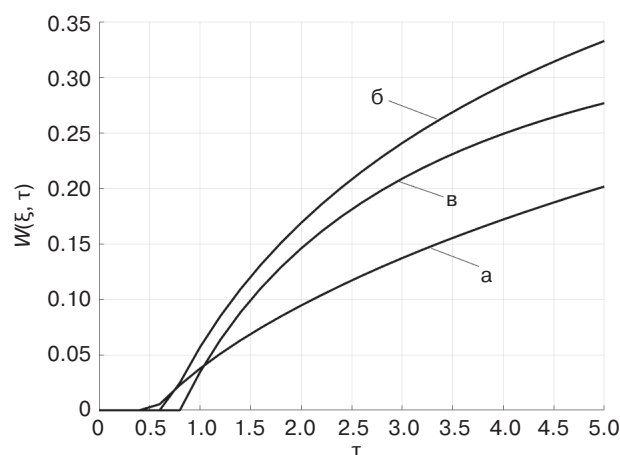


Рис. 1. Зависимость температурной функции $W(\xi, \tau)$ (36) от τ в сечении $\xi = 1$ для различных v_0 : $v_0 = 0.16$ (а); $v_0 = 0.5$ (б); $v_0 = 0.75$ (в) при $\tau_0 = 0.25$

На рис. 1 приведены кривые зависимости температурной функции (36) от τ в сечении $\xi = 1$ для различных v_0 при $\tau_0 = 0.25$. Кривые на рис. 1 наглядно показывают особенности тепловой реакции области

для локально-неравновесных процессов (в аналитическом решении (36) присутствует функция Хевисайда, объясняющая задержку начала распространения теплоты в фиксированном сечении).

ТЕРМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ ОБЛАСТИ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ $W(\xi, \tau)$

Следующий шаг – исследование термической реакции области $\bar{\Omega}_t = \{z \geq l + vt, t \geq 0\}$ с движущейся термоизолированной границей в рамках модельной задачи (17)–(20). Рассматривается, как и выше, упругое полупространство, что представляет практический интерес для многих направлений науки и техники, описанных в [3]. Запишем определяющие соотношения динамической термоупругости для области $\bar{\Omega}_t = \{M(x, y, z) \in \bar{D}_t = D_t + S_t, t \geq 0\}$ с температурной функцией $T(M, t)$. Пусть T_0 – начальная температура, при которой область находится в недеформированном и ненапряженном состоянии; $\sigma_{ij}(M, t)$, $\varepsilon_{ij}(M, t)$, $U_i(M, t)$ ($i = x, y, z$) – соответственно компоненты тензоров напряжения, деформации и вектора перемещения, удовлетворяющие основным уравнениям (несвязанной) термоупругости (в индексных обозначениях) [19, 20]:

$$\sigma_{ij,j}(M, t) = \rho \ddot{U}_i(M, t), \quad (37)$$

$$\varepsilon_{ij}(M, t) = (1/2) [U_{i,j}(M, t) + U_{j,i}(M, t)], \quad (38)$$

$$\sigma_{ij}(M, t) = 2\mu \varepsilon_{ij}(M, t) + [\lambda \varepsilon_{ii}(M, t) - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T(T(M, t) - T_0)]\delta_{ij}, \quad (39)$$

где ρ – плотность; $\mu = G$, G – модуль сдвига; $\lambda = 2G\nu/(1 - 2\nu)$ – изотермические коэффициенты Ламе; ν – коэффициент Пуассона, при этом $2G(1 + \nu) = E$, E – модуль Юнга; α_T – коэффициент линейного теплового расширения; δ_{ij} – символ Кронекера; $\varepsilon_{ii}(M, t) = \bar{\varepsilon}(M, t) = U_{i,i}(M, t)$ – объемная деформация, связанная с суммой нормальных напряжений $\bar{\sigma}(M, t) = \sigma_{nn}(M, t)$, $n = x, y, z$ соотношением

$$\bar{\varepsilon}(M, t) = \frac{1 - 2\nu}{E} \bar{\sigma}(M, t) + 3\alpha_T [T(M, t) - T_0]. \quad (40)$$

Для случая одномерного движения $M = M(z, t)$, $z > l + vt$, $t > 0$ имеем из (37)–(40):

$$\begin{aligned} U_x = U_y = 0, \quad U_z = U_z(z, t), \quad \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0, \\ \varepsilon_{zz}(z, t) = \partial U_z(z, t) / \partial z = [1/(1 - \nu)] \times \\ \times \{[(1 - 2\nu)/(2G)] \sigma_{zz}(z, t) + (1 + \nu)\alpha_T T(z, t) - T_0\}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}(z, t)}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 U_z(z, t)}{\partial t^2}.$$

Дифференцируя это соотношение по z и подставляя значение $\partial U_z(z, t) / \partial z$, приходим к уравнению вида:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial z^2} - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial t^2} = \\ = \frac{(1 + \nu)}{(1 - \nu)} \alpha_T \rho \frac{\partial^2 [T(z, t) - T_0]}{\partial t^2}, \quad z > l + vt, \quad t > 0 \end{aligned} \quad (41)$$

с краевыми условиями:

$$\sigma_{zz}(z, t)|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{zz}(z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad z \geq l, \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(z, t)|_{z=l+vt} = 0, \quad t > 0, \\ |\sigma_{zz}(z, t)| < \infty, \quad z \geq l + vt, \quad t \geq 0. \end{aligned} \quad (43)$$

В (41) $v_p = \sqrt{2G(1 - \nu) / [\rho(1 - 2\nu)]} = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$ – скорость распространения волны расширения в упругой среде, близкая к скорости звука. Остальные компоненты тензора напряжения, отличные от нуля, согласно (37)–(39), имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}(z, t) = \sigma_{yy}(z, t) = \\ = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_{zz}(z, t) - \frac{E\alpha_T [T(z, t) - T_0]}{1 - \nu}. \end{aligned}$$

При этом

$$\varepsilon_{zz}(z, t) = \frac{1 - 2\nu}{2G(1 - \nu)} \sigma_{zz}(z, t) + \frac{(1 + \nu)}{(1 - \nu)} \alpha_T [T(z, t) - T_0].$$

Функция $T(z, t)$ в (41)–(43) удовлетворяет условиям (17)–(20). Для решения задачи (41)–(43) перейдем в систему координат (z', τ) по приведенным выше соотношениям, полагая при этом

$$\alpha_0 = v_p l / a, \quad S_T = \alpha_T (3\lambda + 2\mu) = \frac{\alpha_T E}{(1 - 2\nu)},$$

$$\sigma_{z'z'}(z', \tau) = \frac{\sigma_{zz}(z, t)}{S_T T_0}.$$

Опуская промежуточные выкладки перехода, введем далее подвижную систему координат: $\xi = z' - v_0 \tau$, полагая $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \sigma_{z'z'}(z', \tau)$, $T^*(z', \tau) = W(\xi, \tau)$. Соотношения (41)–(43) теперь примут вид:

$$(\alpha_0^2 - v_0^2) \frac{\partial^2 \sigma_{\xi\xi}}{\partial \xi^2} + 2v_0 \frac{\partial^2 \sigma_{\xi\xi}}{\partial \xi \partial \tau} - \frac{\partial^2 \sigma_{\xi\xi}}{\partial \tau^2} = \frac{\partial^2 W}{\partial \tau^2} - 2v_0 \frac{\partial^2 W}{\partial \xi \partial \tau} + v_0^2 \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2}, \quad \xi > 0, \tau > 0, \quad (44)$$

$$\left. \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) \right|_{\tau=0} = \frac{\partial \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0, \quad \xi \geq 0, \quad \left. \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) \right|_{\xi=0} = 0, \quad \tau > 0, \quad \left| \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) \right| < \infty, \quad \xi \geq 0, \quad \tau \geq 0 \quad (45)$$

В пространстве изображений по Лапласу соотношения (44)–(45) записываются в виде:

$$(\alpha_0^2 - v_0^2) \frac{d^2 \bar{\sigma}_{\xi\xi}}{d\xi^2} + 2v_0 p \frac{d \bar{\sigma}_{\xi\xi}}{d\xi} - p^2 \bar{\sigma}_{\xi\xi} = \frac{p(p + v_0^2)}{1 - \tau_0 v_0^2} \bar{W} - \frac{v_0(v_0^2 + 2p)}{1 - \tau_0 v_0^2} \frac{d \bar{W}}{d\xi}, \quad \xi > 0, \quad (46)$$

$$\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p) \Big|_{\xi=0} = 0, \quad \left| \bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p) \right| < \infty, \quad \xi \geq 0. \quad (47)$$

Здесь было использовано соотношение:

$$\frac{d^2 \bar{W}}{d\xi^2} = \frac{p(1 + \tau_0 p)}{1 - \tau_0 v_0^2} \bar{W} - \frac{v_0(1 + 2\tau_0 p)}{1 - \tau_0 v_0^2} \frac{d \bar{W}}{d\xi},$$

вытекающее из операционной формы уравнения (22). Для уменьшения громоздкости при решении задачи (46)–(47) примем во внимание тот факт, что инерционные эффекты в (41) действуют времена микросекундной длительности. Тогда входящее в общее решение (26) выражение $\sqrt{\tau_0 p^2 + p + v_0^2/4}$ можно записать в виде:

$$\sqrt{\tau_0 p^2 + p + v_0^2/4} \simeq p\sqrt{\tau_0} (1 + 1/(2\tau_0 p))$$

и решение (26) принимает вид:

$$\bar{W}(\xi, p) = \frac{v_0/\sqrt{\tau_0}}{p \left[p + (1 - v_0\sqrt{\tau_0})/(2\tau_0) \right]} \times \exp \left[-\frac{(2\tau_0 p + 1)\xi}{2\sqrt{\tau_0}(1 - v_0\sqrt{\tau_0})} \right].$$

Искомое напряжение в пространстве изображений теперь будет:

$$\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p) = \bar{F}(p) \left\{ \exp[-\bar{\gamma}(p)\xi] - \exp \left[-\frac{\xi}{\alpha_0 - v_0} p \right] \right\}, \quad (48)$$

$$\bar{F}(p) = \left[\frac{A_{11}}{(p + \gamma_{11})(p + \gamma_{12})} + \frac{A_{12}}{p(p + \gamma_{11})(p + \gamma_{12})} + \frac{A_{13}}{p^2(p + \gamma_{11})(p + \gamma_{12})} \right] - \left[\frac{A_{21}}{(p + \gamma_{11})(p + \gamma_{13})} + \frac{A_{31}}{p(p + \gamma_{11})(p + \gamma_{13})} + \frac{A_{32}}{p^2(p + \gamma_{11})(p + \gamma_{13})} \right];$$

$$A_{11} = \frac{v_0(\alpha_0 - v_0)(1 + 2\tau_0 - v_0\sqrt{\tau_0})}{2\alpha_0\sqrt{\tau_0}(\alpha_0\sqrt{\tau_0} - 1)(1 - \tau_0 v_0^2)};$$

$$A_{12} = A_{11} \left[v_0^2 + (1 + \tau_0 v_0^2) / (2\tau_0) \right],$$

$$A_{13} = \frac{v_0^3(\alpha_0 - v_0)}{4\alpha_0\sqrt{\tau_0}(1 - \tau_0 v_0^2)(\alpha_0\sqrt{\tau_0} - 1)},$$

$$A_{21} = \frac{v_0(\alpha_0 + v_0)(1 + 2\tau_0 - v_0\sqrt{\tau_0})}{2\alpha_0\sqrt{\tau_0}(\alpha_0\sqrt{\tau_0} + 1)(1 - \tau_0 v_0^2)},$$

$$A_{31} = A_{21} \left[v_0^2 + (1 + \tau_0 v_0^2) / (2\tau_0) \right],$$

$$A_{32} = \frac{v_0^3(\alpha_0 + v_0)}{4\alpha_0\sqrt{\tau_0}(1 - \tau_0 v_0^2)(\alpha_0\sqrt{\tau_0} + 1)},$$

$$\gamma_{11} = \frac{1 - v_0\sqrt{\tau_0}}{2\tau_0}, \quad \gamma_{12} = \frac{\alpha_0 - v_0}{2\sqrt{\tau_0}(\alpha_0\sqrt{\tau_0} - 1)},$$

$$\gamma_{13} = \frac{\alpha_0 + v_0}{2\sqrt{\tau_0}(\alpha_0\sqrt{\tau_0} + 1)}, \quad \bar{\gamma}(p) = \frac{2\tau_0 p + 1}{2\sqrt{\tau_0}(1 - v_0)\sqrt{\tau_0}}.$$

Теперь из (48) находим для искомого напряжения:

- при $\alpha_0\sqrt{\tau_0} = v_p/v_T > 1$

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \begin{cases} 0 & \tau < \frac{\xi}{\alpha_0 - v_0}, \\ \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) & \frac{\xi}{\alpha_0 - v_0} < \tau < \frac{\xi\sqrt{\tau_0}}{1 - v_0\sqrt{\tau_0}}, \\ \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) + \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) & \tau > \frac{\xi\sqrt{\tau_0}}{1 - v_0\sqrt{\tau_0}}; \end{cases} \quad (49)$$

- при $\alpha_0 \sqrt{\tau_0} = v_p / v_T < 1$

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \begin{cases} 0, & \tau < \frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - v_0 \sqrt{\tau_0}}, \\ \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau), & \frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - v_0 \sqrt{\tau_0}} < \tau < \frac{\xi}{\alpha_0 - v_0}, \\ \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) + \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & \tau > \frac{\xi}{\alpha_0 - v_0}. \end{cases} \quad (50)$$

Здесь:

$$\sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = F\left(\tau - \frac{\xi \sqrt{\tau_0}}{1 - v_0 \sqrt{\tau_0}}\right) \exp\left[-\frac{\xi}{2\sqrt{\tau_0}(1 - v_0 \sqrt{\tau_0})}\right],$$

$$\sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = -F\left(\tau - \frac{\xi}{\alpha_0 - v_0}\right),$$

$$F(\tau) = \left[B_{11} \exp(-\gamma_{11}\tau) + B_{12} \exp(-\gamma_{12}\tau) + \frac{A_{13}\tau}{\gamma_{11}\gamma_{12}} + B_{13} \right] - \left[B_{21} \exp(-\gamma_{11}\tau) + B_{31} \exp(-\gamma_{13}\tau) + \frac{A_{32}\tau}{\gamma_{11}\gamma_{13}} + B_{32} \right],$$

$$B_{11} = \frac{\gamma_{11}^2 A_{11} - \gamma_{11} A_{12} + A_{13}}{\gamma_{11}^2 (\gamma_{12} - \gamma_{11})},$$

$$B_{12} = \frac{A_{12}\gamma_{12} - A_{11}\gamma_{12}^2 - A_{13}}{\gamma_{12}^2 (\gamma_{12} - \gamma_{11})},$$

$$B_{13} = \frac{A_{12}}{\gamma_{11}\gamma_{12}} - \frac{(\gamma_{11} + \gamma_{12})A_{13}}{\gamma_{11}^2 \gamma_{12}^2},$$

$$B_{21} = \frac{\gamma_{11}^2 A_{21} - \gamma_{11} A_{13} + A_{32}}{\gamma_{11}^2 (\gamma_{13} - \gamma_{11})},$$

$$B_{31} = \frac{\gamma_{13} A_{31} - \gamma_{13}^2 A_{21} - A_{32}}{\gamma_{13}^2 (\gamma_{13} - \gamma_{11})},$$

$$B_{32} = \frac{A_{31}}{\gamma_{11}\gamma_{13}} - \frac{(\gamma_{11} + \gamma_{13})A_{32}}{\gamma_{11}^2 \gamma_{13}^2}.$$

На рис. 2 приведен график зависимости динамического температурного напряжения (49) от безразмерного времени в сечении $\xi = 1$ при $\tau_0 = 0.25$, $\alpha_0 = 3$ ($\alpha_0 \sqrt{\tau_0} = v_p / v_T = 1.5 > 1$; для металлов $v_p / v_T > 1$,

для полимерных стекол $v_p / v_T < 1$) для значений $v_0 = 0.16$ и 0.65 . Как показывают кривые, для локально-неравновесных процессов учет конечной скорости распространения теплоты приводит к существенному изменению картины напряжений по сравнению с соответствующими кривыми в рамках классической феноменологии Фурье [21]. Возьмем произвольную точку (сечение $\xi = \text{const}$). Вначале напряжения в ней равны нулю. В момент времени $\tau = \xi / (\alpha_0 - v_0)$ ($t = (z - l) / v_p$) к этой точке подходит продольная упругая волна напряжения, фронт которой движется со скоростью v_p . Напряжение сжатия меняется скачком и далее убывает (возрастает по абсолютной величине). В момент времени $\tau = \xi \sqrt{\tau_0} / (1 - v_0 \sqrt{\tau_0})$ к этой точке (сечению) подходит тепловая волна, фронт которой движется со скоростью v_T ; напряжение меняется скачком и далее приближается к значению, близкому квазистатическому.

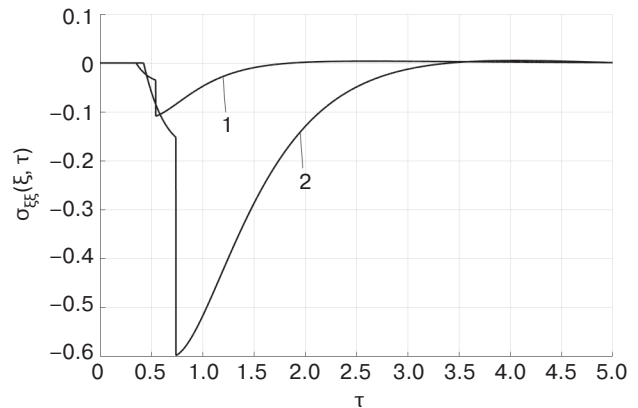


Рис. 2. Зависимость напряжения $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)$ (49) от τ в сечении $\xi = 1$ при $\tau_0 = 0.25$, $v_0 = 0.16$ (1), $v_0 = 0.65$ (2), $\alpha_0 = 3$

Таким образом, в массивном твердом теле (упругое полупространство с движущейся термоизолированной границей) распространяются две волны: тепловая и упругая, причем фронт упругой волны предшествует фронту тепловой волны. Проведенные автором исследования влияния теплоотдачи на движущейся границе области показали, что с уменьшением теплоотдачи с поверхности полупространства динамические температурные напряжения уменьшаются. Если в классическом случае [3] наличие конечной теплоотдачи с поверхности границы полупространства приводит к исчезновению разрывов температурных напряжений, то в случае обобщенной динамической задачи термоупругости [20] характер напряжений остается таким же, как и при бесконечно большом значении коэффициента теплоотдачи (граничное условие первого рода). Эту часть исследований, весьма объемную по своему содержанию, автор предполагает опубликовать в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные модельные представления дают основание для следующего утверждения. Описан новый эффект аналитической теплофизики и прикладной термомеханики: в области с движущейся термоизолированной границей, несмотря на отсутствие внешних и внутренних источников теплоты, возникает градиент температуры, приводящий

к появлению температурного поля и соответствующих ему температурных напряжений, поскольку кинетическая энергия движущейся границы переходит в тепловую энергию области. Указанный эффект проявляется как в классической феноменологии Фурье (уравнения параболического типа), так и в обобщенной феноменологии для локально-неравновесных процессов (уравнения гиперболического типа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карташов Э.М. Тепловое разрушение полимерных волокон в теории временной зависимости прочности. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(6):526–540. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-6-526-540>
2. Карташов Э.М., Соловьев И.А. Стохастический анализ эффекта возникновения градиента температуры при теплоизолированной движущейся границе. *Известия РАН. Энергетика*. 2017;1:119–128.
3. Карташов Э.М., Кудинов В.А. *Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений*. М.: URSS; 2017. 1080 с. ISBN 978-5-9710-4994-4
4. Vernotte P. Les paradoxes de la theorie continue de l'equation de la chaleur. *Comptes Rendus. Acad. Sci. Paris*. 1958;246(22):3154–3155.
5. Лыков А.В. *Теория теплопроводности*. М.: Высшая школа; 1967. 600 с.
6. Cattaneo C. Sur une forme de l'equation de la chaleur eliminant le paradoxe d'une propagation instantanee. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1958;247(4):431–433.
7. Лыков А.В. Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло- и массообмена. *Инженерно-физический журнал*. 1965;9(3):287–304.
8. Баумейстер К., Хамилл Т. Гиперболическое уравнение теплопроводности. Решение задачи о полубесконечном теле. *Теплопередача*. 1969;4:112–119.
9. Соболев С.Л. Локально-неравновесные модели процессов переноса. *Успехи физ. наук*. 1997;167(10):1095–1106. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199710f.1095>
10. Жоу Д., Касас-Баскес Х., Лебон Дж. *Расширенная необратимая термодинамика*: пер. с англ. М.- Ижевск: Институт компьютерных исследований; 2006. 528 с.
11. Кудинов В.А., Кудинов И.В. Получение и анализ точного аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности для плоской стенки. *Теплофизика высоких температур*. 2012;50(1):118–126.
12. Кудинов В.А., Кудинов И.В. Исследование теплопроводности с учетом конечной скорости распространения теплоты. *Теплофизика высоких температур*. 2013;51(2):301–310.
13. Кирсанов Ю.А. *Моделирование теплофизических процессов*. СПб.: Изд-во Политехника; 2022. 230 с.

REFERENCES

1. Kartashov E.M. Thermal destruction of polymer fibers in the theory of temporary dependence of strength. *Tonk. Khim. Technol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(6):526–540 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-6-526-540>
2. Kartashov E.M., Soloviev I.A. Stochastic interpretation of effect of emergence of the gradient of temperature at the heatisolated moving border. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2017;1:119–128 (in Russ.).
3. Kartashov E.M., Kudinov V.A. *Analiticheskie metody teorii teploprovodnosti i ee prilozhenii (Analytical Methods of the Theory of Heat Conduction and its Applications)*. Moscow: URSS; 2012. 1080 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-4994-4
4. Vernotte P. Les paradoxes de la theorie continue de l'equation de la chaleur. *Comptes Rendus. Acad. Sci. Paris*. 1958;246(22):3154–3155.
5. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti (Theory of Heat Conduction)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1967. 600 p. (in Russ.).
6. Cattaneo C. Sur une forme de l'equation de la chaleur eliminant le paradoxe d'une propagation instantanee. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1958;247(4):431–433.
7. Luikov A.V. Application of methods of thermodynamics of irreversible processes to the investigation of heat and mass transfer. *J. Eng. Phys.* 1965;9(3):189–202. <https://doi.org/10.1007/BF00828333>
[Original Russian Text: Lykov A.V. Application of methods of thermodynamics of irreversible processes to the investigation of heat and mass transfer. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. 1965;9(3):287–304 (in Russ.).]
8. Baumeister K., Hamill T. Hyperbolic heat equation. Solving the problem of a semi-infinite body. *Teploperedacha = J. Heat Transfer*. 1969;4:112–119 (in Russ.).
9. Sobolev S.L. Local Non-Equilibrium Transport Models. *Phys. Usp.* 1997;40(10):1043. <https://doi.org/10.1070/PU1997v040n10ABEH000292>
[Original Russian Text: Sobolev S.L. Local Non-Equilibrium Transport Models. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 1997;167(10):1095–1106 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199710f.1095>]
10. Zhou D., Casas-Basquez H., Lebon J. *Rasshirennaya neobratimaya termodinamika (Extended Irreversible Thermodynamics)*: transl. from Engl. Moscow–Izhevsk: Institut Komp'yuternykh Issledovaniy; 2006. 528 p. (in Russ.).

14. Еремин А.В. Исследование быстрорелаксирующих температурных возбуждений, вызываемых сверхкороткими импульсами лазерного излучения. *Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2019;8:47–52.
15. Еремин А.В. Об одном методе математического моделирования процесса переноса теплоты в твердых телах. *Перспективы науки*. 2019;7(118):117–119.
16. Формалев В.Ф. *Уравнения математической физики*. М.: URSS; 2021. 648 с. ISBN 978-5-9710-8380-1
11. Kudinov V.A., Kudinov I.V. One method of reception of the exact analytical decision of the hyperbolic equation of heat conductivity on the basis of use of orthogonal methods. *High Temp.* 2012;50(1):112–119. <https://doi.org/10.1134/S0018151X12010105> [Original Russian Text: Kudinov V.A., Kudinov I.V. One method of reception of the exact analytical decision of the hyperbolic equation of heat conductivity on the basis of use of orthogonal methods. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2012;50(1):118–126 (in Russ.).]
12. Kudinov V.A., Kudinov I.V. Studying heat conduction taking into account the finite rate of heat propagation. *High Temp.* 2013;51(2):268–276. <https://doi.org/10.1134/S0018151X1204013X> [Original Russian Text: Kudinov V.A., Kudinov I.V. Studying heat conduction taking into account the finite rate of heat propagation. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2013;51(2):301–310 (in Russ.).]
13. Kirsanov Yu.A. *Modelirovanie teplofizicheskikh protsessov (Modeling of Thermophysical Processes)*. St. Petersburg: Politekhnik; 2022. 230 p. (in Russ.).
14. Eremin A.V. Research on fast relaxing temperature excitations caused by ultrashort laser pulses. *Sovremennaya nauka: Aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern Science: Actual Problems of Theory & Practice. Ser.: Natural & Technical Sciences*. 2019;8:47–52 (in Russ.).
15. Eremin A.V. About one method of heat transfer process in solid bodies mathematical modeling. *Perspektivy nauki = Science Prospects*. 2019;7(118):117–119 (in Russ.).
16. Formalev V.F. *Uravneniya matematicheskoi fiziki (Equations of Mathematical Physics)*. Moscow: URSS; 2021. 648 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-8380-1

Об авторе

Карташов Эдуард Михайлович, д.ф.-м.н., Заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Почетный работник науки и техники РФ, Почетный профессор МИТХТ им. М.В. Ломоносова, Лауреат Золотой медали АН Беларуси по теплофизике, профессор, кафедра высшей и прикладной математики Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: professor.kartashov@gmail.com. Scopus Author ID 7004134344, ResearcherID Q-9572-2016, <https://orcid.org/0000-0002-7808-4246>

About the author

Eduard M. Kartashov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Honored Scientist of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Honorary Professor of the Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technology, Laureate of the Golden Medal of the Academy of Sciences of Belarus in Thermophysics, Professor, Department of Higher and Applied Mathematics, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia). E-mail: professor.kartashov@gmail.com. Scopus Author ID 7004134344, ResearcherID Q-9572-2016, <https://orcid.org/0000-0002-7808-4246>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 30.09.2023 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 14.75.

Тираж 100 экз. Заказ № 95.

Подписку на печатную версию

Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print September 30, 2023.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 14.75.

100 copies. Order No. 95.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

