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 наноэлектроника.
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.rtj-mirea.ru

13(4) 2025

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 наноэлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах
- Управление качеством продукции. Стандартизация
- Мировоззренческие основы технологии и общества

- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
- Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and nondestructive testing
- Modern radio engineering and telecommunication systems
- Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
- Analytical instrument engineering and technology
- Mathematical modeling
- Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems
- Product quality management. Standardization
- Philosophical foundations of technology and society

Russian Technological Journal
2025, том 13, № 4

Russian Technological Journal
2025, Vol. 13, No. 4

https://www.rtj-mirea.ru

https://doi.org/10.32362/2500-316X

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

Russian Technological Journal
2025, том 13, № 4

Дата опубликования 31 июля 2025 г.

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

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

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

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

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

Редакция:

Зав. редакцией	к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор	д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор	А.С. Алексеенко
Технические редакторы	Д.В. Трофимова, С.В. Трофимов

119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Р-108.
Тел.: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

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

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» **79641.**

Russian Technological Journal
2025, Vol. 13, No. 4

Publication date July 31, 2025.

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

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

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

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

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

Editorial staff:

Managing Editor	Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor	Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennady V. Kulikov
Executive Editor	Anna S. Alekseenko
Technical Editor	Darya V. Trofimova, Sergey V. Trofimov

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**.

https://www.rtj-mirea.ru

© МИРЭА – Российский технологический университет, 2025

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич — д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788, rector@mirea.ru

Банис Юрас Йонович — хабилитированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt

Бетелин Владимир Борисович — академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru

Боков Алексей Алексеевич — д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378, abokov@sfu.ca

Вахрушев Сергей Борисович — д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru

Гуляев Юрий Васильевич — академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru

Жуков Дмитрий Олегович — д.т.н., профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru

Кимель Алексей Вольдемарович — к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl

Крамаров Сергей Олегович — д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513, mavoo@yandex.ru

Новиков Дмитрий Александрович — академик РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304, novikov@ipu.ru

Перно Филипп — Dr. Sci. (Electronics), профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr

Романов Михаил Петрович — д.т.н., профессор, научный руководитель Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945, m_romanov@mirea.ru

Савиных Виктор Петрович — академик РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru

Соболевский Андрей Николаевич — д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113, sobolevski@iitp.ru

Сюй Ли Да — академик Европейской академии наук, Российской инженерной академии и Инженерной академии Армении, Dr. Sci. (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115, lxu@odu.edu

Харин Юрий Семенович — академик Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546, kharin@bsu.by

Чаплыгин Юрий Александрович — академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru

Шпак Василий Викторович — к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788, rector@mirea.ru

Juras Banys — Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt

Vladimir B. Betelin — Academician at the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru

Alexei A. Bokov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378, abokov@sfu.ca

Sergey B. Vakhrushev — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru

Yury V. Gulyaev — Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Academic Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru

Dmitry O. Zhukov — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru

Alexey V. Kimel — PhD (Phys.–Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl

Sergey O. Kramarov — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513, mavoo@yandex.ru

Dmitry A. Novikov — Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304, novikov@ipu.ru

Philippe Pernod — Dr. Sci. (Electronics), Professor, Dean of Research of Centrale Lille, Villeneuve-d'Ascq, France. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr

Mikhail P. Romanov — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic Supervisor of the Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945, m_romanov@mirea.ru

Viktor P. Savinykh — Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru

Andrei N. Sobolevski — Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director of Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Moscow, Russia. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113, sobolevski@iitp.ru

Li Da Xu — Academician at the European Academy of Sciences, Russian Academy of Engineering (formerly, USSR Academy of Engineering), and Armenian Academy of Engineering, Dr. Sci. (Systems Science), Professor and Eminent Scholar in Information Technology and Decision Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA, the United States of America. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115, lxu@odu.edu

Yury S. Kharin — Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546, kharin@bsu.by

Yuri A. Chaplygin — Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Departments of Nanotechnology and Information Technology of the RAS, President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru

Vasily V. Shpak — Cand. Sci. (Econ.), Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia; Associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

7 *А.Н. Соловьев, Я.В. Кизилова, Е.И. Казаков, С.Н. Корякин*
Комплекс программно-вычислительных средств моделирования терапевтических величин поглощенных доз в задачах лучевой терапии

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

25 *А.С. Красноперова, А.С. Твердохлебов, А.А. Карташов, В.И. Вебер, В.Ю. Куприц*
Исследование эффективности применения моделей нейронных сетей YOLO для распознавания объектов на радиолокационных изображениях

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния

37 *Д.А. Бурдин*
Измерение магнитострикции тензометрическим мостом с переменным возбуждением

47 *Е.Т. Мирзоева, А.В. Кудрявцев*
Первопринципный расчет электронной структуры монослоя CeI_3

Аналитическое приборостроение и технологии

55 *М.Н. Полисмакова, Д.А. Сандуляк, А.С. Харин, Д.А. Головченко, А.А. Сандуляк, А.В. Сандуляк, Н.М. Baskonus*
Расширение возможностей новых магнитометров пондеромоторного и магнитно-реологического типов с полюсами-полусферами

69 *А.С. Кривогузова, С.Н. Ткаченко, А.А. Шпилевой*
Влияние параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока

Математическое моделирование

78 *С.М. Бекетов, Д.А. Зубкова, А.М. Гинцяк, Ж.В. Бурлуцкая, С.Г. Редько*
Современные методы оптимизации и особенности их применения

95 *Н.Н. Карабутов*
Об идентификации децентрализованных систем

107 *Е.В. Радкевич, М.Е. Ставровский, О.А. Васильева, Н.Н. Яковлев, М.И. Сидоров*
Моделирование детонационного режима, возбуждаемого турбулизацией процесса горения

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

123 *Н.Н. Карпухина, Е.С. Митяков, А.Ю. Пронин*
Промышленные революции: от Индустрии 3.0 к Индустрии 5.0 в контексте российской экономики

135 *В.В. Шпак*
Инвентаризация электроники – фундамент прорыва в лидеры

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

7 *Aleksei N. Solovev, Yana V. Kizilova, Evgeniy I. Kazakov, Sergey N. Koryakin*
Programming and computing suite for simulating the therapeutic absorbed dose in radiotherapy

Modern radio engineering and telecommunication systems

25 *Alena S. Krasnoperova, Alexander S. Tverdokhlebov, Alexey A. Kartashov, Vladislav I. Weber, Vladimir Y. Kuprits*
Efficiency of YOLO neural network models applied for object recognition in radar images

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

37 *Dmitry A. Burdin*
Measurement of magnetostriction using a strain gauge bridge with alternating excitation

47 *Elizaveta T. Mirzoeva, Andrey V. Kudryavtsev*
Ab initio calculations of the electronic structure of CeI_3 monolayer

Analytical instrument engineering and technology

55 *Maria N. Polismakova, Daria A. Sandulyak, Alexey S. Kharin, Daria A. Golovchenko, Anna A. Sandulyak, Alexander V. Sandulyak, Haci M. Baskonus*
Expanding the capabilities of new magnetometers of ponderomotive and magnetic-rheological types with hemispherical poles

69 *Alexandra S. Krivoguzova, Sergey N. Tkachenko, Andrey A. Shpilevoy*
Effect of winding and power supply parameters on the starting characteristics of an upgraded brushless DC motor

Mathematical modeling

78 *Salbek M. Beketov, Daria A. Zubkova, Aleksei M. Gintciak, Zhanna V. Burlutskaya, Sergey G. Redko*
Modern optimization methods and their application features

95 *Nikolay N. Karabutov*
On the identification of decentralized systems

107 *Evgeny V. Radkevich, Mikhail E. Stavrovsky, Olga A. Vasilyeva, Nikolay N. Yakovlev, Mikhail I. Sidorov*
Simulation of the detonation regime excited by combustion process turbulence

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

123 *Natalia N. Karpukhina, Evgeny S. Mityakov, Aleksey Yu. Pronin*
Industrial revolutions: From Industry 3.0 to Industry 5.0 in the context of the Russian economy

135 *Vasily V. Shpak*
Electronics inventory as the foundation of a breakthrough into global leadership

Russian Technological Journal.
2025;13(4):7–24

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

УДК 004.422.8:53.043
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-7-24
EDN WLFGJJ

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Комплекс программно-вычислительных средств моделирования терапевтических величин поглощенных доз в задачах лучевой терапии

А.Н. Соловьев [1, 2, @],
Я.В. Кизилова [1],
Е.И. Казаков [1],
С.Н. Корякин [1, 2]

[1] *Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Калужская область, 249031 Россия*
[2] *Обнинский институт атомной энергетики — филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Обнинск, Калужская область, 249039 Россия*
[@] *Автор для переписки, e-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru*

• **Поступила:** 27.09.2024 • **Доработана:** 06.02.2025 • **Принята к опубликованию:** 20.05.2025

Резюме

Цели. Моделирование поглощенных доз в радиотерапии является ключевым процессом в ходе лечения пациентов, а также выполняется с целью обеспечения гарантий качества терапии и ретроспективных оценок успешности проведенного лечения. С технической точки зрения предъявляемые требования к программному и аппаратному обеспечению весьма строгие для того, чтобы обеспечить успешный процесс принятия решения до, во время или после проведения терапии. Цель статьи – разработка и апробация технологического процесса обеспечения систем планирования лучевой терапии, а также создание расчетных модулей оценок поглощенных доз радиобиологического и терапевтического назначения.

Методы. Специализированное автоматизированное программное обеспечение, разработанное и поддерживаемое для обеспечения многоцелевых расчетов методом Монте-Карло, построено на основе технологий виртуализации для структурированного доступа к оборудованию, технологий передачи данных по разнородным каналам связи, различных физических моделей расчета взаимодействий излучения, которые совмещены в продукты для конечного пользователя.

Результаты. Комплекс позволяет решать широкий круг задач в интересах радиобиологических исследований, проводимых на пучках излучений разного качества, а также служить основой как для построения систем планирования лучевой терапии для действующих и вновь создаваемых установок, так и в интересах оценки отдаленных последствий действия терапевтического излучения.

Выводы. Разработанный комплекс программно-вычислительных средств является мощным инструментом, служащим для дальнейшего создания специализированных многоцелевых сред оценок поглощенных доз,

© А.Н. Соловьев, Я.В. Кизилова, Е.И. Казаков, С.Н. Корякин, 2025

необходимых для терапевтического применения широкого круга радиационных технологий. Комплекс может быть модернизирован под потребности пользователей, а также дорабатываться разработчиками программного обеспечения под собственные нужды.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, моделирование физических величин, поглощенная доза, лучевая терапия, протонная терапия, нейтронная терапия, метод Монте-Карло

Для цитирования: Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Казаков Е.И., Корякин С.Н. Комплекс программно-вычислительных средств моделирования терапевтических величин поглощенных доз в задачах лучевой терапии. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):7–24. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-7-24, https://www.elibrary.ru/WLFGJJ

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Programming and computing suite for simulating the therapeutic absorbed dose in radiotherapy

Aleksei N. Solovev [1, 2, @], Yana V. Kizilova [1], Evgeniy I. Kazakov [1], Sergey N. Koryakin [1, 2]

[1] *A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Kaluga oblast, Obninsk, 249031 Russia*
[2] *Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Kaluga oblast, Obninsk, 249039 Russia*
[@] *Corresponding author, e-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru*

• **Submitted:** 27.09.2024 • **Revised:** 06.02.2025 • **Accepted:** 20.05.2025

Abstract

Objectives. Simulation of the absorbed dose is an essential part of radiation therapeutic treatment, performed not only for its correct evaluation, but also for assuring quality control and retrospective evaluation of the provided cure. From the technological point of view, strict requirements are imposed on the software applications and hardware units that support a successful decision-making process before, during, or after the provided therapy. This paper reports an R&D project aimed at technological support of radiation treatment planning systems coupled with the creation of a mathematical framework for estimating the absorbed dose for radiobiological and medical therapeutic purposes.

Methods. A dedicated automated software suite for executing multipurpose Monte Carlo simulations was developed. The suite is backed up with virtualization techniques for structured hardware access, data intercommunication using diverse connection channels, various physical interaction engines, and coupled end-user software.

Results. The developed suite facilitates a wide array of tasks in the realm of radiobiological research conducted using radiation beams of different qualities. Additionally, it serves as a foundation toolkit for developing radiotherapy planning systems for both existing and new therapeutic facilities, as well as software packages for estimation of the long-term effects of the conducted radiotherapy.

Conclusions. The developed programming and computing suite is an effective tool for organizing a specialized environment for multipurpose estimation of the absorbed dose of radiation for therapeutic applications of radiation beams of different qualities. The suite can be updated and extended upon end-user needs and modified by skilled software developers for specific purposes.

Keywords: programming and computing suite, physics-based simulation, absorbed dose, radiotherapy, proton therapy, neutron therapy, Monte Carlo method

For citation: Solovev A.N., Kizilova Ya.V., Kazakov E.I., Koryakin S.N. Programming and computing suite for simulating the therapeutic absorbed dose in radiotherapy. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):7–24. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-7-24, https://www.elibrary.ru/WLFGJJ

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Расчетно-математические задачи, которые необходимо решать в рамках процедуры лучевой терапии, можно условно разделить на 2 основных класса. К задачам 1-го класса относят задачи предлучевой подготовки пациента, когда необходимо в предельно короткое допустимое для принятия врачебного решения время обеспечить с необходимой точностью выполнение модельных терапевтических критериев эффективности и безопасности лечения пациента. Итогом решения задач 1-го класса является формирование ответа в терминах системы поддержки принятия врачебных решений о допустимости проведения курса терапии.

Задачи 2-го класса, напротив, не привязаны непосредственно напрямую к принятию решения о назначении терапии конкретному лицу, а направлены на верификацию и подтверждение характеристик ранее назначенного лечения, в т.ч. по критериям формирования ранних и поздних лучевых осложнений, ретроспективный анализ групп пролеченных пациентов с целью формирования прогноза выживаемости и качества выполненного ранее планирования либо с целью формирования альтернативных сценариев оценок успешности терапии.

Системы, решающие задачи 1-го класса, традиционно называют системами планирования лучевой терапии (англ., Treatment Planning System, TPS). К коммерчески доступным на рынке системам относятся *Raystation*[1] от RaysearchLabs, *Eclipse*[2] от Varian (Германия), *Pinnacle*[3] от Philips (Нидерланды), *One*[4] в вариантах *XiO* и *Monaco* от Elekta (Швеция); на российском рынке также представлены комплекс *PLANB*[5] от RT-7, *Амфора*[6] от ООО «Медико-физический центр». Зачастую система планирования не является единым универсальным продуктом, а входит как элемент конечной физической установки, как, например, система планирования для комплекса нейтронной терапии на базе генератора НГ-24МТ (генератор нейтронов на основе реакции D(T, ^{4}He)n, энергия нейтронов 14 МэВ) [1] и для отечественного ускорителя 6 МэВ (ускоритель электронов до энергии 6 МэВ медицинского назначения с тормозной вольфрамовой мишенью) [2], *XiDose* для центров углеродной терапии в Японии [3], *TRiP98* для центров углеродной терапии в Дармштадте и Гейдельберге, Германия [4], проекты использования *NCTPlan* Массачусетского института для нейтронозахватной терапии на реакторах Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» [5]. К специализированным средствам относят также системы *NeuCure* [6] и *NeuMANTA* [7], используемые в задачах нейтронозахватной терапии.

Особенностью систем планирования в классической схеме лучевой терапии является именно характеристика времени получения решения задачи дозиметрического планирования. Задачи же, связанные с оценкой долговременных (относительно курса терапии) последствий лечения, и дозиметрические особенности формирования дозы обычно моделируют с использованием более традиционных средств и методов Монте-Карло моделирования взаимодействий излучения с веществом, куда относят, например, *Geant4* [8], *FLUKA* [9], *MCNP* [10], *PHITS* [11], *SHIELD-HIT* [12]. Все эти средства моделирования валидируются мировым сообществом и предназначены для достоверно точного предсказания, в частности, величин поглощенных доз в целевых средах.

[1] https://www.raysearchlabs.com/raystation/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[2] https://www.varian.com/products/radiotherapy/treatment-planning/eclipse. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[3] https://www.usa.philips.com/healthcare/solutions/radiation-oncology/radiation-treatment-planning. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[4] https://www.elekta.com/products/oncology-informatics/elekta-one/treatment-applications/planning/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[5] https://rt-7.ru/planb. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[6] http://mphc.ru/catalog/amphora/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

Результаты подобных моделей используются далее в клинической и исследовательской практике, где до сих пор остаются нерешенные вопросы [13], связанные, в первую очередь, с пониманием отклика биологических систем разноуровневой организации, начиная от сложных механизмов действия радиации на клеточные культуры [14–17]. Также их применяют в *in vivo* исследованиях [18, 19], оценках безопасности полигонов радиоактивных отходов [20] и космических перелетах [21, 22], для верификации нагрузок на персонал комплексов лучевой терапии [23].

В настоящей статье приведены характеристики и особенности программно-технологической реализации универсального комплекса вычислительных средств, способного решать задачи обоих вышеописанных классов, а также обладающего широкими возможностями по взаимозаменяемости компонент и их модернизации. С использованием компонент комплекса возможно решать задачи предлучевой подготовки радиобиологических исследований, выполнять процедуры дозиметрического планирования лучевой терапии, ретроспективно проводить оценки биологического действия на основе эквивалентного прецизионного расчета поглощенных доз, а также строить прогностические модели описания повреждающего действия излучения и представлять полученные результаты в соответствии с международными формализмами МАГАТЭ[7] и МКРЕ[8] для конкретных видов излучений (ионное излучение ICRU 93[9], нейтронозахватная терапия CRCP/BOR/002[10]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При работе программно-аппаратного комплекса, допускающего функционирование в автоматизированном режиме, необходимо обеспечить интегративную связность отдельных компонент, а также возможность их управляемого запуска в своей очередности в зависимости от наличия соответствующих входных данных. На рис. 1 показана общая архитектура комплекса и отображены связи между компонентами, а также роли и места отдельных пользователей. Сплошными линиями показаны принадлежности модулей, пунктирными линиями показаны информационные связи.

Основным требованием при разработке комплекса была возможность быстрой развертки его компонент на новой аппаратной платформе, территориально обособленной от иных компонент комплекса. При этом первоначальное построение программных средств, входящих в комплекс, и его внедрение были проведены на единой аппаратной базе, представленной одиночным средством высокопроизводительных вычислений, включающем двухпроцессорную систему на базе Intel Xeon Gold E5506 (Intel, США) с объемом подключенной оперативной памяти 380 ГБ, графический процессор NVIDIA Tesla V100 (NVIDIA, США), и систему хранения данных на базе серверных накопителей на жестких магнитных дисках производства Toshiba (Япония). Платформа подключена к локальной вычислительной сети экспериментального сектора МРНЦ им. А.Ф. Цыба[11], построенной на базе коммутаторов MikroTik (Латвия), обеспечивающих пропускную способность на уровне 1 Гбит/с. Внешний канал связи, используемый при апробации программных средств в качестве территориально-разъединенного комплекса, обеспечивал скорость передачи данных на уровне до 70 Мбит/с. Подключение оконечных рабочих мест операторов комплекса осуществлялось как в режиме внутренней сети с полной нагрузкой (1 Гбит/с), так и в режимах искусственно ограниченной типичной сети (100 Мбит/с) и удаленной сети (интернет-канал связи).

АРХИТЕКТУРА УПРАВЛЕНИЯ

Ввиду того, что основным требованием к архитектуре является организация разделяемой работы компонент, а физическое средство для организации серверного взаимодействия было представлено в единственном экземпляре, основным примененным технологическим приемом стала организация виртуализации. Для этого в качестве базовой операционной системы сервера использована Proxmox[12]. Этот дистрибутив основан на Debian GNU/Linux, разрабатывается и поддерживается Австрийским интернет-сообществом (Internet Foundation Austria). В начале разработки системы использовалась версия Proxmox VE 6, позднее была успешно проведена миграция на Proxmox VE 7.1-11, в настоящее время доступна стабильная версия Proxmox VE 8.2.

[7] Международное агентство по атомной энергии. https://www.iaea.org/ru. Дата обращения 19.05.2025. [International Atomic Energy Agency. https://www.iaea.org. Accessed May 19, 2025.]

[8] Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям. https://www.icru.org/. Дата обращения 19.05.2025. [International Commission on Radiation Protection. https://icrp.org/. Accessed May 19, 2025.]

[9] ICRU Report 93: Prescribing, Recording, and Reporting Light Ion Beam Therapy. https://www.icru.org/report/icru-report-93-prescribing-recording-and-reporting-light-ion-beam-therapy/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[10] IAEA. Advanced in Boron Neutron Capture Therapy. Non-serial Publication. https://www.iaea.org/publications/15339/advances-in-boron-neutron-capture-therapy. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[11] Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба. https://new.nmicr.ru/about/. Дата обращения 19.05.2025. [A. Tsyb Medical Radiological Research Center. https://new.nmicr.ru/en/mrrc/. Accessed May 19, 2025.].

[12] https://www.proxmox.com/en/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

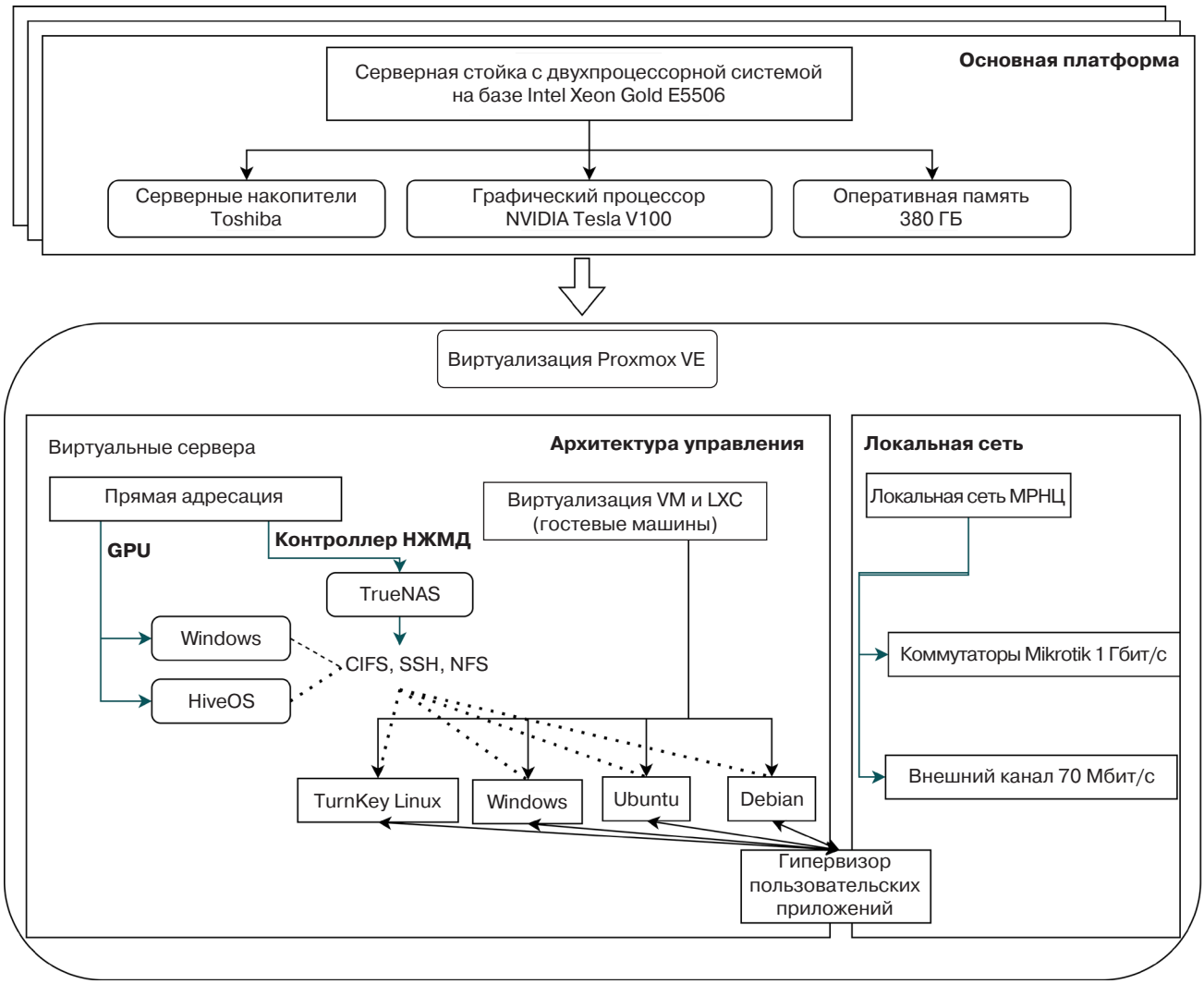


Рис. 1. Структурная схема программно-вычислительного комплекса:
GPU (graphics processing unit) – графический процессор, НЖМД – накопители на жестких магнитных дисках.
VM – виртуальная машина, LXC – упрощенная схема контейнеризации Linux

Быстрое хранилище данных системы (SSD-диск) разбито на основной сектор (для установки базовой среды Proxmox) и сектора управляемых серверов приложений. Каждое хранилище в данном случае представляет собой отдельное место на диске с возможностью расширения адресного пространства, в т.ч. при физической миграции носителя данных. Все долговременное хранилище организовано путем адресации полного пула дискового пространства физических устройств системы в созданный контейнер Proxmox, управляемый операционной системой TrueNAS[13]. На базе TrueNAS организован программный RAID-массив уровня 5 с доступом по протоколам CIFS[14], SSH[15] и NFS[16]. Поддержка iSCSI[17] при реализации [1] используется только в составе оконечного оборудования автоматизированных рабочих мест. Таким образом, предполагается, что все далее создаваемые компоненты серверной архитектуры используют в меньшей мере свое адресное пространство быстрого хранилища и обладают общим конфигурируемым доступом к общему файловому пространству долговременного хранилища.

Выделение оперативной памяти для каждого из последующих управляемых серверов при виртуализации Proxmox осуществляется на этапе создания сервера виртуализации, и, в зависимости

[13] http://www.truenas.com/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[14] https://learn.microsoft.com/ru-ru/windows/win32/fileio/microsoft-smb-protocol-and-cifs-protocol-overview (in Russ.). Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May, 19, 2025.

[15] https://www.rfc-editor.org/info/rfc4251. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May, 19, 2025.

[16] https://www.rfc-editor.org/info/rfc3010. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May, 19, 2025.

[17] https://www.rfc-editor.org/info/rfc7143. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May, 19, 2025.

от конкретных параметров сервера, не всегда может быть динамически расширено без пересоздания сервера. В этой связи для каждой из задач, решаемых серверными вычислителями, необходимо понимание реального потребляемого ресурса архитектором системы и системным программистом. Нельзя при этом не отметить, что задача моделирования непосредственного радиационного ответа (например, опухоли), как и моделирование всего курса терапии с последующими вариантами развития событий ответа на лечение, несомненно являются задачами масштабных вычислений. Таким образом, задачей, решаемой человеком при организации уровня управления архитектуры управления, является, в т.ч. и выбор оптимальных параметров использования физических вычислительных средств.

Наконец, в рамках решения задачи управляемого конфигурируемого запуска уже оконечных приложений на отдельных серверах системы было разработано отдельное технологическое решение. Оно представляет собой собственный гипервизор, запускаемый по команде оконечного пользовательского средства, и обеспечивает дальнейший автоматический запуск, управление, контроль, получение и передачу результатов выполнения вычислительных средств на одном целевом сервере. В качестве целевого сервера может выступать любой сервер под управлением операционных систем семейства *nix, подключение и взаимодействие осуществляется по защищенному протоколу SSH, а конфигурация управляемых приложений задается текстовым файлом синтаксиса JSON[18].

АРХИТЕКТУРА СЕРВЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

В разработанном комплексе все серверные вычислительные средства разделены на 2 класса. К 1-му классу относятся системы, развертываемые только в рамках виртуальной среды Proxmox и не требующие физической адресации серверных устройств. В целом, сюда просто относятся отдельные вычислительные узлы для задач, требующих только центральный процессор. Ко 2-му классу относятся системы, которые требуют от администратора сервера виртуализации настраивать физическую адресацию, что, в первую очередь, относится к графическому сопроцессору. Особенностью реализации таких средств является то, что в отдельный момент времени доступ такой системы к адресованной физической сущности является эксклюзивным. Таким образом, например, все расчетные модели и средства, использующие видеокарту, должны либо подключаться к текущему активному серверу, использующему графический процессор, либо ожидать своей очереди на эксклюзивный доступ своего сервера к физическому ресурсу на хост-машине. При реализации компонент системы вне среды виртуализации, например, при наличии раздельных физических машин-вычислителей и машин с графическими картами, подобная задача может быть исключена из рассмотрения.

Этапы развертывания серверных вычислителей построены по классической схеме. В первую очередь, после установки и сборки операционной системы на выделенном узле и установки соответствующих обновлений осуществляется сборка целевого программного обеспечения узла. Для вычислительных узлов, задействованных в описанном комплексе по моделированию воздействий ионизирующих излучений, основным пакетом расчетных программ был *Geant4* [8] разработки ЦЕРН[19] (Швейцария), при этом за время целевого использования комплекса в работе использовались версии, начиная с 4-9.5.0 (2016 г.) по 4-11.2.2 (2024 г.). Одной из особенностей пакета является выделение компонент библиотек сечений в отдельные загружаемые файлы с возможностью, в т.ч. автоматической загрузки на этапе сборки программы. Система сборки *Geant4* полностью построена на базе CMake[20], а версии, начиная с 4-10.0, могут собираться на любой целевой платформе компиляторами gcc, clang и msvc в зависимости от предпочтений разработчика. При этом, в отличие от подавляющего большинства аналогичных Монте-Карло средств, *Geant4* представляет собой не конечный исполняемый файл, а набор библиотек динамической или статической линковки для дальнейшего создания программистом собственного приложения. Впрочем, нельзя не отметить, что существуют именно готовые исполняемые файлы на базе *Geant4*, которыми пользователь уже управляет только путем подачи входных данных, как и в других аналогичных средах. К таким решениям относят *TOPAS*[21], *GATE*[22], *GAMOS*[23]. В таблице представлены характерные времена установки различных

[18] JavaScript Object Notation – текстовый формат обмена данными. https://dx.doi.org/10.17487/RFC4627. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[19] Европейский центр ядерных исследований (от фр. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN). [Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN.]

[20] https://cmake.org/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[21] https://www.topasmc.org/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[22] http://www.opengatecollaboration.org/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

[23] https://fismed.ciemat.es/GAMOS/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

Таблица. Оценка производительности сборки различных версий *Geant4*

Версия *Geant4* (год выпуска *Geant4*)	Распаковка архива, мс	CMake конфигурация, мс	Make		
			1 поток, мс	16 потоков, мс	32 потока, мс
9.6.4 (2016)	1392	6275	1321462	116047	85899
10.0.0 (2016)	1504	7737	1721182	106263	82304
10.3.0 (2016)	1760	5497	3124605	164876	127049
10.4.0 (2017)	1636	2911	3538766	179560	138334
10.5.0 (2018)	1764	1761	2814052	216675	163520
10.7.0 (2020)	1787	6147	3715283	239053	185224
10.7.4 (2022)	1708	3612	3057118	256715	201234
11.0.0 (2021)	1599	9720	6450537	277412	211570
11.1.0 (2022)	1745	6532	4831937	299245	238212
11.2.0 (2023)	1662	4732	5031802	306279	238548
11.2.2 (2024)	1688	8582	3813355	306803	246890

версий *Geant4* на одном из выделенных серверов, функционирующих в настоящее время. Все замеры выполнены в автоматическом режиме посредством интерпретатора bash и системной *nix утилиты time. Данные представлены в виде одиночного замера календарного (wall time) времени выполнения процедуры сборки.

При реализации расчетных программ для моделирования в рамках комплекса в зависимости от поставленной задачи использовалась та или иная версия программного обеспечения. Так, для решения задачи дозиметрического планирования в составе комплекса нейтронной терапии [1] использовалась стабильная версия 10.6.2, которая далее не обновлялась. Для ряда иных задач, в частности, описанных в [24], использовалась актуальная на тот момент версия 10.3.1. Все рутинное моделирование задач, возникающих в ходе деятельности отдела радиационной биофизики МРНЦ им. А.Ф. Цыба, всегда выполняется на последней стабильной на момент постановки задачи версии. Нельзя не отметить, что обратная совместимость пользовательского кода далеко не всегда гарантируется разработчиками среды *Geant4*, и, в первую очередь, не гарантируется совместимость с новыми версиями компиляторов. Особенно это актуально в случае явно стоящих требований по кроссплатформенности конечных приложений.

При этом стоит отметить, что использование конкретного средства математического моделирования действия излучения не является ограничивающим фактором. Ранее [25] было показано, что разнородные средства моделирования могут быть использованы как в решении задачи планирования лучевой терапии, так и интегрироваться под общую архитектуру управляющих команд. Так, в настоящей работе запуск функционала, выполняемого на видеокартах, может осуществляться как напрямую из приложения среды *Geant4*, так и отдельно на обособленной виртуальной машине с использованием вывода приложения *Geant4* в качестве собственных входных данных, передаваемых по ранее описанным каналам связи.

АРХИТЕКТУРА СТАНДАРТИЗОВАННОГО ФОРМАТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В представленном комплексе основным форматом конфигурационных файлов является JSON. Этот удобный формат позволяет осуществлять кроссплатформенную передачу пар «ключ-значение», при этом в качестве значений могут выступать как отдельные типы данных, так и списки, и словари значений. Однако ввиду специфики пользовательских данных, которые традиционно в подобных системах представляются в отраслевом формате DICOM[24], внутренний формат обмена данных в приложениях должен эффективно поддерживать передачу бинарных данных. Таким образом, при реализации работ комплекса было принято решение о внедрении отдельного формата хранения пользовательских промежуточных данных. В качестве основного формата для подобных задач

[24] Digital Imaging and Communications in Medicine – медицинский отраслевой стандарт создания, хранения, передачи и визуализации цифровых медицинских изображений и документов обследованных пациентов. [Digital Imaging and Communications in Medicine is a medical industry standard for creating, storing, transmitting, and visualizing digital medical images and documents of examined patients.]

было решено использовать описание передачи сообщений protobuf[25] от компании Google[26]. После чего были написаны универсальные средства преобразования томографических снимков и ассоциированных контуров [26], фазовых пространств для средств Монте-Карло моделирования общего назначения [27] и сопутствующие выходные форматы. Формат и сами сообщения полностью переносимы между любыми операционными системами, а средства записи и чтения сообщений реализованы для большого количества языков программирования. Единственным ограничением использованного решения является тот факт, что максимальный размер сообщения не может быть более 2.14 Гб в виду адресации бинарного файла в области 32-разрядной памяти. Подобные целевые файлы могут возникать, например, при работе с томографическими изображениями с количеством пикселей 1024 × 1024 и числом срезов больше 200 и одновременно с ассоциированным числом контуров более 32. Для решения этой задачи реализован резервный формат на основе библиотек сериализации в составе Boost[27], однако недостатком такого решения является тот факт, что конечные целевые файлы могут быть непереносимы между операционными системами Linux и Windows.

АРХИТЕКТУРА ОКОНЕЧНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ СРЕДСТВ

В отличие от серверных средств обеспечения расчетов, которые целесообразно разворачивать только на базе операционных систем семейства Linux или BSD, требования, формируемые к оконечным рабочим станциям и клиентским машинам, могут быть менее строгими. В целом, можно сказать, что должна обеспечиваться развертка на любой системе, включая операционные системы Windows, Linux и macOS. Также любая пользовательская среда оконечного оборудования должна быть легко модернизируема. Таким образом, для работ по созданию конечных пользовательских интерфейсов было принято решение использовать язык программирования Python[28], а конечные исполняемые файлы собирать для конкретной операционной системы целевого оконечного рабочего места с использованием общедоступных средств сборки исполняемых файлов (например, pyinstaller[29]). При этом отдельные модули конечного программного средства, который имеют свои обособленные входные и выходные данные, реализуются в виде готовых исполняемых файлов, а интегративный доступ обеспечивается средствами файловой системы конечной среды и сетевой файловой системы, связанной серверами по вышеописанной схеме. К отдельным примерам такого подхода можно отнести специфические модули для стадии предлучевой подготовки [28], внешнюю систему оптимизации полей в режиме трехмерной конформной лучевой терапии [29].

На рис. 2 приведена архитектура использования оконечных пользовательских средств в составе рассматриваемого комплекса при его реализации в рамках задач комплексов нейтронной терапии (вариант 1), перспективных задач планирования (вариант 2) и смежных задач интеграции (вариант 3). Клиентское приложение на языке C# может вызывать отдельные модули языка Python и исполняемые файлы дополнительных приложений (*NGPlan.Visual.Client* и *ROReview*), а также имеет интерфейсы обмена со сторонними сервисами и отслеживания хода выполнения серверных задач. В рамках обеспечения потоков данных на сервере реализованы 3 варианта выполнения Монте-Карло расчетов, основные технологические компоненты которых представлены в своей очередности вызова. На рис. 3 приведен ряд скриншотов, иллюстрирующих внешний вид программных продуктов.

АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСА В НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Первичная апробация технологической связности компонент проведена в рамках смежных работ по оценке радиационной стойкости изделий к воздействию тяжелых ионов [30]. В процессе выполнения моделирования, служащего обоснованием для последующих оценок величин линейных потерь энергии различных ионов через рассеиватели и атмосферу низкой (10 тор) плотности, использовался расчетный сервер, развернутый согласно описанию, приведенному ранее, а также автоматизированный анализ результатов, получаемых в виде гистограмм в пакете *ROOT* [31] разработки ЦЕРН. При этом проверялись механизмы коммуникации между расчетным сервером с *Geant4* и типовыми клиентами в виде проводника файловой системы Windows и клиентского приложения root.

Одним из основных приложений программного обеспечения комплекса являются всесторонние оценки величин биологической эффективности излучения. Один из первых результатов, относящихся к медицинскому применению комплекса, описан в работе [32], где компоненты комплекса, включая графический сопроцессор, в автоматизированном

[25] https://protobuf.dev/reference/protobuf/edition-2023-spec/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.
[26] https://about.google/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.
[27] https://www.boost.org/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.
[28] https://python.org/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.
[29] https://pyinstaller.org/. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

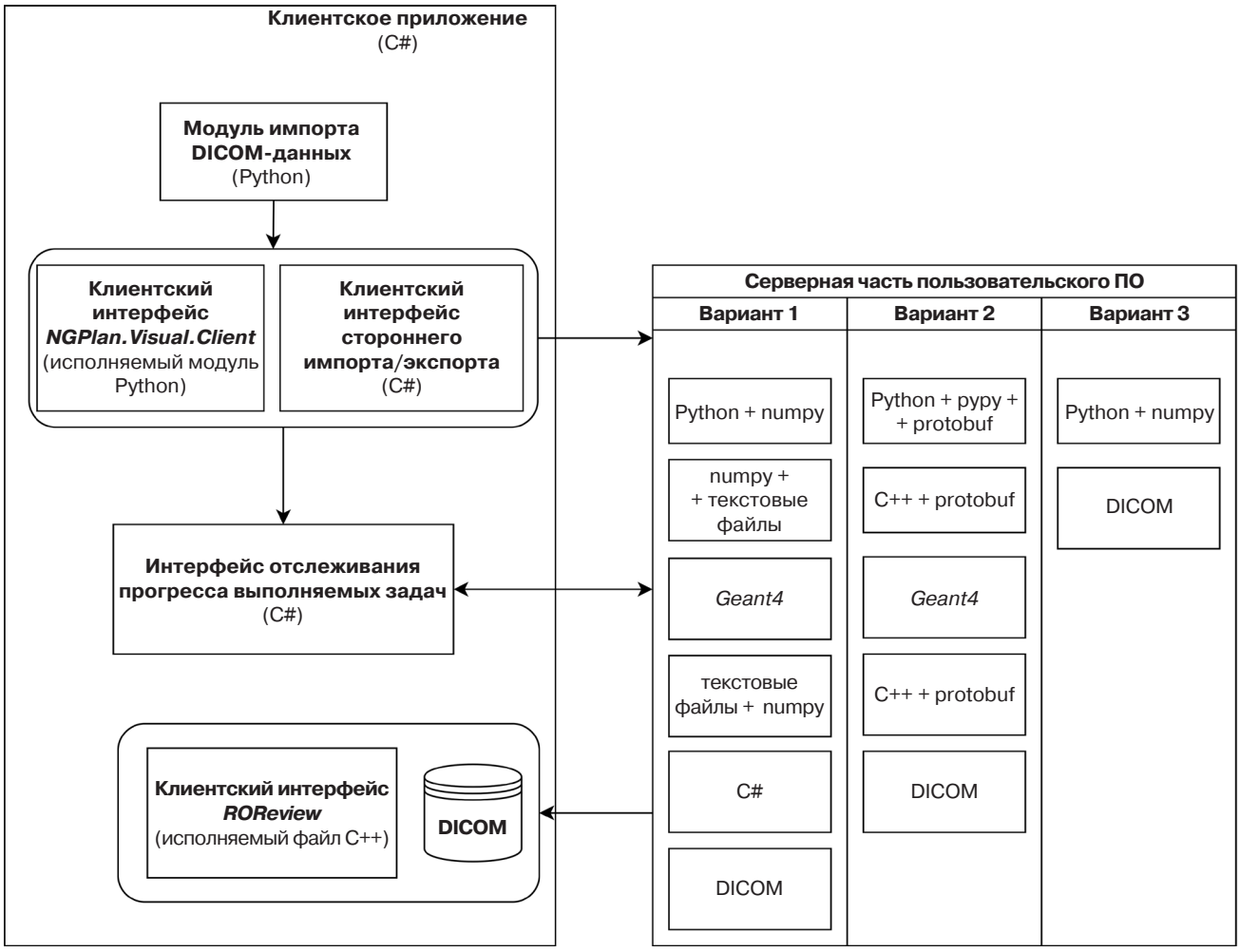
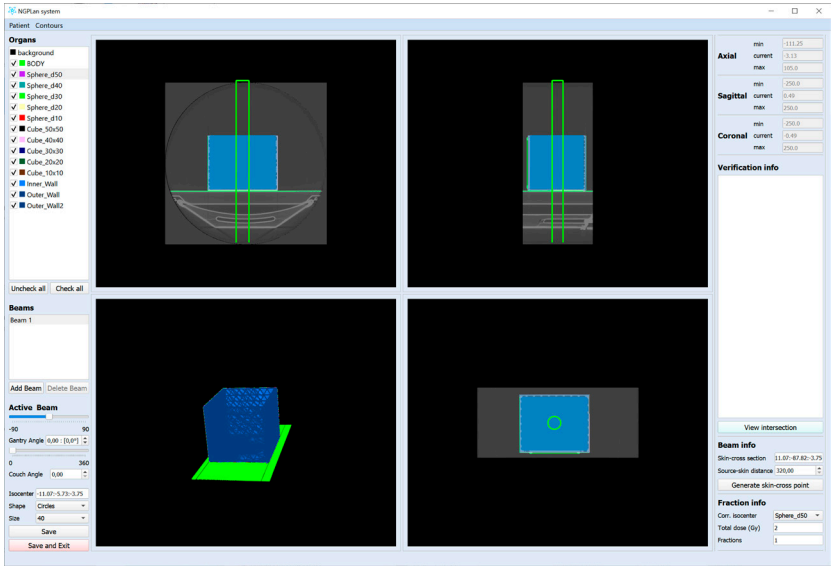


Рис. 2. Принципиальная схема организации оконечных пользовательских приложений

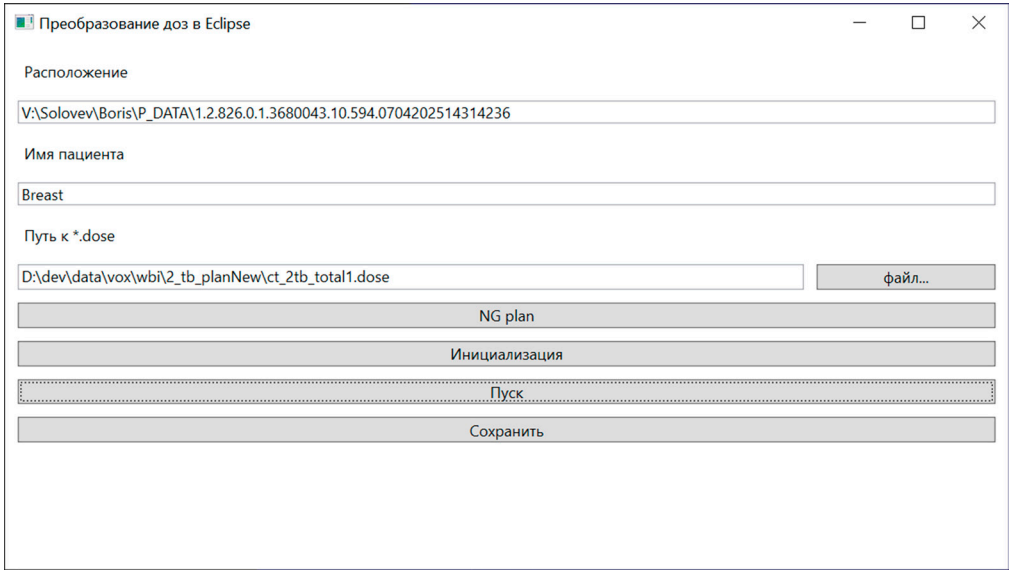
режиме применялись для проведения ретроспективных оценок вклада в биологическую дозу протонной компоненты при облучении быстрыми нейтронами. Похожий пример[30] использования, но уже с целью оценки относительной биологической эффективности (ОБЭ) протонного излучения в сравнении с традиционным в клинической медицине значением ОБЭ 1.1, также был построен на базе представленного комплекса. При построении подобных моделей использовались преобразования чисел Хаунсфилда исходных томограмм на базе оптимизированной модели плотностей материалов [33], однако все операции в рамках представленного комплекса являются конфигурируемыми. Ведутся работы по созданию эргономичного пользовательского интерфейса для удобного ввода данных на стадии ввода в эксплуатацию систем планирования, реализованных или предназначенных к реализации в составе описанного комплекса.

Результаты натурной апробации математических моделей оптимизации выгрузки модифицированного пика Брэгга для протонов в форме файла-задания для ускорителя комплекса протонной терапии «Прометеус» (г. Обнинск, Россия) представлены в работе [34]. В рамках выполнения этого исследования на базе вышеописанных подходов к математическому моделированию действия протонного излучения осуществлялось формирование управляющих команд, которые затем передавались в управляющую систему ускорителя [35]. Аналогичная задача создания управляющих команд решалась в работе [36] по выявлению морфологических изменений в клетках опухоли после имплантации в животное-опухоленоситель. В целом подобный подход к автоматизации радиобиологических исследований показывает свою эффективность и позволяет существенно сократить время подготовки к эксперименту путем унификации типовых решений.

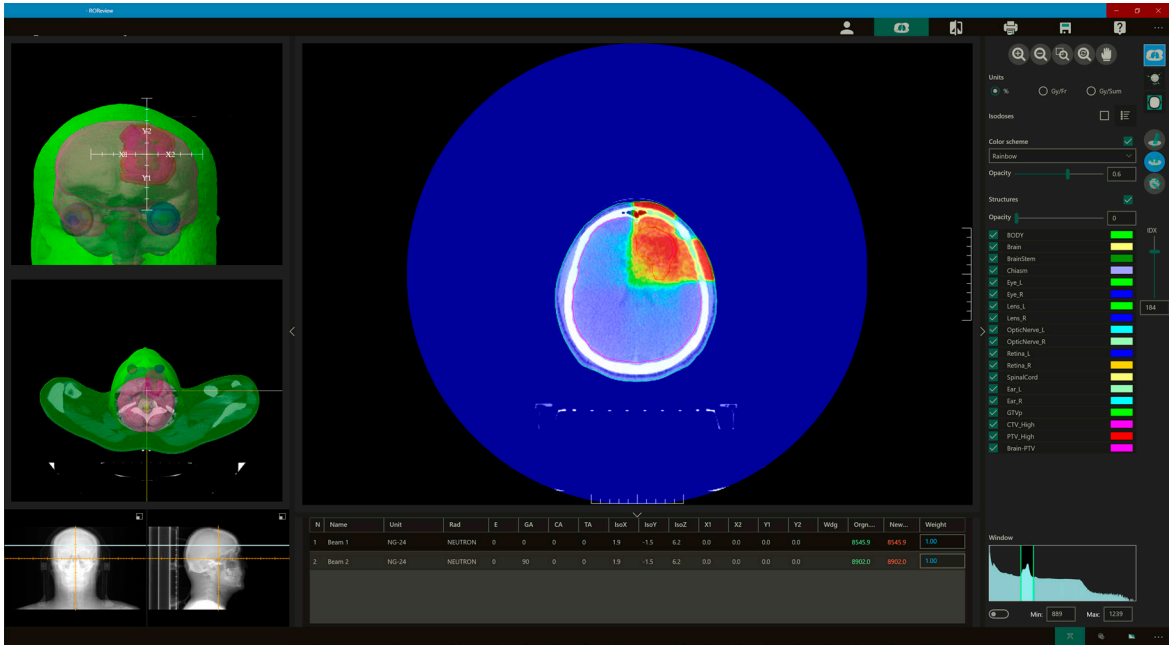
[30] Смык Д.И. *Протонная терапия при повторном облучении рецидивных опухолей органов головы и шеи*. Дис. … канд. мед. наук. https://new.nmicr.ru/wp-content/uploads/2024/05/dissertacija-smyk.pdf. [Smyk D.I. *Proton therapy in re-irradiation of recurrent tumors of head and neck organs*. Thesis for a Candidate Degree in Medical Sciences. https://new.nmicr.ru/wp-content/uploads/2024/05/dissertacija-smyk.pdf (in Russ.).]



(а)



(б)



(в)

Рис. 3. Внешний вид отдельных программных средств комплекса:
(а) интерфейс *NGPlan.Visual.Client* для работы с расположением облучателя на стадии предлучевой подготовки пациента,
(б) интерфейс утилиты стороннего импорта/экспорта,
(в) интерфейс программного пакета *ROReview* в режиме отображения дозного поля

Наконец, наиболее полно программно-вычислительный комплекс зарекомендовал себя в задачах экспериментальной деятельности на временном радиобиологическом стенде [37], а позднее – в рамках центра коллективного пользования ускорительного комплекса У-70 (ЦКП «РБС У-70»[31]). При работе над первичной оценкой биологической эффективности пучка ионов углерода [38] использовались данные о среднедозной величине линейной передачи энергии, рассчитанные в подробной модели облучаемого объекта для различных экспериментальных условий. Подходы по созданию средств пассивной модификации углеродного излучения, описанные ранее [39], реализованные позднее как программный пакет в составе описываемого комплекса и непосредственно изготовленные гребенчатые фильтры применялись другими авторами [40, 41]. Работы радиобиологического стенда комплекса У-70 в целом описаны, например, в [42], подходы к формированию каналов медико-терапевтического назначения – в [43].

ОБСУЖДЕНИЕ

К одному из важных аспектов использования систем планирования лучевой терапии в клинической практике относятся организация трансфера данных между различными системами и связность программных компонент внутри системы. Так, в [44] было показано, что даже в условиях передачи одного и того же набора DICOM-данных разные системы планирования (в рассматриваемой статье – *MRIdian TPS* и *Eclipse*) значимо (до 16%) отличаются в интерпретации объемов структур, а, как следствие, и в интерпретации дозо-объемных показателей. При этом с учетом обилия систем как представленных для широкого потребителя на рынке, так и собственных (англ., in-house) систем отдельных клиник [45–49], остро встает вопрос в обеспечении связности и эквивалентности докладываемых клинических результатов. Как показывает клиническая практика, даже в одной и той же клинике для одного и того же ускорителя или лечебной кабины могут применяться две [50] и более системы планирования, а решение о назначении терапии происходит после анализа лечащим врачом-радиотерапевтом или врачебным консилиумом всех альтернативных предлагаемых сценариев.

Основным направлением развития расчетных систем, обеспечивающих решение задач моделирования поглощенных доз в лучевой терапии, является многократное увеличение производительности расчетов с сохранением при этом точности на уровне прецизионных Монте-Карло систем. Именно в связи с этим все большее развитие приобретают расчеты с использованием графических процессоров. В задачах моделирования радиобиологического отклика на уровне ДНК, клеточном и межклеточном уровнях организации материи, включая радиолиз воды, уже давно используют графические ускорители [51, 52]. В то же время моделирование в интересах лучевой терапии начало развиваться только в последние годы. Так, в [53] предлагают разработку *goCMC*, в т.ч. с поддержкой вычислительного модуля для терапии ионами углерода, которые позволяют получить время расчета одного плана в пределах 40 мин. При этом производители позволяют интегрировать свой подход в коммерческую систему планирования *Eclipse*. Похожая задача, но применительно к интраоперационной высокомощностной терапии электронами, решается в [54], при этом скорость расчета на видеокарте составляет до 10 с. Более ранние решения, например, описанные для протонной терапии в [55], становятся основой экспериментальной валидации применяемых подходов, показывая не только времена на уровне от 3.5 до 11.5 с на пучок против 20 с для решения на базе центрального процессора, но и отличное соответствие измеренным значениям по критериям гамма-индекса (более 95% проходящих точек по критерию 3%/1 мм). Еще одним решением, предложенным для оперативного расчета сканирующих ионных пучков, является система *VQA Plan* [56] производства Hitachi, специально разработанная для ионного центра в г. Осака (Япония). При этом авторы заявляют, что именно расчет биологической составляющей дозы углеродных пучков является отличительной чертой представленной системы в отличии от упрощенных аналогов в *XiDose* и *RayStation*. Реализация быстрых вычислительных алгоритмов для подобных систем на базе графических процессоров представляется сложным вызовом, который необходимо планомерно решать с привлечением широкого круга специалистов [57, 58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные подходы к лучевой терапии требуют не только выполнения критериев качества медицинских услуг, но и обеспечения безопасности лечения. Организация эффективной программно-вычислительной среды широкого назначения поможет решить, в т.ч. проблемы интеграции разнородных медицинских специалистов, разработчиков программного обеспечения, радиационных технологов. В рамках перспективных направлений развития могут быть рассмотрены механизмы внедрения

[31] http://ihep.ru/pages/main/6580/8769/index.shtml (in Russ.). Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

технологий квантовых вычислений и искусственного интеллекта. Ведутся работы по массовому внедрению разработанных технологий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Шершневу Р.В. и Степановой У.А. за вклад в развитие комплекса в период работы в лаборатории; исполняющему обязанности заведующего лабораторией разработки и эксплуатации облучающей техники Сабурову В.О. и системному администратору Печенину А.А. за помощь в организации технологического процесса; дирекции МРНЦ им. А.Ф. Цыба в лице директора Иванова С.А. за конструктивный подход к реализации медицинских задач; дирекции НМИЦ радиологии в лице заместителя директора по науке Шегая П.В. и генерального директора Каприна А.Д. за обширные дискуссии по тематике проблемы и за ее пределами.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank R.V. Shershnev and U.A. Stepanova for their contribution to the development of the suite during their work in the Laboratory; V.O. Saburov, Acting Head of the Laboratory of the Development and Operation of Irradiation equipment, and A.A. Pechenin, System Administrator, for their help in organizing the technological process; the Directorate of the A. Tsyb MRRC represented by Director S.A. Ivanov for the constructive approach to the implementation of medical tasks; the Directorate of NMRRC Radiology represented by Deputy Director for Science P.V. Shegay and General Director A.D. Kaprin for extensive discussions on the subject of the problem and beyond.

Вклад авторов

А.Н. Соловьев – написание черновика рукописи, разработка программного обеспечения, разработка концепции, административное руководство исследовательским проектом, разработка методологии, проведение исследования.

Я.В. Кизилова – визуализация, формальный анализ, курирование данных, разработка программного обеспечения, проведение исследования, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Е.И. Казаков – проведение исследования, предоставление ресурсов, валидация результатов, разработка методологии.

С.Н. Корякин – предоставление ресурсов, научное руководство, валидация результатов, получение финансирования, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Authors' contributions

A.N. Solovev – writing the original draft, software, conceptualization, project administration, methodology, and investigation.

Ya.V. Kizilova – visualization, formal analysis, data curation, software, investigation, writing the review, and editing.

E.I. Kazakov – investigation, resources, validation, and methodology.

S.N. Koryakin – resources, supervision, validation, funding acquisition, writing the review, and editing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мардынский Ю.С., Гулидов И.А., Гордон К.Б., Корякин С.Н., Соловьёв А.Н., Сабуров В.О., Иванов С.А., Каприн А.Д., Лобжанидзе Т.К., Марков Н.В., Железнов И.М., Юрков Д.И., Герасимчук О.А., Пресняков А.Ю., Зверев В.И., Смирнов В.П. Дистанционная нейтронная терапия: первый отечественный медицинский комплекс. *Вестник Российской Академии Наук*. 2024;94(1):80–86. https://doi.org/10.31857/S0869587324010098
2. Rod'ko I.I., Sarychev G.A., Balakirev P.V., et al. Development of a Radiotherapy System Based on 6 MeV Linac and Cone-Beam Computer Tomograph. *At. Energy*. 2019;125(5):333–337. https://doi.org/10.1007/s10512-019-00490-9
3. Inaniwa T., Kanematsu N., Noda K., Kamada T. Treatment planning of intensity modulated composite particle therapy with dose and linear energy transfer optimization. *Phys. Med. Biol.* 2017;62(12):5180–5197. https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa68d7
4. Krämer M. Swift ions in radiotherapy – Treatment planning with TRiP98. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 2009;267(6):989–992. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.02.015
5. Elyutina A.S., Kiger W.S., Portnov A.A. NCTPlan application for neutron capture therapy dosimetric planning at MEPhI nuclear research reactor. *Appl. Radiat. Isot.* 2011;69(12):1888–1891. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.04.018
6. Takeuchi A., Hirose K., Kato R., Komori S., Sato M., Motoyanagi T., Yamazaki Y., Narita Y., Takai Y., Kato T. Evaluation of calculation accuracy and computation time in a commercial treatment planning system for accelerator-based boron neutron capture therapy. *Radiol. Phys. Technol.* 2024;17(4):907–917. https://doi.org/10.1007/s12194-024-00833-7
7. Tenk Y.C., Chen J., Zhong W.B., Lio Y.H. HU-based material conversion for BNCT accurate dose estimation. *Sci. Rep.* 2023;13:15701. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42508-0
8. Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al. Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016;835:186–225. https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125

9. Ahdida C., Bozzato D., Calzolari D., et al. New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Front. Phys.* 2022;9:788253. https://doi.org/10.3389/fphy.2021.788253
10. Rising M.E., Armstrong J.C., Bolding S.R., et al. MCNP® Code V.6.3.0 Release Notes. *Tech. Rep. LA-UR-22-33103, Rev. 1.* Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA. 2023. 55 p. URL: CoverSheet
11. Sato T., Iwamoto Y., Hashimoto S., et al. Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33. *J. Nuclear Sci. Technol.* 2023;61(1):127–135. https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275736
12. Bassler N., Hansen D.C., Lühr A., Thomsen B., Petersen J.B., Sobolevsky N. SHIELD-HIT12A – a Monte Carlo particle transport program for ion therapy research. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014;489:012004. https://doi.org/10.1088/1742-6596/489/1/012004
13. Muraro S., Battistoni G., Kraan A.C. Challenges in Monte Carlo Simulations as Clinical and Research Tool in Particle Therapy: A Review. *Front. Phys.* 2020;8:567800. https://doi.org/10.3389/fphy.2020.567800
14. Petringa G., Romano F., Manti L., et al. Radiobiological quantities in proton-therapy: Estimation and validation using Geant4-based Monte Carlo simulations. *Phys. Med*. 2019;58:72–80. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.01.018
15. Troshina M.V., Koryakina E.V., Potetnya V.I., Koryakin S.N., Pikalov V.A., Antipov Yu.M. Induction of chromosome aberrations in B14-150 cells following carbon ions irradiation at low doses. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1701:012029. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1701/1/012029
16. Kyriakou I., Sakata D., Tran H.N., et al. Review of the Geant4-DNA simulation toolkit for radiobiological applications at the cellular and DNA level. *Cancers.* 2022;14(1):35. https://doi.org/10.3390/cancers14010035
17. Chatzipapas K., Dordevic M., Zivkovic S., et al. Geant4-DNA simulation of human cancer cells irradiation with helium ion beams. *Phys. Med*. 20233;112:102613. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102613
18. Pisciotta P., Cammarata F.P., Stefano A., et al. Monte Carlo GEANT4-based application for *in vivo* RBE study using small animals at LNS-INFN preclinical hadrontherapy facility. *Phys. Med*. 2018;54:173–178. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.07.003
19. Taha E., Djouider F., Banoqitah E. Monte Carlo simulations for dose enhancement in cancer treatment using bismuth oxide nanoparticles implanted in brain soft tissue. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med*. 2018;41:363–370. https://doi.org/10.1007/s13246-018-0633-z
20. Cadini F., De Sanctis J., Girotti T., Zio E., Luce A., Taglioni A. Monte Carlo-based assessment of the safety performance of a radioactive waste repository. *Reliability Engineering & System Safety* (*RESS*). 2010;95(8):859–865. https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.04.002
21. Geng C., Tang X., Gong C., Guan F., Johns J., Shu D., Chen D. A Monte Carlo-based radiation safety assessment for astronauts in an environment with confined magnetic field shielding. *J. Radiol. Prot.* 2015;35(4):777. https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/4/777
22. Archer J.W., Large M.J., Bolst D., et al. A multiscale nanodosimetric study of GCR protons and alpha particles in the organs of astronauts on the lunar surface *Rad. Phys. Chem.* 2025;229:112448. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112448
23. Чернуха А.Е., Сабуров В.О., Адарова А.И., Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Корякин С.Н. Трехмерные модели и дополнение геометрии для оценки доз в лучевой кабине нейтронной терапии на базе генератора НГ-24МТ. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2022;3:158–167. https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.14
24. Koryakin S., Isaeva E., Beketov E., Solovev A., Ulyanenko L., Fedorov V., Lityaev V., Ulyanenko S. The photon capture therapy model for *in vivo* and *in vitro* studies using Au nanocomposites with the hyaluronic acid based compounds. *RAD Journal.* 2017;2(2):86–89. http://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.019
25. Solovyev A.N., Fedorov V.V., Kharlov V.I., Stepanova U.A. Comparative analysis of MCNPX and GEANT4 codes for fast-neutron radiation treatment planning. *Nuclear Energy Technol.* 2015;1(1):14–19. https://doi.org/10.1016/j.nucet.2015.11.004
26. Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Корякин С.Н. *Программное средство преобразования медицинских изображений отраслевого стандарта DICOM в форматы оперативного доступа*: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2023685423 РФ. Номер заявки 2023683925; заявл. 13.11.2023; опубл. 27.11.2023. Бюл. № 12. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56012725.
27. Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Чернуха А.Е., Мерзликин Г.В., Корякин С.Н. *Программное средство универсального преобразования фазовых пространств в форматы оперативного доступа:* программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2024660249 РФ. Номер заявки 2024618897; заявл. 24.04.2024; опубл. 03.05.2024. Бюл. № 5. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67263924.
28. Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Зверев В.И., Пресняков А.Ю., Корякин С.Н. *Вспомогательная утилита визуальной верификации пересечений среза коллиматора с телом пациента на стадии предлучевой подготовки*: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2024665975 РФ. Номер заявки 2024665975; заявл. 28.06.2024; опубл. 09.07.2024. Бюл. № 7.
29. Соловьев А.Н., Чернуха А.Е., Корякин С.Н., Пресняков А.Ю., Зверев В.И. *Автоматизированное средство оптимизации полей быстрой нейтронной терапии в режиме 3D-CRT по среднеквадратичному отклонению на основе алгоритма Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно в реализации pytorch*: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2024666070 РФ. Номер заявки 2024664787; заявл. 28.06.2024; опубл. 09.07.2024. Бюл. № 7.
30. Butenko A.V., Syresin E.M., Tyutyunnikov S.I., et al. Analysis of Metrological Provision Problems of a Test Stand for Testing Radio-Electronic Products for Resistance to Irradiation with High-Energy Heavy Ions. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2019;16:734–743. https://doi.org/10.1134/S1547477119060098

31. Brun R., Rademakers F. ROOT — An object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1997;389(1–2):81–86. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X
32. Гордон К.Б., Сабуров В.О., Корякин С.Н., Гулидов И.А., Фатхудинов Т.Х., Арутюнян И.В., Каприн А.Д., Соловьев А.Н. Расчет биологической эффективности протонной компоненты при нейтронном облучении 14.8 МэВ методами вычислительной биологии с использованием видеокарт. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* 2022;173(2):263–267. https://doi.org/10.47056/0365-9615-2022-173-2-263-267
33. Schneider W., Bortfeld T., Schlegel W. Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions *Phys. Med. Biol.* 2000;45(2):459. https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/2/314
34. Kotb O.M., Solovev A.N., Saburov V.O., et al. Response of the FBX aqueous chemical dosimeter to high energy proton and electron beams used for radiotherapy research. *Radiat. Phys. Chem.* 2024;216:111451. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111451
35. Balakin V.E., Bazhan A.I., Alexandrov V.A., et al. Updated Status of Protom Synchrotrons for Radiation Therapy. In: *27 Russian Particle Acc. Conf.* (*Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia*). *J. Accelerator Conferences Website* (*JACoW*) *Publishing*. 2021. P. 120–123. https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB05
36. Южаков В.В., Корчагина К.С., Фомина Н.К., Корякин С.М., Соловьев А.Н., Ингель И.Э., Корецкая А.Е., Севанькаева Л.Е., Яковлева Н.Д., Цыганова М.Г. Действие гамма-излучения и сканирующего пучка протонов на морфофункциональные характеристики саркомы М-1 крыс. *Радиация и риск.* 2020;29(2):101–114. https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-2-101-114
37. Соловьев А.Н., Чернуха А.Е., Потетня В.И. *Программа поддержки принятия решений по радиобиологическим экспериментам на временном радиобиологическом стенде ускорительного комплекса У-70*: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2020615172 РФ. Номер заявки 2020614229; заявл. 14.05.2020; опубл. 18.05.2020. Бюл. № 5. https://elibrary.ru/item.asp?id=43880348.
38. Beketov E., Isaeva E., Malakhov E., Nasedkina N., Koryakin S., Ulyanenko S., Solovev A., Lychagin A. The study of biological effectiveness of U-70 accelerator carbon ions using melanoma B-16 clonogenic assay. *RAD Journal.* 2017;2(2):90–93. https://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.020
39. Соловьев А.Н., Чернуха А.Е., Трошина М.В., Лычагин А.А., Пикалов В.А., Харлов В.И., Ульяненко С.Е. Разработка средств пассивной модификации пучка ионов углерода ускорительного комплекса У-70 для радиобиологических исследований. *Медицинская физика*. 2016;4(72):47–54. https://elibrary.ru/item.asp?id=27428891
40. Заичкина С.И., Розанова О.М., Смирнова Е.Н., Дюкина А.Р., Белякова Т.А., Стрельникова Н.С., Сорокина С.С., Пикалов В.А. Оценка биологической эффективности ускоренных ионов углерода с энергией 450 МэВ/нуклон в ускорительном комплексе У-70 по критерию выживаемости мышей. *Биофизика*. 2019;64(6):1208–1215. http://doi.org/10.1134/S0006302919060206
[Zaichkina S.I., Rozanova O.M., Smirnova E.N., Dyukina A.R., Belyakova T.A., Strelnikova N.S., Sorokina S.S., Pikalov V.A. Assessment of the Biological Efficiency of 450 MeV/Nucleon Accelerated Carbon Ions in the U-70 Accelerator According to the Criterion of Mouse Survival. *BIOPHYSICS*. 2019;64:991–998. https://doi.org/10.1134/S000635091906023X]
41. Kuznetsova E.A., Sirota N.P., Mitroshina I.Yu., Pikalov V.A., Smirnova E.N., Rozanova O.M., Glukhov S.I., Sirota T.V., Zaichkina S.I. DNA damage in blood leukocytes from mice irradiated with accelerated carbon ions with an energy of 450 MeV/nucleon. *Int. J. Radiat. Biol*. 2020;96(10):1245–1253. https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1807640
42. Pikalov V.A., Alexeev A.G., Antipov Y.M., Kalinin V.A., Koshelev A.V., Maximov A.V., Ovsienko M.P., Polkovnikov M.K., Soldatov A.P. The Results Obtained on "Radiobiological Stand" Facility, Working with the Extracted Carbon Ion Beam of the U-70 Accelerator. In: *27 Russian Particle Acc. Conf.* (*Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia*). *J. Accelerator Conferences Website* (*JACoW*) *Publishing*. 2021. P. 124–126. https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06
43. Гаркуша В.И., Иванов С.В., Калинин В.А., Максимов А.В., Маркин А.М., Новоскольцев Ф.Н., Пикалов В.А., Солдатов А.П., Синюков Р.Ю. Создание каналов пучков ионов углерода для проведения радиобиологических и предклинических исследований на ускорительном комплексе У-70. *Приборы и техника эксперимента* 2024;8(S2):14.
44. Meffe G., Votta C., Turco G., Chillè E., et al. Impact of data transfer between treatment planning systems on dosimetric parameters. *Phys. Med.* 2024;121:103369. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103369
45. Mosleh Shirazi M.A., Faghihi R., Siavashpour Z., Nedaie H.A., Mehdizadeg S., Sina S. Independent evaluation of an *in-house* brachytherapy treatment planning system using simulation, measurement and calculation methods. *J. Appl. Clin. Med. Phys*. 2012;13(2):103–112. https://doi.org/10.1120/jacmp.v13i2.3687
46. Kumada H., Takada K., Aihara T., Matsumura A., Sakurai H., Sakae T. Verification for dose estimation performance of a Monte-Carlo based treatment planning system in University of Tsukuba. *Appl. Radiat. Isot.* 2021;166:109222. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109222
47. Moyers M.F., Lin J., Li J., Chen H., Shen Z. Optimization of the planning process with an *in-house* treatment information, management, and planning system. *Radiat. Med. Protect.* 2022;3(3):102–107. https://doi.org/10.1016/j.radmp.2022.07.004
48. Shao Y., Gui J., Wang J., et al. Novel *in-house* knowledge-based automated planning system for lung cancer treated with intensity-modulated radiotherapy. *Strahlenther. Onkol*. 2023;200(11):967–982. https://doi.org/10.1007/s00066-023-02126-1
49. Guo Y., Liu Z., Feng S., Cai H., Zhang Q. Clinical Viability of an Active Spot Scanning Beam Delivery System with a Newly Developed Carbon-Ion Treatment Planning System. *Adv. Radiat. Oncol.* 2024;9(7):101503. https://doi.org/10.1016/j.adro.2024.101503

50. Калыганова Н.В., Киселев В.А., Кашенцева Н.В., Удалов Ю.Д., Гриценко С.Е. Сравнение дозиметрических характеристик планов протонной и лучевой терапии с модуляцией интенсивности при глиобластоме головного мозга. В сб.: *Ильинские чтения 2022*: *Сборник материалов школы-конференции молодых ученых и специалистов*. М., 2022. С. 141–142. https://elibrary.ru/item.asp?id=49488724
51. Okada S., Murakami K., Amako K., et al. GPU Acceleration of Monte Carlo Simulation at the Cellular and DNA Levels. In: Chen Y.W., Torro C., Tanaka S., Howlett R. (Eds.). *Innovation in Medicine and Healthcare 2015*. *Smart Innovation, Systems and Technologies.* Springer; 2016. V. 45. P. 323–332. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23024-5_29
52. Okada S., Murakami K., Incerti S., Amako K., Sasaki T. MPEXS-DNA, A new GPU-based Monte Carlo simulator for track structure and radiation chemistry at subcellular scale. *Med. Phys.* 2019;46(3):1483–1500. https://doi.org/10.1002/mp.13370
53. Qin N., Shen C., Tasi M.Y., et al. Full Monte Carlo–Based Biologic Treatment Plan Optimization System for Intensity Modulated Carbon Ion Therapy on Graphics Processing Unit. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys*. 2018;100(1):235–243. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2017.09.002
54. Franciosini G., Carlotti D., Cattani F., et al. IOeRT conventional and FLASH treatment planning system implementation exploiting fast GPU Monte Carlo: The case of breast cancer. *Phys. Med.* 2024;121:103346. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103346
55. Magro G., Mein S., Kopp B., et al. FRoG dose computation meets Monte Carlo accuracy for proton therapy dose calculation in lung. *Phys. Med.* 2021;88;66–74. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.05.021
56. Yagi M., Tsubouchi T., Hamatani N., Takashina M., Maruo H., Fujitaka S., et al. Commissioning a newly developed treatment planning system, VQA Plan, for fast-raster scanning of carbon-ion beams. *PLoS ONE.* 2022;17(5):e0268087. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268087
57. Lu Y., Sigov A., Ratkin L, Ivanov L.A., Zuo M. Quantum computing and industrial information integration: A review. *J. Ind. Inform. Integr*. 2023;35:100511. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100511
58. Giraud P., Bibault J.E. Artificial intelligence in radiotherapy: Current applications and future trends. *Diagn. Interv. Imaging*. 2024;105(12):475–480. https://doi.org/10.1016/j.diii.2024.06.001

REFERENCES

1. Mardynsky Yu.S., Gulidov I.A., Gordon K.B., Koryakin S.N., Solovyov A.N., Saburov V.O., Ivanov S.A., Kaprin A.D., Lobzhanidze T.K., Markov N.V., Zheleznov I.M., Yurkov D.I., Gerasimchuk O.A., Presnyakov A.Yu., Zverev V.I., Smirnov V.P. External-Beam Neutron Therapy: The First Domestic Medical Unit. *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk* (*Herald of the Russian Academy of Sciences*). 2024;94(1):80–86 (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S0869587324010098
2. Rod'ko I.I., Sarychev G.A., Balakirev P.V., et al. Development of a Radiotherapy System Based on 6 MeV Linac and Cone-Beam Computer Tomograph. *At. Energy*. 2019;125(5):333–337. https://doi.org/10.1007/s10512-019-00490-9
3. Inaniwa T., Kanematsu N., Noda K., Kamada T. Treatment planning of intensity modulated composite particle therapy with dose and linear energy transfer optimization. *Phys. Med. Biol.* 2017;62(12):5180–5197. https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa68d7
4. Krämer M. Swift ions in radiotherapy – Treatment planning with TRiP98. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 2009;267(6):989–992. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.02.015
5. Elyutina A.S., Kiger W.S., Portnov A.A. NCTPlan application for neutron capture therapy dosimetric planning at MEPhI nuclear research reactor. *Appl. Radiat. Isot.* 2011;69(12):1888–1891. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.04.018
6. Takeuchi A., Hirose K., Kato R., Komori S., Sato M., Motoyanagi T., Yamazaki Y., Narita Y., Takai Y., Kato T. Evaluation of calculation accuracy and computation time in a commercial treatment planning system for accelerator-based boron neutron capture therapy. *Radiol. Phys. Technol.* 2024;17(4):907–917. https://doi.org/10.1007/s12194-024-00833-7
7. Tenk Y.C., Chen J., Zhong W.B., Lio Y.H. HU-based material conversion for BNCT accurate dose estimation. *Sci. Rep.* 2023;13:15701 https://doi.org/10.1038/s41598-023-42508-0
8. Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al. Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016;835:186–225. https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125
9. Ahdida C., Bozzato D., Calzolari D., et al. New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Front. Phys.* 2022;9:788253. https://doi.org/10.3389/fphy.2021.788253
10. Rising M.E., Armstrong J.C., Bolding S.R., et al. MCNP® Code V.6.3.0 Release Notes. *Tech. Rep. LA-UR-22-33103, Rev. 1.* Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA. 2023. 55 p. URL: CoverSheet
11. Sato T., Iwamoto Y., Hashimoto S., et al. Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33. *J. Nuclear Sci. Technol.* 2023;61(1):127–135. https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275736
12. Bassler N., Hansen D.C., Lühr A., Thomsen B., Petersen J.B., Sobolevsky N. SHIELD-HIT12A – a Monte Carlo particle transport program for ion therapy research. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014;489:012004. https://doi.org/10.1088/1742-6596/489/1/012004
13. Muraro S., Battistoni G., Kraan A.C. Challenges in Monte Carlo Simulations as Clinical and Research Tool in Particle Therapy: A Review. *Front. Phys.* 2020;8:567800. https://doi.org/10.3389/fphy.2020.567800

14. Petringa G., Romano F., Manti L., et al. Radiobiological quantities in proton-therapy: Estimation and validation using Geant4-based Monte Carlo simulations. *Phys. Med*. 2019;58:72–80. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.01.018
15. Troshina M.V., Koryakina E.V., Potetnya V.I., Koryakin S.N., Pikalov V.A., Antipov Yu.M. Induction of chromosome aberrations in B14-150 cells following carbon ions irradiation at low doses. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1701:012029. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1701/1/012029
16. Kyriakou I., Sakata D., Tran H.N., et al. Review of the Geant4-DNA simulation toolkit for radiobiological applications at the cellular and DNA level. *Cancers.* 2022;14(1):35. https://doi.org/10.3390/cancers14010035
17. Chatzipapas K., Dordevic M., Zivkovic S., et al. Geant4-DNA simulation of human cancer cells irradiation with helium ion beams. *Phys. Med*. 20233;112:102613. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102613
18. Pisciotta P., Cammarata F.P., Stefano A., et al. Monte Carlo GEANT4-based application for *in vivo* RBE study using small animals at LNS-INFN preclinical hadrontherapy facility. *Phys. Med*. 2018;54:173–178. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.07.003
19. Taha E., Djouider F., Banoqitah E. Monte Carlo simulations for dose enhancement in cancer treatment using bismuth oxide nanoparticles implanted in brain soft tissue. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med*. 2018;41:363–370. https://doi.org/10.1007/s13246-018-0633-z
20. Cadini F., De Sanctis J., Girotti T., Zio E., Luce A., Taglioni A. Monte Carlo-based assessment of the safety performance of a radioactive waste repository. *Reliability Engineering & System Safety* (*RESS*). 2010;95(8):859–865. https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.04.002
21. Geng C., Tang X., Gong C., Guan F., Johns J., Shu D., Chen D. A Monte Carlo-based radiation safety assessment for astronauts in an environment with confined magnetic field shielding. *J. Radiol. Prot.* 2015;35(4):777. https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/4/777
22. Archer J.W., Large M.J., Bolst D., et al. A multiscale nanodosimetric study of GCR protons and alpha particles in the organs of astronauts on the lunar surface *Rad. Phys. Chem.* 2025;229:112448. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112448
23. Chernukha A.E., Saburov V.O., Adarova A.I., Solovev A.N., Kizilova Yu.V., Koryakin S.N. Three-Dimensional Models and Complimentary Geometry for Dose Evaluation in NG-24MT Based Neutron Radiotherapy Cabinet. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2022;3:158–167 (in Russ.). https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.14
24. Koryakin S., Isaeva E., Beketov E., Solovev A., Ulyanenko L., Fedorov V., Lityaev V., Ulyanenko S. The photon capture therapy model for *in vivo* and *in vitro* studies using Au nanocomposites with the hyaluronic acid based compounds. *RAD Journal.* 2017;2(2):86–89. http://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.019
25. Solovyev A.N., Fedorov V.V., Kharlov V.I., Stepanova U.A. Comparative analysis of MCNPX and GEANT4 codes for fast-neutron radiation treatment planning. *Nuclear Energy Technol.* 2015;1(1):14–19. https://doi.org/10.1016/j.nucet.2015.11.004
26. Solovev A.N., Kizilova Ya.V., Koryakin S.N. *A Software Toolkit for DICOM Medical Standard Images Conversion to Rapid Access Formats:* computer program. Registration number (certificate) 2023685423 RF. Publ. 27.11.2023 (in Russ.).
27. Solovev A.N., Kizilova Ya.V., Chernukha A.E., Merzlikin G.V., Koryakin S.N. *Software Toolkit for General-Purpose Phase Space Conversion to Rapid Access Formats*: computer program. Registration number (certificate) 2024660249 RF. Publ. 03.05.2024 (in Russ.).
28. Solovev A.N., Kizilova Ya.V., Zverev V.I., Presnyakov A.Yu., Koryakin S.N. *A Supplementary Tool for Visual-Based Verification of Cross-Section of Collimator Slice with Patient Body in the Pre-Treatment Stage*: computer program. Registration number (certificate) 2024665975 RF. Publ. 09.07.2024 (in Russ.).
29. Solovev A.N., Chernukha A.E., Koryakin S.N., Presnyakov A.Yu., Zverev V.I. *Automated Optimization Tool for Fast Neutron Therapy Using 3D-CRT Regime by Root Mean Square Deviation with Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno Algorithm Implemented in Pytorch*: computer program. Registration number (certificate) 2024664787 RF. Publ. 09.07.2024 (in Russ.).
30. Butenko A.V., Syresin E.M., Tyutyunnikov S.I., et al. Analysis of Metrological Provision Problems of a Test Stand for Testing Radio-Electronic Products for Resistance to Irradiation with High-Energy Heavy Ions. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2019;16:734–743. https://doi.org/10.1134/S1547477119060098
31. Brun R., Rademakers F. ROOT — An object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1997;389(1–2):81–86. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X
32. Gordon K.B., Saburov V.O., Koryakin S.N., et al. Calculation of the Biological Efficiency of the Proton Component from 14.8 MeV Neutron Irradiation in Computational Biology with Help of Video Cards. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2022;173:281–285. https://doi.org/10.1007/s10517-022-05534-y
[Original Russian Text: Gordon K.B., Saburov V.O., Koryakin S.N., Gulidov I.A., Fatkhudinov T.Kh., Arutyunyan I.V., Kaprin A.D., Solov'ev A.N. Calculation of the Biological Efficiency of the Proton Component from 14.8 MeV Neutron Irradiation in Computational Biology with Help of Video Cards. *Byulleten' eksperimental'noi biologii i meditsiny*. 2022;173(2):263–267 (in Russ.). https://doi.org/10.47056/0365-9615-2022-173-2-263-267]
33. Schneider W., Bortfeld T., Schlegel W. Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions *Phys. Med. Biol.* 2000;45(2):459. https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/2/314
34. Kotb O.M., Solovev A.N., Saburov V.O., et al. Response of the FBX aqueous chemical dosimeter to high energy proton and electron beams used for radiotherapy research. *Radiat. Phys. Chem.* 2024;216:111451. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111451

35. Balakin V.E., Bazhan A.I., Alexandrov V.A., et al. Updated Status of Protom Synchrotrons for Radiation Therapy. In: *27 Russian Particle Acc. Conf.* (*Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia*). *J. Accelerator Conferences Website* (*JACoW*) *Publishing*. 2021. P. 120–123. https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB05
36. Yuzhakov V.V., Korchagina K.S., Fomina N.K., Koryakin S.M., Solovev A.N., Ingel I.E., Koretskaya A.E., Sevankaeva L.E., Yakovleva N.D., Tsyganova M.G. Effect of gamma-radiation and scanning proton beam on the morphofunctional characteristics of rat sarcoma M-1. *Radiatsiiya i risk = Radiation and Risk.* 2020;29(2):101–114 (in Russ.). https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-2-101-114
37. Solovev A.N., Chernukha A.E., Potetnya V.I. *The Radiobiological Experiments Decision Making Support System for Temporary Radiobiological Stand of the U-70 Accelerator Facility*: computer program. Registration number (certificate) 2020615172 RF. Publ. 18.05.2020 (in Russ.).
38. Beketov E., Isaeva E., Malakhov E., Nasedkina N., Koryakin S., Ulyanenko S., Solovev A., Lychagin A. The study of biological effectiveness of U-70 accelerator carbon ions using melanoma B-16 clonogenic assay. *RAD Journal.* 2017;2(2): 90–93. https://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.020
39. Solovev A.N., Chernukha A.E., Troshina M.V., Lychagin A.A. Pikalov V.A., Kharlov V.I. Design of passive beam modifiers in carbon ion beam at U-70 synchrotron facility for radiobiological studies. *Meditsinskaya Fizika = Medical Physics*. 2016;4(72):47–54 (in Russ.). https://elibrary.ru/item.asp?id=27428891
40. Zaichkina S.I., Rozanova O.M., Smirnova E.N., et al. Assessment of the Biological Efficiency of 450 MeV/Nucleon Accelerated Carbon Ions in the U-70 Accelerator According to the Criterion of Mouse Survival. *BIOPHYSICS*. 2019;64: 991–998. https://doi.org/10.1134/S000635091906023X
[Original Russian Text: Zaichkina S.I., Rozanova O.M., Smirnova E.N., Dyukina A.R., Belyakova T.A., Strelnikova N.S., Sorokina S.S., Pikalov V.A. Assessment of the Biological Efficiency of 450 MeV/Nucleon Accelerated Carbon Ions in the U-70 Accelerator According to the Criterion of Mouse Survival. *Biofizika*. 2019;64(4):1208–1215 (in Russ.). http://dx.doi.org/10.1134/S0006302919060206]
41. Kuznetsova E.A., Sirota N.P., Mitroshina I.Yu., Pikalov V.A., Smirnova E.N., Rozanova O.M., Glukhov S.I., Sirota T.V., Zaichkina S.I. DNA damage in blood leukocytes from mice irradiated with accelerated carbon ions with an energy of 450 MeV/nucleon. *Int. J. Radiat. Biol*. 2020;96(10):1245–1253. https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1807640
42. Pikalov V.A., Alexeev A.G., Antipov Y.M., Kalinin V.A., Koshelev A.V., Maximov A.V., Ovsienko M.P., Polkovnikov M.K., Soldatov A.P. The Results Obtained on "Radiobiological Stand" Facility, Working with the Extracted Carbon Ion Beam of the U-70 Accelerator. In: *27 Russian Particle Acc. Conf.* (*Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia*). *J. Accelerator Conferences Website* (*JACoW*) *Publishing*. 2021. P. 124–126. https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06
43. Garkusha V.I., Ivanov S.V., Kalinin V.A., et al. Status of work on creating carbon ion beam channels for radiobiological and preclinical studies at the U-70 accelerator complex. *Instrum. Exp. Tech.* 2024;64(Suppl.2):S256–S241. https://doi.org/10.1134/S0020441224701768
[Original Russian Text: Garkusha V.I., Ivanov S.V., Kalinin V.A., Maksimov A.V., Markin A.M., Novoskol'tsev F.N., Pikalov V.A., Soldatov A.P., Sinyukov R.Yu. Status of work on creating carbon ion beam channels for radiobiological and preclinical studies at the U-70 accelerator complex. *Pribory i tekhnika eksperimenta.* 2024;8(S2):14 (in Russ.).]
44. Meffe G., Votta C., Turco G., Chillè E., et al. Impact of data transfer between treatment planning systems on dosimetric parameters. *Phys. Med.* 2024;121:103369. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103369
45. Mosleh Shirazi M.A., Faghihi R., Siavashpour Z., Nedaie H.A., Mehdizadeg S., Sina S. Independent evaluation of an *in-house* brachytherapy treatment planning system using simulation, measurement and calculation methods. *J. Appl. Clin. Med. Phys*. 2012;13(2):103–112. https://doi.org/10.1120/jacmp.v13i2.3687
46. Kumada H., Takada K., Aihara T., Matsumura A., Sakurai H., Sakae T. Verification for dose estimation performance of a Monte-Carlo based treatment planning system in University of Tsukuba. *Appl. Radiat. Isot.* 2021;166:109222. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109222
47. Moyers M.F., Lin J., Li J., Chen H., Shen Z. Optimization of the planning process with an *in-house* treatment information, management, and planning system. *Radiat. Med. Protect.* 2022;3(3):102–107. https://doi.org/10.1016/j.radmp.2022.07.004
48. Shao Y., Gui J., Wang J., et al. Novel *in-house* knowledge-based automated planning system for lung cancer treated with intensity-modulated radiotherapy. *Strahlenther. Onkol*. 2023;200(11):967–982. https://doi.org/10.1007/s00066-023-02126-1
49. Guo Y., Liu Z., Feng S., Cai H., Zhang Q. Clinical Viability of an Active Spot Scanning Beam Delivery System with a Newly Developed Carbon-Ion Treatment Planning System. *Adv. Radiat. Oncol.* 2024;9(7):101503. https://doi.org/10.1016/j.adro.2024.101503
50. Kalyganova N.V., Kiselev V.A., Kashentseva N.V., Udalov Yu.D., Gritsenko S.E. Comparison of dosimetric properties of proton and intensity modulated radiotherapy for glioblastomes. In: *Il'inskie chteniya 2022: Proceedings of the School-Conference of Young Scientists and Specialists.* Moscow, 2022. P. 141–142 (in Russ.). https://elibrary.ru/item.asp?id=49488724
51. Okada S., Murakami K., Amako K., et al. GPU Acceleration of Monte Carlo Simulation at the Cellular and DNA Levels. In book series: Chen Y.W., Torro C., Tanaka S., Howlett R. (Eds.). *Innovation in Medicine and Healthcare 2015*. *Smart Innovation, Systems and Technologies.* Springer; 2016. V. 45. P. 323–332. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23024-5_29
52. Okada S., Murakami K., Incerti S., Amako K., Sasaki T. MPEXS-DNA, A new GPU-based Monte Carlo simulator for track structure and radiation chemistry at subcellular scale. *Med. Phys.* 2019;46(3):1483–1500. https://doi.org/10.1002/mp.13370
53. Qin N., Shen C., Tasi M.Y., et al. Full Monte Carlo–Based Biologic Treatment Plan Optimization System for Intensity Modulated Carbon Ion Therapy on Graphics Processing Unit. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys*. 2018;100(1):235–243. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2017.09.002

54. Franciosini G., Carlotti D., Cattani F., et al. IOeRT conventional and FLASH treatment planning system implementation exploiting fast GPU Monte Carlo: The case of breast cancer. *Phys. Med.* 2024;121:103346. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103346
55. Magro G., Mein S., Kopp B., et al. FRoG dose computation meets Monte Carlo accuracy for proton therapy dose calculation in lung. *Phys. Med.* 2021;88;66–74. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.05.021
56. Yagi M., Tsubouchi T., Hamatani N., Takashina M., Maruo H., Fujitaka S., et al. Commissioning a newly developed treatment planning system, VQA Plan, for fast-raster scanning of carbon-ion beams. *PLoS ONE.* 2022;17(5):e0268087. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268087
57. Lu Y., Sigov A., Ratkin L, Ivanov L.A., Zuo M. Quantum computing and industrial information integration: A review. *J. Ind. Inform. Integr*. 2023;35:100511. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100511
58. Giraud P., Bibault J.E. Artificial intelligence in radiotherapy: Current applications and future trends. *Diagn. Interv. Imaging*. 2024;105(12):475–480. https://doi.org/10.1016/j.diii.2024.06.001

Об авторах

Соловьев Алексей Николаевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией медицинской радиационной физики отдела радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава Российской Федерации (249031, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Маршала Жукова, д. 10); доцент, кафедра радионуклидной медицины, Обнинский институт атомной энергетики — филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (249039, Россия, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», тер. Студгородок, д. 1). E-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru. Scopus Author ID 57215856302, ResearcherID O-6340-2014, https://orcid.org/0000-0002-4386-3725

Кизилова Яна Владимировна, научный сотрудник, лаборатория медицинской радиационной физики отдела радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава Российской Федерации (249031, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Маршала Жукова, д. 10). E-mail: cobaltcorsair@yandex.ru. https://orcid.org/0009-0001-0404-820X

Казаков Евгений Игоревич, инженер, лаборатория разработки и эксплуатации облучающей техники отдела радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава Российской Федерации (249031, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Маршала Жукова, д. 10). E-mail: ekazakof@ya.ru. https://orcid.org/0009-0009-4178-6242

Корякин Сергей Николаевич, к.б.н., заведующий отделом радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава Российской Федерации (249031, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Маршала Жукова, д. 10); доцент, кафедра радионуклидной медицины, Обнинский институт атомной энергетики — филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (249039, Россия, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», тер. Студгородок, д. 1). E-mail: korsernic@mail.ru. Scopus Author ID 6603357340, https://orcid.org/0000-0003-0128-4538

About the Authors

Aleksei N. Solovev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory of Medical Radiation Physics, Radiation Biophysics Department, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center (10, Marshala Zhukova ul., Obninsk, Kaluga oblast, 249031 Russia); Associate Professor, Radionuclide Medicine Department, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering (1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga oblast, 249039 Russia). E-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru. Scopus Author ID 57215856302, ResearcherID O-6340-2014, https://orcid.org/0000-0002-4386-3725

Yana V. Kizilova, Researcher, Laboratory of Medical Radiation Physics, Radiation Biophysics Department, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center (10, Marshala Zhukova ul., Obninsk, Kaluga oblast, 249031 Russia). E-mail: cobaltcorsair@yandex.ru. https://orcid.org/0009-0001-0404-820X

Evgeniy I. Kazakov, Engineer, Laboratory of Development and Operation of Radiation Equipment, Radiation Biophysics Department, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center (10, Marshala Zhukova ul., Obninsk, Kaluga oblast, 249031 Russia). E-mail: ekazakof@ya.ru. https://orcid.org/0009-0009-4178-6242

Sergey N. Koryakin, Cand. Sci. (Biol.), Head of Radiation Biophysics Department, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center (10, Marshala Zhukova ul., Obninsk, Kaluga oblast, 249031 Russia); Associate Professor, Radionuclide Medicine Department, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering (1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga oblast, 249039 Russia). E-mail: korsernic@mail.ru. Scopus Author ID 6603357340, https://orcid.org/0000-0003-0128-4538

Russian Technological Journal.
2025;13(4):25–36

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

УДК 004.93’1
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-25-36
EDN WVWVCJ

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование эффективности применения моделей нейронных сетей YOLO для распознавания объектов на радиолокационных изображениях

А.С. Красноперова [@], А.С. Твердохлебов, А.А. Карташов, В.И. Вебер, В.Ю. Куприц

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Томск, 634050 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: alenacergeevna2@icloud.com

• **Поступила:** 10.10.2024 • **Доработана:** 24.02.2025 • **Принята к опубликованию:** 21.05.2025

Резюме

Цели. В статье рассматривается проблема применения нейронных сетей для обнаружения и классификации объектов на радиолокационных изображениях в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Целью работы является исследование быстродействия и точности моделей нейронных сетей YOLO[1] при решении задач обнаружения и классификации объектов на радиолокационных изображениях для оценки возможностей практической реализации на микрокомпьютере с нейронным процессором.

Методы. В работе использовались методы машинного обучения, обнаружения и классификации объектов на изображении.

Результаты. Результатом работы является оценка и сравнение быстродействия и точности моделей нейронных сетей YOLO 5-го, 8-го и 11-го поколений с разным количеством обучаемых параметров (модели nano, small, medium, large, extra large) для исследования возможности их использования на микрокомпьютере с нейронным процессором. При сравнении различных моделей YOLO по метрике оценки точности лучшие результаты показали модели YOLOv11n (0.925), YOLOv5l (0.889), YOLOv11s (0.883); по метрике полноты – YOLOv5n (0.932), YOLOv11n (0.928), YOLOv11s (0.914); по метрике mAP50 – YOLOv11s (0.961), YOLOv5n (0.954), YOLOv11n (0.953); по метрике mAP50-95 – YOLOv5n (0.756), YOLOv11s (0.74), YOLOv5l (0.727).

Выводы. Проведенные исследования показывают возможность применения моделей нейронных сетей YOLO на микрокомпьютере с нейронным процессором при соответствии вычислительных ресурсов микрокомпьютера и вычислительных требований нейронных сетей. Микрокомпьютер ROC-RK3588S-PC (Firefly Technology Co., Китай) обеспечивает быстродействие до 6 TOPS (Тера-операций в секунду), что позволяет применять модели YOLOv5n (7.1 GFLOPs), YOLOv11n (6.3 GFLOPs), YOLOv11s (21.3 GFLOPs).

Ключевые слова: системы распознавания образов, нейронные сети, радиолокационное изображение, алгоритмы машинного обучения

[1] You only look once (YOLO) – серия нейросетевых моделей для задачи детекции объектов. [You Only Look Once is a series of neural network models for the real-time object detection.]

© А.С. Красноперова, А.С. Твердохлебов, А.А. Карташов, В.И. Вебер, В.Ю. Куприц, 2025

Для цитирования: Краснoперова А.С., Твердохлебов А.С., Карташов А.А., Вебер В.И., Куприц В.Ю. Исследование эффективности применения моделей нейронных сетей YOLO для распознавания объектов на радиолокационных изображениях. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):25–36. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-25-36, https://www.elibrary.ru/WWWCJ

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Efficiency of YOLO neural network models applied for object recognition in radar images

Alena S. Krasnoperova [@], Alexander S. Tverdokhlebov, Alexey A. Kartashov, Vladislav I. Weber, Vladimir Y. Kuprits

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: alenacergeevna2@icloud.com

• **Submitted:** 10.10.2024 • **Revised:** 24.02.2025 • **Accepted:** 21.05.2025

Abstract

Objectives. The paper addresses the problem of applying neural networks for object detection in radar images and their recognition under conditions of limited computational resources. The aim was to investigate the speed and recognition quality of YOLO[2] neural network models in solving object detection and classification tasks in radar images in order to evaluate the feasibility of their practical implementation on a microcomputer with a neural processor.

Methods. Machine learning, object detection, and classification techniques were used to detect and classify objects in a radar image.

Results. The study compared the speed and recognition quality of the 5th, 8th, and 11th generation YOLO neural network models with varying numbers of trainable parameters (nano-, small-, medium-, large-, and extra-large-sized) to assess their potential use on a microcomputer with a neural processor. As a result of comparing various YOLO models using evaluation metrics, YOLOv11n (0.925), YOLOv5l (0.889), and YOLOv11s (0.883) showed the highest precision metric; YOLOv5n (0.932), YOLOv11n (0.928), and YOLOv11s (0.914) showed the highest recall metric; YOLOv11s (0.961), YOLOv5n (0.954), and YOLOv11n (0.953) showed the highest mAP50 metric; and YOLOv5n (0.756), YOLOv11s (0.74), and YOLOv5l (0.727) showed the highest mAP50-95 metric.

Conclusions. The conducted research confirmed the feasibility of running YOLO neural network models on a microcomputer with a neural processor, provided that the computational resources of the microcomputer match the computational requirements of the neural networks. The ROC-RK3588S-PC microcomputer (Firefly Technology Co., China) provides up to 6 TOPS of performance, allowing the use of YOLOv5n (7.1 GFLOPs), YOLOv11n (6.3 GFLOPs), and YOLOv11s (21.3 GFLOPs) models.

Keywords: pattern recognition systems, neural networks, radar images, machine learning algorithms

[2] You Only Look Once is a series of neural network models for the real-time object detection.

For citation: Krasnoperova A.S., Tverdokhlebov A.S., Kartashov A.A., Weber V.I., Kuprits V.Y. Efficiency of YOLO neural network models applied for object recognition in radar images. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):25–36. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-25-36, https://www.elibrary.ru/WWWCJ

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для формирования радиолокационного изображения (РЛИ) местности широко используются бортовые радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) [1, 2]. В качестве примеров практического применения РЛИ, полученных с помощью бортовых радаров с РСА, установленных на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), можно отметить следующее:

- поиск транспортных средств при проведении поисково-спасательных операций, контроль передвижения и обеспечение безопасности производственных площадок, складских терминалов, месторождений, портов и городских территорий (парки, водоохранные зоны), обнаружение наводнений;
- дистанционный мониторинг объектов протяженной инфраструктуры, особенно в удаленных районах: нефтепроводов, газопроводов, линий электропередач, инфраструктурных объектов железных дорог;
- автоматизированное построение цифровых карт высот (3D-моделей) земной поверхности, классификация земного покрова: сельскохозяйственные угодья, город, деревня, вода, лес, дорога.

Обычно обработка данных и формирование РЛИ происходит в стационарных условиях при использовании высокопроизводительных компьютеров, но в ряде случаев для повышения эффективности работы системы требуется обработка РЛИ на борту БПЛА. Например, для повышения эффективности поисково-спасательных работ реализация обработки и формирования РЛИ в бортовой системе позволит существенно сократить время поиска транспортных средств и повысить оперативность оказания помощи. Данная операция может быть реализована с помощью нейронных сетей, установленных на микрокомпьютерах (МК) бортовой аппаратуры.

Эффективным решением для распознавания наземных объектов является размещение различных датчиков на БПЛА. Новый подход к созданию многофункционального бортового радиоэлектронного комплекса включает использование различных режимов радиолокации, интеграцию локатора с оптико-электронными средствами, включая инфракрасные, а также использование бортовых радиолокационных станций с синтезированной апертурой антенны. Современные радиолокационные станции обеспечивают высокое разрешение и эффективно выполняют задачи обнаружения и распознавания скрытых объектов, дополняя оптические и инфракрасные системы [3].

Радиолокационное наблюдение с использованием технологии РСА в настоящее время относят к эффективным методам дистанционного мониторинга объектов интереса, итогом которого являются высокоинформативные двумерные РЛИ, возможность получения которых не ограничивается временем суток и параметрами метеоусловий [4, 5].

Основные принципы формирования РЛИ известны и достаточно подробно рассмотрены в литературе[3] [6, 7]. При обработке данных РСА необходимо учитывать особенности формирования РЛИ, например:

- геометрические и радиометрические искажения на формируемых РЛИ;
- наличие радиолокационных теней;
- спекл-шум, который образуется в результате когерентного суммирования отраженных электромагнитных волн от пространственно случайных источников рассеяния, попадающих в элемент разрешения РСА;
- различие отражающих свойств объектов в разных частотных диапазонах;
- режим радиолокационной съемки;
- рабочий диапазон частот и поляризацию сигнала.

В то же время основные принципы и особенности формирования РЛИ необходимо учитывать при создании баз данных изображений, которые будут использоваться для обучения, валидации и тестирования моделей нейронных сетей.

Актуальность данной работы подтверждается различными публикациями. В работах [8–10] проводилось исследование эффективности нейронных сетей для обнаружения и распознавания объектов морского судоходства. Так, в [8] приводятся оценки точности нейронной сети YOLOv5x[4] на основе базы

[3] Основы обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли. https://habr.com/ru/articles/787074/. Дата обращения 02.12.2024. [Fundamentals of processing radar data from Earth remote sensing. https://habr.com/ru/articles/787074/ (in Russ.). Accessed December 02, 2024.]

[4] You only look once – серия нейросетевых моделей для задачи детекции объектов. [You Only Look Once is a series of neural network models for the real-time object detection.]

данных SAR Ship Dataset [11] с использованием соответствующих метрик оценки точности ее работы, а в [9] исследуются нейронные сети для обнаружения и распознавания кораблей. Приводится количественное описание результатов различных моделей нейронных сетей, таких как YOLOv4, YOLOv7, YOLOv7-tiny, RetinaNet, Cascade R-CNN, SSD, OE-YOLO. В работе [10] дано описание нейронных сетей для обнаружения и распознавания объектов по базе данных MSTAR (Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition)[5]. В ней исследуются различные модели нейронных сетей с оценкой качества их работы по следующим метрикам: Recall, Precision, mAP50, mAP50-95.

Новизна результатов, приведенных в настоящей статье, заключается в сравнении быстродействия и точности моделей нейронных сетей YOLO 5-го, 8-го и 11-го поколений с разным количеством обучаемых параметров и оценка возможности их использования на МК с нейронным процессором.

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ РЛИ

Для формирования базы данных РЛИ существуют 3 основных подхода:

- с помощью экспериментальной съемки интересующих объектов на земной поверхности бортовым РСА с учетом различных факторов, влияющих на формирование РЛИ;
- с помощью моделирования процессов распространения радиоволн, отраженных от земной поверхности, и дальнейшей обработки принятых сигналов в соответствии с алгоритмами работы РСА;
- на основе поиска РЛИ, полученных с применением РСА из открытых источников.

Первый подход позволяет получить наиболее точную базу данных РЛИ, но требует привлечения большого количества ресурсов и времени. Моделирование РЛИ представляет собой сложный процесс, который определяется многими факторами. Это связано и со сложностью имитации отражений от местности и протяженных объектов, и с формированием большого потока радиолокационной информации с приемных устройств РСА и т.п. [12, 13]. В настоящей статье используется третий подход, основная цель которого – использовать базы данных РЛИ, размещенные в открытых источниках, для решения поставленной задачи.

В работе использовалась открытая часть базы данных MSTAR. Радиолокационные изображения в этой базе данных сформированы в соответствии с характеристиками радиолокационной системы и условиями формирования изображений, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики радиолокационной системы и условия получения изображений

Характеристика	Значение
Частотный диапазон	X-диапазон
Центральная частота зондирующего сигнала	9.6 ГГц
Ширина полосы зондирующего сигнала	591 МГц
Поляризация излучения и приема сигнала	Горизонтальная
Разрешающая способность по углу места и азимуту	1 фут (~30.5 см)
Режим съемки	Прожекторный (spot light)
Носитель	Самолет (Twin Otter)
Скорость носителя	140–170 км/ч
Наклонная дальность	~5 км
Углы места съемки от плоскости земли	15°–45°
Углы съемки в азимутальной плоскости	0°–360°
Погодные условия	Ясные, сухие
Местность	Равнинная
Растительность	Травянистая, низкая
Время года	Осень (сентябрь, ноябрь)
Место съемки	Военная база Армии США, Арсенал «Рэдстоун», Хантсвилл

База данных MSTAR состоит из 2 наборов данных:

- MSTAR target, в котором каждое изображение имеет простой фон и одно транспортное средство в центре, в этом случае радиолокационная съемка осуществляется под разными углами места съемки;
- MSTAR clutter, содержащий РЛИ сельской местности с дорогами, лесами без изображений транспортных средств.

База данных MSTAR содержит 8890 изображений транспортных средств, 2539 изображений радиоотражателей и 100 изображений сельской местности. Полный перечень РЛИ базы приведен в табл. 2.

[5] https://www.mathworks.com/help/radar/ug/sar-target-classification-using-deep-learning.html. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

Таблица 2. Перечень РЛИ базы данных MSTAR

Цель	Описание	Углы места, °	Примечание
T-72	Танк T-72	15	3 набора из 195 изображений 8 наборов из 274 изображения
		17	3 набора из 230 изображений 8 наборов из 248 изображений
		30	1 набор из 288 изображений 1 набор из 133 изображений
		45	1 набор из 303 изображения 1 набор из 120 изображений
BMP2	БМП 2 – гусеничная боевая машина пехоты	15 17	3 набора из 196 изображений 3 набора из 235 изображений
BTR-60	БТР-60 – бронетранспортер	15 17	1 набор из 195 изображений 1 набор из 256 изображений
BTR-70	БТР-70 – бронетранспортер	15 17	1 набор из 196 изображений 1 набор из 233 изображения
2S1	2С1 «Гвоздика» – самоходная гаубица	15 17 30 45	1 набор из 274 изображений 1 набор из 299 изображений 1 набор из 288 изображений 1 набор из 303 изображений
BRDM-2	БРДМ-2 (ГАЗ-41) – бронированная разведывательно-дозорная машина	15	1 набор из 274 изображений
		17	1 набор из 298 изображений
		30	1 набор из 287 изображений 1 набор из 133 изображений
		45	1 набор из 303 изображений 1 набор из 120 изображений
T-62	Танк T-62	15 17	1 набор из 273 изображений 1 набор из 299 изображений
ZSU_23_4	ЗСУ-23-4 «Шилка» – зенитная самоходная установка	15	1 набор из 274 изображений
		17	1 набор из 299 изображений
		30	1 набор из 288 изображений 1 набор из 118 изображений
		45	1 набор из 303 изображений 1 набор из 119 изображений
ZIL131	ЗИЛ-131 – грузовой автомобиль повышенной проходимости	15 17	1 набор из 274 изображений 1 набор из 299 изображений
D7	D7 – гусеничный бульдозер	15 17	1 набор из 274 изображений 1 набор из 299 изображений
SLICY	Конструкция из геометрических фигур, содержащая базовые формы радиолокационных отражателей, такие как плоские пластины, двугранные, трехгранные и цилиндры	15 16 17 29 30 31 43 44 45	1 набор из 274 изображений 1 набор из 286 изображений 1 набор из 288 изображений 1 набор из 210 изображений 1 набор из 288 изображений 1 набор из 323 изображений 1 набор из 255 изображений 1 набор из 312 изображений 1 набор из 303 изображений
CLUTTER	Радиолокационные изображения города Хантсвилл и его окрестностей	15	1 набор из 100 изображений

Примеры РЛИ из базы данных MSTAR target приведены на рис. 1.

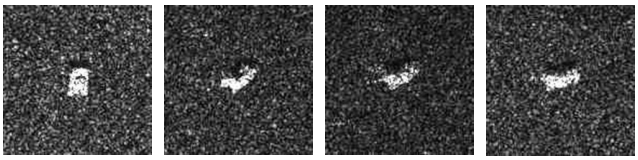


Рис. 1. Примеры РЛИ из базы данных MSTAR target

Пример изображения из выборки MSTAR clutter приведен на рис. 2.

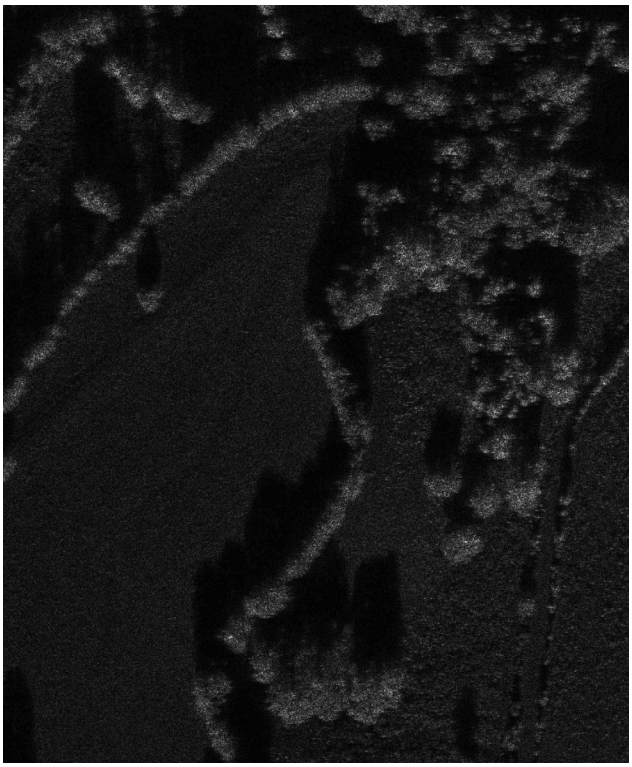


Рис. 2. Изображение сельской местности из выборки MSTAR clutter

Формирование РЛИ земной поверхности (MSTAR clutter) и транспортных средств (MSTAR target) осуществлялось в одинаковых условиях, что позволило применить методику размещения объектов на фоне сельской местности, как в [10].

Процесс слияния и генерации изображений осуществлялся в 3 этапа [10]:

- выбирались точки размещения РЛИ объекта (MSTAR target) на РЛИ сельской местности (MSTAR clutter);
- осуществлялась коррекция яркости пикселей РЛИ объекта (MSTAR target) и выбранного участка РЛИ сельской местности (MSTAR clutter);
- проводилось слияние РЛИ объекта (MSTAR target) и выбранного участка РЛИ сельской местности (MSTAR clutter).

При этом угол места съемки размещаемых РЛИ объектов (MSTAR target) соответствовал углу места съемки РЛИ сельской местности (MSTAR clutter).

Размещенные на РЛИ объекты соответствовали следующим классам: class 0 – радиоотражатель (SLICY), class 1 – бронетранспортер, class 2 – бронированная разведывательно-дозорная машина, class 3 – зенитная самоходная установка, class 4 – танк. На рис. 3 представлено изображение из сгенерированной базы данных.

Рис. 3. Пример изображения из сгенерированной базы данных

Таким образом, была сгенерирована база данных для решения задачи обнаружения и распознавания размещенных на земной поверхности объектов. Выборка состояла из 350 изображений, на каждом изображении размещено по 5 объектов. Для обучения выделено 300 изображений, для валидации и тестирования – 50 изображений. К каждому изображению подготовлен текстовый файл с координатами объектов и информации об их классе.

В работе исследовалось быстродействие и точность моделей нейронных сетей YOLO 5-го, 8-го и 11-го [14] поколений из библиотеки ultralytics[6] с разным количеством обучаемых параметров (модели nano, small, medium, large, extra large) при следующих параметрах обучения нейронных сетей:

- количество эпох обучения для всех алгоритмов – 40;
- оптимизатор – AdamW с шагом сходимости 0.001111, с моментумом, равным 0.9.

[6] Ultralytics | Revolutionizing the World of Vision AI. https://www.ultralytics.com/. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Для мониторинга процесса обучения моделей и оценки их эффективности на тренировочных и валидационных наборах данных использовались приведенные ниже метрики [9]:

1. Точность (Precision) – доля объектов, названных классификатором положительными и при этом действительно являющихся положительными:

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}, \quad (1)$$

где TP (True Positive, истинно-положительная классификация) – доля правильных классификаций о принадлежности к положительному классу, FP (ошибка 2-го рода – ложная тревога) – доля неправильных классификаций о принадлежности к положительному классу (False Positive). Эта метрика оценивает модель на наличие ошибок 2-го рода.

2. Полнота (Recall) – какую долю объектов заданного класса из всех объектов заданного класса нашел алгоритм:

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}, \quad (2)$$

где FN (ошибка 1-го рода – пропуск цели) – доля неправильных классификаций об отсутствии принадлежности к положительному классу (False Negative). Эта метрика оценивает модель на наличие ошибок 1-го рода.

Точность и полнота получены для разных порогов уверенности модели (confidence level). Эти пороги задаются вручную, и при этом одновременно оцениваются предсказание ограничивающей рамки и предсказание класса модели. Чем выше этот порог, тем меньше будет срабатываний детектора, но это позволит уменьшить ошибку 2-го рода (FP), тем самым увеличит точность, но уменьшит значение полноты. Следовательно, можно построить зависимость Precision от Recall. Средняя точность (Average Precision, AP) – это площадь под кривой Precision–Recall:

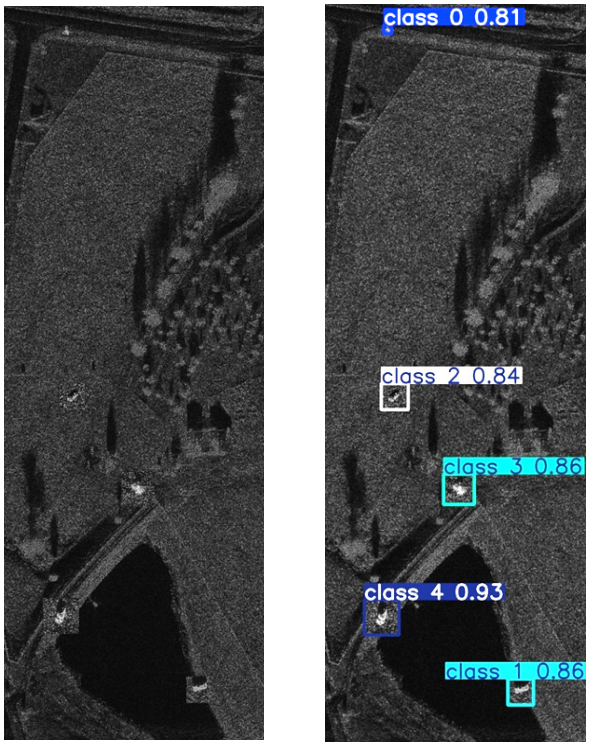
$$\text{AP} = \int_0^1 P(R)dR. \quad (3)$$

Средневзвешенная точность (mean Average Precision, mAP) – это площадь под кривой Precision–Recall, взвешенная по всем классам

$$\text{mAP} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \text{AP}(i). \quad (4)$$

Например, величина mAP50-95 – это средневзвешенная точность с учетом значений IoU ∈ [0.5; 0.95], IoU (intersection over union) – метрика степени пересечения между истинной ограничивающей рамкой и предсказанной ограничивающей рамкой. Если предсказанная рамка совпадает с истинной, тогда IoU = 1.

На рис. 4 представлен пример результата распознавания объектов на тестовом изображении.



(а) (б)

Рис. 4. Результат распознавания объектов на РЛИ с помощью модели YOLOv11s: (а) РЛИ до распознавания, (б) РЛИ после распознавания

Лучшей моделью по итогам обучения считается та модель, которая имеет наибольшую метрику mAP50-95 на валидационных данных.

В табл. 3 приведены полученные численные значения метрик при обучении нейронных сетей семейства YOLO.

В результате сравнения различных моделей YOLO по метрике оценки точности лучшие результаты показали модели YOLOv11n (0.925), YOLOv5l (0.889), YOLOv11s (0.883); по метрике полноты – YOLOv5n (0.932), YOLOv11n (0.928), YOLOv11s (0.914); по метрике mAP50 – YOLOv11s (0.961), YOLOv5n (0.954), YOLOv11n (0.953); по метрике mAP50-95 – YOLOv5n (0.756), YOLOv11s (0.74), YOLOv5l (0.727).

Результаты анализа количества операций с плавающей точкой представлены гистограммой на рис. 5.

Таблица 3. Метрики моделей нейронных сетей семейства YOLO

Модель нейронной сети	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Количество операций с плавающей точкой
YOLOv5n	0.844	**0.932**	0.954	**0.756**	7.1e9
YOLOv5s	0.76	0.808	0.871	0.649	23.8e9
YOLOv5m	0.789	0.801	0.889	0.695	64e9
YOLOv5l	0.889	0.881	0.933	0.727	134.7e9
YOLOv5x	0.725	0.802	0.844	0.678	246e9
YOLOv8n	0.748	0.84	0.897	0.65	8.1e9
YOLOv8s	0.643	0.79	0.828	0.617	28.4e9
YOLOv8m	0.739	0.832	0.871	0.678	78.7e9
YOLOv8l	0.694	0.806	0.843	0.648	164.8e9
YOLOv8x	0.772	0.821	0.895	0.697	257.4e9
YOLOv11n	**0.925**	0.928	0.953	0.725	6.3e9
YOLOv11s	0.883	0.914	**0.961**	0.74	21.3e9
YOLOv11m	0.804	0.893	0.91	0.726	67.7e9
YOLOv11l	0.566	0.7	0.761	0.573	86.6e9
YOLOv11x	0.63	0.772	0.82	0.627	194.4e9

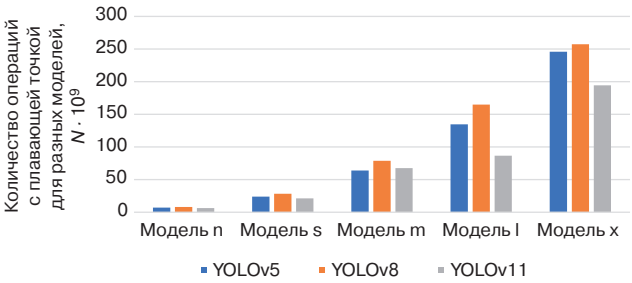


Рис. 5. Сравнение количества операций с плавающей точкой для исследуемых моделей

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что модели l и x с большим количеством операций с плавающей точкой по всем параметрам хуже, чем модели n, s и m, что связано с недообучением моделей l и x.

Относительно значений метрик mAP50 и mAP50-95 лучшие результаты показали YOLOv5n, YOLOv11n и YOLOv11s. В работе [10] для исследования точности распознавания использовались модели FasterRCNN (mAP50 = 0.8786), RetinaNet (mAP50 = 0.916) и различные модификации YOLOv5: YOLOv5 базовая (mAP50 = 0.9169), YOLOv5 модифицированная (mAP50 = 0.9555). В табл. 4 приведены значения метрики mAP50 для сравнения моделей нейронных сетей YOLO.

Таблица 4. Метрика mAP50 моделей нейронных сетей

Модель нейронной сети	mAP50
YOLOv5n	0.954
YOLOv11n	0.953
YOLOv11s	**0.961**

На основе данных табл. 4 можно сделать вывод о том, что модели YOLO 11-го поколения хорошо показывают себя при решении задачи обнаружения и распознавания наземных объектов на РЛИ.

На рис. 6 изображена матрица ошибок для нейронной сети YOLOv11s, которая показывает, сколько ошибочных классификаций допустила модель.

Слева обозначены классы по предсказаниям модели, снизу – истинные классы. Помимо 5 классов, распознаваемых объектов, также имеется класс заднего фона (background), который показывает ошибки классификации фона.

Логично предположить, что изображения радиоотражателей чаще остальных будут классифицированы как фон, т.к. они имеют небольшую, в сравнении с остальными классами, эффективную площадь рассеяния.

Предсказывая класс 1, модель YOLOv11s имела наибольшую ошибку 1-го рода: 5 из 50 были классифицированы как класс 2, 6 из 50 были классифицированы как класс 4. Наибольшую ошибку 2-го рода имеет класс 4: 6 объектов класса 1, 3 объекта класса 3 и 3 фрагмента с задним фоном были отнесены к классу 4.

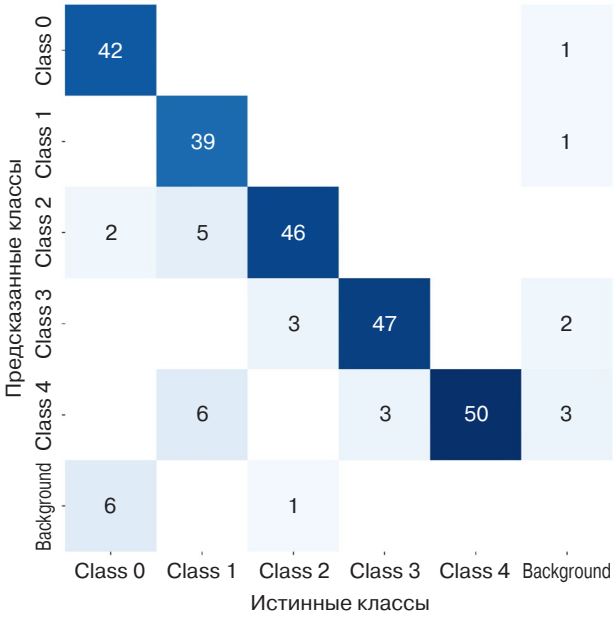


Рис. 6. Матрица ошибок нейронной сети YOLOv11s

Для оценки возможности применения нейронных сетей на МК [15] сравнивалось количество операций, которые требуют модели YOLO с количеством операций в секунду, которые может обеспечить МК. За основу взят МК Firefly ROC-RK3588S-PC (Firefly Technology Co., Китай), на борту которого имеется нейронный процессор RK3588, обеспечивающий быстродействие до 6 TOPS (Tera Operations per Second – Тера-операций в секунду)[7].

Вычислительный ресурс, потребляемый моделями нейронных сетей при подаче на вход одного изображения, можно выразить через параметр GFLOPs (Giga Float Operations – Гига-операций с плавающей точкой). Для релевантной оценки необходимо привести TOPS к формату с операциями с плавающей запятой, т.к. величина TOPS определяет количество операций в секунду[8], а GFLOPs определяет количество операций с плавающей точкой с поступающим на вход изображением. Производительность 4 TOPS приблизительно равна производительности 1 TFLOPS[9], следовательно, преобразовав 6 TOPS, получим 1.5 TFLOPS. Таким образом, быстродействие МК ROC-RK3588S-PC позволяет устанавливать модели YOLOv5n (7.1 GFLOPs), YOLOv11n (6.3 GFLOPs), YOLOv11s (21.3 GFLOPs), обеспечивая быстродействие более 10 кадров в секунду, что является положительным результатом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что из рассмотренных моделей нейронных сетей наилучший результат по приведенным метрикам дают следующие модели: YOLOv5n, YOLOv5l, YOLOv11n, YOLOv11s. Разница значений метрик mAP50-95 между моделями YOLOv5l и YOLOv11n составляет ~0.003. Разница значений метрик Precision между моделями YOLOv5l и YOLOv11s составляет ~0.006. Разница в вычислительных затратах составляет ~10^2 операций с плавающей точкой, что оказывает существенное влияние на быстродействие. Таким образом, были выбраны следующие модели: YOLOv5n, YOLOv11n, YOLOv11s. Анализ вычислительных затрат моделей и оценка быстродействия МК ROC-RK3588S-PC позволяют сделать вывод о возможности установки этих моделей на МК для работы в режиме реального времени.

Вклад авторов

А.С. Красноперова – проведение исследования, интерпретация и обобщение результатов, написание текста статьи.

А.С. Твердохлебов – интерпретация результатов исследований, подготовка выводов.

А.А. Карташов – определение темы исследования и обсуждение финального текста статьи.

В.И. Вебер – планирование исследования, интерпретация результатов, научное редактирование статьи.

В.Ю. Куприц – постановка целей и задач исследования, методов машинного обучения.

Authors' contributions

A.S. Krasnoperova – conducting research, interpreting and summarizing results, writing the text of the article.

[7] ROC-RK3588S-PC 8-Core 8K AI Mainboard. https://www.rock-chips.com/a/cn/product/RK35xilie/2022/0926/1656.html. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

[8] What is TOPS and TeraFLOPS in AI? https://www.candtsolution.com/news_events-detail/tops-and-teraflops-in-AI/#:~:text=What%20is%20TOPS%20in%20AI,peak%20performance%20of%20AI%20hardware. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

[9] What Is The Relationship Between the Units of Tops and Flops? https://premioinc.com/blogs/blog/what-is-tops-and-teraflops-in-ai. Дата обращения 02.12.2024. / Accessed December 02, 2024.

A.S. Tverdokhlebov – interpreting research results, preparing conclusions.

A.A. Kartashov – defining the research topic and discussing the final text of the article.

V.I. Weber – planning the research, interpreting results, scientific editing of the article.

V.Y. Kuprits – setting the aims and objectives of the research, methods of machine learning.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malmgren-Hansen D., Engholm R., Østergaard Pedersen M. Training Convolutional Neural Networks for Translational Invariance on SAR ATR. In: *Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. IEEE; 2016. P. 459–462.
2. Cruz H., Véstias M.P., Monteiro J., et al. A Review of Synthetic-Aperture Radar Image Formation Algorithms and Implementations: A Computational Perspective. *Remote Sens.* 2022;14(5):1258. https://doi.org/10.3390/rs14051258
3. Ильин Е.М., Полубехин А.И., Савостьянов В.Ю., Самарин О.Ф., Черевко А.Г. Малогабаритный многофункциональный бортовой РЛК для беспилотных летательных аппаратов малой дальности. *Вестник СибГУТИ*. 2017;4:104–109. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30793295
4. Поль В.Г., Симонов А.В. Космическая радиолокационная съемка рельефа и совместный полет пары космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2020;7:1–21. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1999, https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43566045
5. Хахулина Н.Б. *Системы сбора и обработки информации результатов геодезических изысканий и дистанционного зондирования*. Воронеж: Воронежский государственный технический университет; 2022. 78 с.
6. *Радиолокационные станции воздушной разведки*; под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Воениздат; 1983. 154 с.
7. *Радиолокационные системы многофункциональных самолетов:* в 3 т. Т. 1. *РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов*; под ред. А.И. Канащенкова, В.И. Меркулова. М.: Радиотехника; 2006. 656 с.
8. Купряшкин И.Ф., Мазин А.С. Классификация объектов военной техники с использованием сверточной нейронной сети на радиолокационных изображениях, сформированных в условиях шумовых помех. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2022;1:71–81. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48138675
9. Chen D., Ju R., Tu C., Long G., Liu X., Liu J. GDB-YOLOv5s: Improved YOLO-based Model for Ship Detection in SAR Images. *IET Image Process*. 2024;18(11):2869–2883. https://doi.org/10.1049/ipr2.13140
10. Song Y., Wang S., Li Q., Mu H., Feng R., Tian T., Tian J. Vehicle Target Detection Method for Wide-Area SAR Images Based on Coarse-Grained Judgment and Fine-Grained Detection. *Remote Sens*. 2023;15(13):3242. https://doi.org/10.3390/rs15133242
11. Zhang T., Zhang X., Li J., Xu X., Wang B., Zhan X., Xu Y., Ke X., Zeng T., Su H., et al. SAR Ship Detection Dataset (SSDD): Official Release and Comprehensive Data Analysis. *Remote Sens*. 2021;13(18):3690. https://doi.org/10.3390/rs13183690
12. Карманова Н.А., Карманов А.Г., Петров А.А. Разработка модели радара с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата для дистанционного зондирования лесных массивов. *Информация и Космос*. 2021;4:114–122. https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=esiivj
13. Брызгалов А.П., Ковальчук И.В., Хныкин А.В., Шевела И.А., Юсупов Р.Г. Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задач его внутреннего и внешнего проектирования. *Труды МАИ*. 2011;43:25. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15632049
14. Terven J., Córdova-Esparza D.-M., Romero-González J.-A. A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: from YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Mach. Learn. Knowl. Extr*. 2023;5(4):1680–1716. https://doi.org/10.3390/make5040083
15. Baller S., Jindal A., Chadha M., Gerndt M. DeepEdgeBench: benchmarking deep neural networks on edge devices. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Cloud Engineering* (*IC2E*). IEEE; 2021. P. 20–30. https://doi.org/10.1109/IC2E52221.2021.00016

REFERENCES

1. Malmgren-Hansen D., Engholm R., Østergaard Pedersen M. Training Convolutional Neural Networks for Translational Invariance on SAR ATR. In: *Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. IEEE; 2016. P. 459–462.
2. Cruz H., Véstias M.P., Monteiro J., et al. A Review of Synthetic-Aperture Radar Image Formation Algorithms and Implementations: A Computational Perspective. *Remote Sens.* 2022;14(5):1258. https://doi.org/10.3390/rs14051258
3. Il'in E.M., Polubekhin A.I., Savostyanov V.Yu., Samarin O.F., Cherevko A.G. Airborne multi-functional radar complex for shot-range UAVs. *Vestnik SibGUTI = The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2017;4:104–109 (in Russ.). https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30793295
4. Paul V.G., Simonov A.V. Space radar terrain survey and the joint flight of a spacecraft pair. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation.* 2020;7:1–21 (in Russ.). https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1999, https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43566045

5. Khakhulina N.B. *Sistemy sbora i obrabotki informatsii rezul'tatov geodezicheskikh izyskanii i distantsionnogo zondirovaniya* (*Systems of Information Collection and Processing of Geodetic Surveys and Remote Sensing Results*). Voronezh: Voronezh State Technical University; 2022. 78 p. (in Russ.).
6. Kondratenkov G.S. (Ed.). *Radiolokatsionnye stantsii vozdushnoi razvedki* (*Airborne Reconnaissance Radar Stations*). Moscow: Voenizdat; 1983. 154 p. (in Russ.).
7. Kanaschenkov A.I., Merkulov V.I. (Eds.). *Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktsional'nykh samoletov:* V 3 t. T. 1. *RLS – informatsionnaya osnova boevykh deistvii mnogofunktsional'nykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov* (*Radar Systems of Multi-Functional Aircraft:* in 3 v. V. 1. *Radar Systems – Information Basis for Combat Operations of Multi-Functional Aircraft. Systems and Algorithms for Primary Processing of Radar Signals*). Moscow: Radiotekhnika; 2006. 656 p. (in Russ.).
8. Kupryashkin I.F., Mazin A.S. Classification of military equipment targets on radar images generated in noise interference conditions using a convolutional neural network. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antey.* 2022;1:71–81 (in Russ.). https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48138675
9. Chen D., Ju R., Tu C., Long G., Liu X., Liu J. GDB-YOLOv5s: Improved YOLO-based Model for Ship Detection in SAR Images. *IET Image Process*. 2024;18(11):2869–2883. https://doi.org/10.1049/ipr2.13140
10. Song Y., Wang S., Li Q., Mu H., Feng R., Tian T., Tian J. Vehicle Target Detection Method for Wide-Area SAR Images Based on Coarse-Grained Judgment and Fine-Grained Detection. *Remote Sens*. 2023;15(13):3242. https://doi.org/10.3390/rs15133242
11. Zhang T., Zhang X., Li J., Xu X., Wang B., Zhan X., Xu Y., Ke X., Zeng T., Su H., et al. SAR Ship Detection Dataset (SSDD): Official Release and Comprehensive Data Analysis. *Remote Sens*. 2021;13(18):3690. https://doi.org/10.3390/rs13183690
12. Karmanova N.A., Karmanov A.G., Petrov A.A. Development of a synthetic aperture radar model for unmanned aerial vehicles for remote sensing of woodlands. *Informatsiya i Kosmos = Information and Space*. 2021;4:114–122 (in Russ.). https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=esiivj
13. Bryzgalov A.P., Koval'chuk I.V., Khnykin A.V., Shevela I.A., Yusupov R.G. Simulation of Synthetic Aperture Radar Assigned to Solving the Problems of Its Internal and External Design. *Trudy MAI.* 2011;43:25 (in Russ.). https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15632049
14. Terven J., Córdova-Esparza D.-M., Romero-González J.-A. A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: from YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Mach. Learn. Knowl. Extr*. 2023;5(4):1680–1716. https://doi.org/10.3390/make5040083
15. Baller S., Jindal A., Chadha M., Gerndt M. DeepEdgeBench: benchmarking deep neural networks on edge devices. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Cloud Engineering* (*IC2E*). IEEE; 2021. P. 20–30. https://doi.org/10.1109/IC2E52221.2021.00016

Об авторах

Красноперова Алена Сергеевна, инженер студенческого конструкторского бюро «Интеллектуальные радиотехнические системы», кафедра радиотехнических систем, ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, д. 40). E-mail: alenacergeevna2@icloud.com. SPIN-код РИНЦ 9055-6959, https://orcid.org/0009-0001-5568-8290

Твердохлебов Александр Сергеевич, инженер студенческого конструкторского бюро «Интеллектуальные радиотехнические системы», кафедра радиотехнических систем, ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, д. 40). E-mail: tverdohlebov.a.923-@e.tusur.ru. https://orcid.org/0009-0008-2250-6375

Карташов Алексей Андреевич, инженер студенческого конструкторского бюро «Интеллектуальные радиотехнические системы», кафедра радиотехнических систем, ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, д. 40). E-mail: kartashov.a.923-m@e.tusur.ru. https://orcid.org/0009-0009-6005-7539

Вебер Владислав Игоревич, аспирант, ассистент кафедры радиотехнических систем, ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, д. 40). E-mail: vladweber00@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 3880-2107, https://orcid.org/0000-0002-0275-4127

Куприц Владимир Юрьевич, к.т.н., доцент, руководитель студенческого конструкторского бюро «Интеллектуальные радиотехнические системы», кафедра радиотехнических систем, ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, д. 40). E-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru. SPIN-код РИНЦ 4855-3318, https://orcid.org/0000-0001-7190-3213

About the Authors

Alena S. Krasnoperova, Engineer of the Student Design Bureau of Intelligent Radio Engineering Systems, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: alenacergeevna2@icloud.com. RSCI SPIN-code 9055-6959, https://orcid.org/0009-0001-5568-8290

Alexander S. Tverdokhlebov, Engineer of the Student Design Bureau of Intelligent Radio Engineering Systems, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: tverdohlebov.a.923-@e.tusur.ru. https://orcid.org/0009-0008-2250-6375

Alexey A. Kartashov, Engineer of the Student Design Bureau of Intelligent Radio Engineering Systems, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: kartashov.a.923-m@e.tusur.ru. https://orcid.org/0009-0009-6005-7539

Vladislav I. Weber, Postgraduate Student, Assistant, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: vladweber00@gmail.com. RSCI SPIN-code 3880-2107, https://orcid.org/0000-0002-0275-4127

Vladimir Y. Kuprits, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Student Design Bureau of Intelligent Radio Engineering Systems, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru. RSCI SPIN-code 4855-3318, https://orcid.org/0000-0001-7190-3213

Russian Technological Journal.
2025;13(4):37–46

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

УДК 538.955
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46
EDN WYJGOZ

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Измерение магнитострикции тензометрическим мостом с переменным возбуждением

Д.А. Бурдин @

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
@ *Автор для переписки, e-mail: phantastic@mail.ru*

• **Поступила:** 21.11.2024 • **Доработана:** 15.01.2025 • **Принята к опубликованию:** 20.05.2025

Резюме

Цели. Знание зависимости магнитострикции различных ферромагнитных материалов от магнитного поля важно для исследования магнитоэлектрического эффекта в композитных структурах, в частности для расчета формы полевой зависимости пьезомагнитных модулей и расчета магнитоупругих характеристик. Наиболее распространенным методом измерения магнитострикционного удлинения является использование тензорезистивных датчиков. Однако типичный уровень разрешения известных тензорезистивных установок для измерения магнитострикции составляет около 10^{-6}, что недостаточно для получения детальной информации о пьезомагнитных коэффициентах исследуемых материалов. Цель работы – разработка автоматизированной установки для прецизионного измерения зависимости магнитострикции ферромагнитных пластин от магнитного поля в диапазоне ±5 кЭ с улучшенным на порядок разрешением по деформации.

Методы. В установке использованы пленочные тензорезистивные датчики, включенные в мост Уитстона, возбуждаемый переменным током. Благодаря примененному методу переноса частоты сигнала, а также применению малошумящего предусилителя и температурной стабилизации измерительной ячейки, удалось уменьшить уровень приведенных ко входу шумов и дрейфа нуля измерительной схемы.

Результаты. Созданная установка обеспечивает на порядок более высокую точность измерения магнитострикции ферромагнитных пластин, чем известные, до 10^{-7} в диапазоне магнитных полей ±5 кЭ. Установка позволяет измерять также электро- и пьезодеформацию материалов в зависимости от приложенного электрического напряжения в диапазоне ±500 В. Результаты измерений дают возможность более точно рассчитать полевые зависимости пьезомагнитных и пьезоэлектрических коэффициентов материалов, в т.ч. материалов с малой величиной магнитострикции, таких как различные ферриты, гематит, железо-иттриевый гранат и др.

Выводы. Применение метода переменного возбуждения измерительного моста в совокупности с другими мерами позволило повысить разрешение по деформации, которое составило около 10^{-7}.

Ключевые слова: магнитострикция, тензометр, деформация, магнитоэлектрический эффект, композитная структура

© Д.А. Бурдин, 2025

Для цитирования: Бурдин Д.А. Измерение магнитострикции тензометрическим мостом с переменным возбуждением. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):37–46. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46, https://www.elibrary.ru/WYJGOZ

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Measurement of magnetostriction using a strain gauge bridge with alternating excitation

Dmitry A. Burdin [@]

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

• **Submitted:** 21.11.2024 • **Revised:** 15.01.2025 • **Accepted:** 20.05.2025

Abstract

Objectives. Knowledge of the dependence of magnetostriction of various ferromagnetic materials on the magnetic field is important for studying the magnetoelectric effect in composite structures, in particular for calculating the shape of the field dependence of piezomagnetic moduli and for calculating magnetoelastic characteristics. However, the typical resolution level of known strain gauge setups for measuring magnetostriction is about 10^{-6}, which is insufficient to obtain detailed information on the piezomagnetic coefficients of the materials under study. The paper describes the development of an automated setup for the precision measurement of the dependence of magnetostriction of ferromagnetic plates on a magnetic field in the range of ±5 kOe providing an improved strain resolution order of magnitude.

Methods. The setup uses film strain gauges included in a Wheatstone bridge excited by alternating current. Thanks to the applied method of signal frequency shift, as well as the use of a low-noise preamplifier and temperature stabilization of the measuring cell, it was possible to reduce the level of noise referred to the input and zero drift of the measuring circuit.

Results. The developed setup provides an accuracy of the magnetostriction measurement of ferromagnetic plates up to 10^{-7} in the range of magnetic fields of ±5 kOe, which is an order of magnitude higher than known methods. The setup also allows measuring the electric and piezoelectric deformation of materials depending on the applied electrical voltage in the range of ±500 V. The measurement results can be used to more accurately calculate the field dependencies of the piezomagnetic and piezoelectric coefficients of materials, including materials with low magnetostriction, such as various ferrites, hematite, yttrium iron garnet, etc.

Conclusions. The method of alternating excitation of the measuring bridge in combination with other measures can be used to increase the deformation resolution to about 10^{-7}.

Keywords: magnetostriction, strain gauge, deformation, magnetoelectric effect, composite structure

For citation: Burdin D.A. Measurement of magnetostriction using a strain gauge bridge with alternating excitation. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):37–46. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46, https://www.elibrary.ru/WYJGOZ

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

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитострикцией называют изменение линейных размеров ферромагнетика при изменении его намагниченности. Одной из основных характеристик магнитострикции является магнитострикция насыщения λ_{sat}, равная относительному удлинению образца в поле магнитного насыщения H_s. Однако более полно свойства магнитострикции описывает зависимость относительного удлинения от магнитного поля $\lambda(H)$. Измерение зависимости магнитострикции различных ферромагнитных материалов от магнитного поля важно для исследований магнитоэлектрических (МЭ) эффектов в композитных структурах, содержащих ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои, и разработки новых смарт-устройств [1–3]. Магнитоэлектрические эффекты в таких структурах возникают из-за взаимодействия механически связанных ФМ- и ПЭ-слоев при воздействии внешних электрических и магнитных полей.

Типичные МЭ-структуры и составляющие их слои представляют собой пластины с размерами в плоскости ~5 × 20 мм и толщиной в десятки и сотни микрометров. В качестве материала ФМ-слоев применяют Ni ($\lambda_{sat} = -30 \cdot 10^{-6}$), Terfenol-D ($\lambda_{sat} = 2000 \cdot 10^{-6}$), аморфные сплавы состава FeBSiC ($\lambda_{sat} = 20–30 \cdot 10^{-6}$), FeCoV ($\lambda_{sat} = 70 \cdot 10^{-6}$), галфенол ($\lambda_{sat} = 30–90 \cdot 10^{-6}$). В последнее время интерес исследователей привлекает возможность создания МЭ-структур с монокристаллическими слоями из ферро- и антиферромагнетиков, обладающих меньшей магнитострикцией ($\lambda_{sat} < 10^{-5}$). Основными методами прямого измерения магнитострикции являются тензорезистивный [4–8] и дилатометрический [9]. Дилатометры по принципу работы делятся на емкостные [10, 11] и оптические [12–14]. Наиболее подходящим для исследования магнитострикции плоских ФМ-образцов и композитных структур является тензорезистивный метод: на образец наклеивают тензочувствительный резистор, который включают в измерительный мост. Этот метод широко применяется для измерения магнитострикции благодаря дешевизне и простоте подготовки образцов. К недостаткам данного метода можно отнести ограниченную применимость для измерения магнитострикции пленок.

Измерительный мост в таких схемах, как правило, питают от источника постоянного напряжения (тока), что накладывает ограничения на минимальную разрешаемую величину деформации. Подобные тензометры имеют типичный размах входного шума в $(2–5) \cdot 10^{-6}$ [15–17], что приемлемо для исследования материалов с большой магнитострикцией насыщения $\lambda_{sat} > 10^{-5}$, но не позволяет исследовать материалы с малой магнитострикцией. Поэтому актуальной задачей является создание установки с более высоким разрешением.

Цель данной работы состояла в разработке установки для измерения магнитострикции тензорезистивным методом с повышенным разрешением – лучше, чем 10^{-6}. В первой части статьи описана конструкция установки, затем следует описание принципа действия и приводится анализ шумов, определяющих ее разрешающую способность. Завершающая часть работы посвящена практической проверке достигнутого уровня входных шумов и демонстрации измерения магнитострикции и электрострикции реальных образцов.

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Внешний вид установки для измерения магнитострикции показан на рис. 1. Она состоит из 3 основных частей (рис. 2): магнитной системы, измерительной ячейки и контрольно-измерительного блока (КИБ). Магнитная система служит для создания постоянного магнитного поля величиной от 0 до 5 кЭ и представляет собой лабораторный электромагнит с установленными в магнитный зазор измерительной ячейкой на подвижном основании и зондом с датчиком Холла. Подвижное основание ячейки служит для позиционирования ячейки в зазоре электромагнита, а также для оперативного извлечения образца (платы образца). Перемещение ячейки осуществляется с помощью каретки, двигающейся по рельсовой направляющей, установленной между обмотками электромагнита.

Для питания электромагнита использован стандартный лабораторный источник питания в паре с устройством коммутации, обеспечивающим переключение полярности магнитного поля. Измерение магнитного поля проводили лабораторным гауссметром Lake Shore 421 (Lake Shore, США).

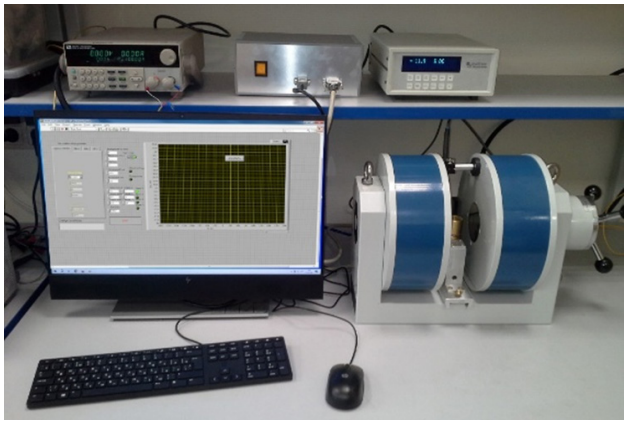


Рис. 1. Внешний вид установки для измерения магнитострикции

Исследуемый образец с приклеенным на его поверхность тензодатчиком помещается на съемную плату измерительной ячейки. Выводы тензодатчика припаиваются к контактным площадкам, формируя совместно с распложенными на этой плате резисторами мост Уитстона. На этой же плате реализованы цепи балансировки (на основе проволочного потенциометра), а также предварительный усилитель.

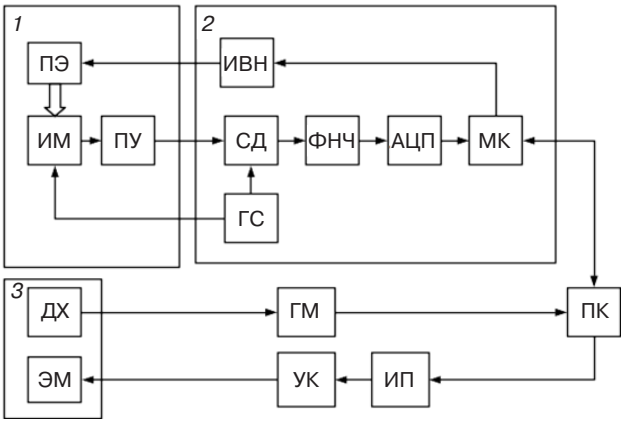


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения магнитострикции: *1* – измерительная ячейка, *2* – КИБ, *3* – магнитная система; ПЭ – ПЭ-элемент, ИМ – измерительный мост, ПУ – предусилитель, СД – синхронный детектор, ИВН – источник высокого напряжения, ГС – генератор сигналов, ФНЧ – фильтр нижних частот, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер, ДХ – датчик Холла, ЭМ – электромагнит, ГМ – гауссметр, УК – устройство коммутации, ИП – источник питания электромагнита, ПК – персональный компьютер

На рис. 3 показана ячейка на основании (электромагнит дан в разрезе). Корпус ячейки имеет форму цилиндра и может поворачиваться вокруг вертикальной оси на 180° с помощью съемной рукояти, что позволяет измерять ориентационные зависимости. Угол установки ячейки измеряется по шкале на боковой (цилиндрической) поверхности ее корпуса.

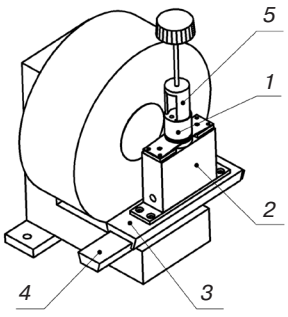
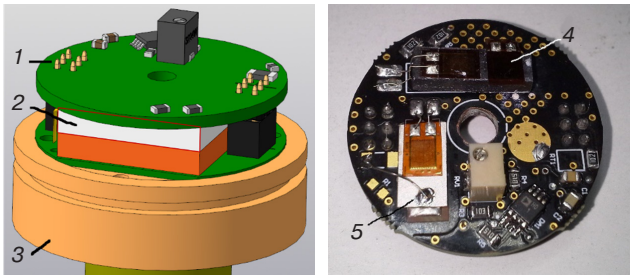


Рис. 3. Ячейка на основании (конструкция и внешний вид): *1* – ячейка, *2* – основание-радиатор, *3* – каретка ячейки, *4* – рельс основания, *5* – съемная рукоять

На рис. 4а показана съемная плата предусилителя. Плата с образцом устанавливается на верхнюю поверхность элемента Пельтье и подключается к базовой плате с помощью двух малогабаритных шестиконтактных штыревых разъемов. Термоэлектрический элемент используется для стабилизации температуры платы с образцом с точностью до 0.01 °C. Электрический кабель, связывающий ячейку с КИБ, подключается к базовой плате и термоэлементу с помощью выводов на нижней части корпуса ячейки. Предусилитель выполнен на основе малошумящего интегрального инструментального усилителя INA849 (Texas Instruments, США).

Контрольно-измерительный блок служит для детектирования и оцифровки измерительного сигнала, стабилизации температуры платы с образцом, питания измерительного моста переменным напряжением с частотой 410 Гц и амплитудой до 4 В, а также для формирования постоянного напряжения от −500 до 500 В для исследования электрострикционных и ПЭ-образцов. Конструктивно КИБ выполнен в настольном корпусе с размерами 300 × 150 × 100 мм. Соединение КИБ и ячейки осуществляется 15-контактным сигнальным кабелем.



(а) (б)

Рис. 4. Конструкция ячейки (а) и внешний вид съемной платы усилителя (б): *1* – плата усилителя, *2* – элемент Пельтье, *3* – основание ячейки, *4* – ФМ-образец с тензодатчиком, *5* – пьезоэлемент с тензодатчиком

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЕНЗОМЕТРА

Измерение удлинения образца осуществляется с помощью стандартных тензорезистивных датчиков. Фольговый тензорезистивный датчик представляет собой меандровую решетку из тонкой металлической пленки, выполненную на бумажной или полиимидной подложке. Датчик приклеивается на поверхность образца с учетом направления чувствительности. На рис. 5 показаны два основных способа включения тензодатчиков.

Здесь одно плечо моста выполнено с помощью двух резисторов с одинаковым сопротивлением R, а другое плечо – из двух тензодатчиков S1 и S2.

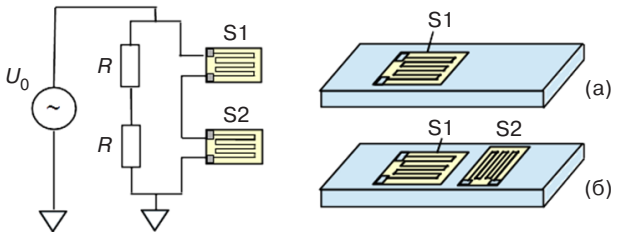


Рис. 5. Тензоизмерительный полумост:
(а) с одним активным датчиком,
(б) с двумя активными датчиками

В первом случае на образец наклеивается только один датчик (S1), а второй (S2) лишь дополняет плечо измерительного моста. Эта конфигурация используется при необходимости избирательно измерять удлинение в одном направлении. Если деформация направлена вдоль стороны образца, то можно применить вторую конфигурацию, когда опорный датчик S2 наклеивается на образец (на ту же поверхность либо на обратную) под углом 90° к первому.

На рис. 6 приведена функциональная схема аналоговой части сигнального тракта тензометра, которая состоит из предусилителя K_{amp}, демодулятора на микросхеме AD630 (Analog Devices, Inc., США) и фильтра нижних частот. Рассмотрим преобразование сигнала от измерительного моста до входа АЦП. Мост питается гармоническим напряжением u_b с амплитудой U_0 и частотой ω_0: $u_b = U_0\cos(\omega_0 t)$, где t – время. Можно показать, что напряжение разбаланса моста $u_{s.m.} \approx u_b\delta R/4$, где δR – изменение сопротивления тензодатчика.

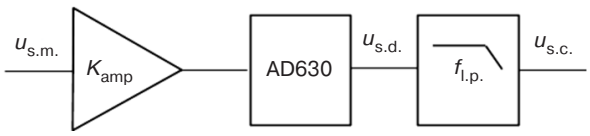


Рис. 6. Аналоговая часть входного измерительного тракта. $u_{s.m.}$ – напряжение рассогласования моста, $u_{s.d.}$ – сигнал на выходе демодулятора, $f_{l.p.}$ – частота среза фильтра нижних частот, $u_{s.c.}$ – сигнал на входе АЦП

Пусть деформация $\varepsilon = \varepsilon_0\cos(\omega t)$, происходит периодически с частотой $\omega < \omega_0$, при этом $\delta R = G\varepsilon_0\cos(\omega t)$, где ε_0 – амплитуда деформации, $G \approx 2$ – коэффициент тензочувствительности датчика. Напряжение рассогласования моста будет равно:

$$u_{s.m.} \approx \frac{u_b\delta R}{4} = \frac{U_0\cos(\omega_0 t)G\varepsilon_0\cos(\omega t)}{4} = \frac{\frac{1}{2}U_0G\varepsilon_0(\cos((\omega_0-\omega)t)+\cos((\omega_0+\omega)t))}{4}. \quad (1)$$

Таким образом, полезный сигнал, пропорциональный изменению сопротивления тензорезистора с образцом, модулирует амплитуду напряжения. В результате спектр сигнала переносится на частоты $(\omega_0 + \omega)$ и $(\omega_0 - \omega)$ в правую и левую боковые полосы. В случае постоянной деформации ($\omega \approx 0$) выражение (1) упрощается:

$$u_{s.m.} \approx \frac{u_b\delta R}{4} = \frac{U_0\cos(\omega_0 t)G\varepsilon_0}{4}. \quad (2)$$

Сигнал $u_{s.m.}$ усиливается предусилителем с коэффициентом усиления $K_{amp} \approx 1000$ и подается на вход синхронного демодулятора, выполненного на микросхеме AD630. Сигнал на выходе демодулятора:

$$u_{s.d.}(\omega) = K_{amp}u_{s.m.}(\omega)\cos(\omega_0 t) = \frac{K_{amp}U_0\cos(\omega t)G\varepsilon_0\cos^2(\omega_0 t)}{4} = \left[\frac{K_{amp}U_0G\varepsilon_0}{8}(1+2\cos(\omega_0 t))\right]_{\omega=0}, \quad (3)$$

т.е., восстанавливается изначальный сигнал и возникает дополнительная компонента с частотой $2\omega_0$. Расположенный после детектора фильтр нижних частот 3-го порядка (ФНЧ) с полосой пропускания $\omega_{l.p.} << \omega_0$ ($\omega_{l.p.} \approx 14$ Гц) отсекает высокочастотные компоненты сигнала перед аналого-цифровым преобразованием. Передаточная характеристика фильтра:

$$K_{l.p.} = \frac{1}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{l.p.}}\right)}\right)^3}. \quad (4)$$

В итоге сигнал на входе АЦП равен:

$$u_{s.c.}(\omega) = \frac{K_{amp}K_{l.p.}U_0G\varepsilon_0\cos(\omega t)}{8} = \left[\frac{K_{amp}K_{l.p.}U_0G\varepsilon_0}{8}\right]_{\omega=0}. \quad (5)$$

После оцифровки сигнал сглаживается по алгоритму простого скользящего среднего, величина окна настраивается в пределах 1–250 выборок, частота оцифровки – 250 $с^{-1}$.

АНАЛИЗ ШУМОВ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

При анализе электрических шумов в схеме тензометра будем учитывать только входные шумы, т.к. предусилитель имеет высокий коэффициент

усиления (около 1000), и влияние шумов последующих звеньев пренебрежимо мало. Рассмотрим возможные источники этих шумов.

Тепловой шум. Тепловой шум (шум Найквиста) вызван тепловыми колебаниями носителей зарядов в проводниках и генерируется всегда, независимо от протекающего тока. Спектр теплового шума широкополосный и равномерный, спектральная плотность мощности резистора сопротивлением R дается следующим выражением [18]:

$$S_{\text{n}} = 4\text{k}TR, \tag{6}$$

где S_{n} – спектральная плотность напряжения теплового шума $\left(\text{В}/\sqrt{\text{Гц}}\right)$, $\text{k} = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Тепловой шум характерен для всех сопротивлений и на схеме (рис. 7) обозначен как источник S_{n}.

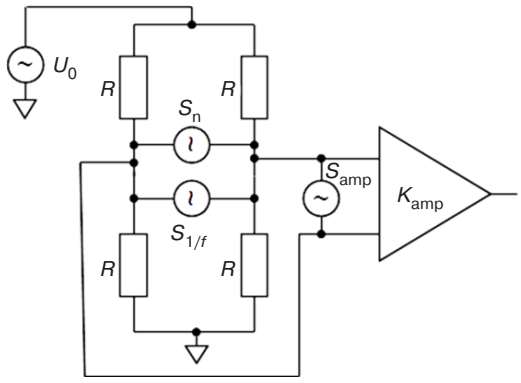


Рис. 7. Основные источники шума во входных цепях. S_{amp} – шум усилителя

Фликер-шум (1/*f*). Фликер-шум характерен специфической частотной зависимостью спектральной плотности, в общем случае она описывается формулой [19]:

$$S_{1/f} = \sqrt{\frac{CR^{\beta}I^{\beta}}{f^{\gamma}}}, \tag{7}$$

где $S_{1/f}$ – спектральная плотность напряжения фликер-шума $\left(\text{В}/\sqrt{\text{Гц}}\right)$; C, β и γ – коэффициенты; I – сила протекающего тока; f – частота. Для металлических пленок при относительно небольших значениях плотности тока можно принять $\beta = 2, \gamma = 1$. Считается, что фликер-шум проводника эквивалентен изменению его сопротивления в результате флуктуации подвижности носителей заряда при рассеянии на решетке либо флуктуации равновесной температуры [20]. Фликер-шум на рис. 7 обозначен источником $S_{1/f}$.

Шум усилителя. Под шумом усилителя понимается шум совокупности всех источников в составе инструментального усилителя, представленный в виде эквивалентного источника шумового напряжения, расположенного на входе усилителя (S_{amp} на рис. 7). Плотность токового шума для данной микросхемы составляет около $1.1\ \text{пА}/\sqrt{\text{Гц}}$, так что с учетом низкого импеданса входных цепей им можно пренебречь.

Таким образом, источники электрического шума в схеме на рис. 7 можно разделить на 2 типа: аддитивные и мультипликативные. Аддитивные шумы представляют собой шум напряжения и тока, они не модулируют сигнал накачки, и их спектр не изменяется. Мультипликативный шум – флуктуации сопротивлений резисторов моста – вызывает изменение баланса моста, в результате амплитудной модуляции (АМ) его функция спектральной плотности преобразуется подобно полезному сигналу. Пусть S_{in} – спектральная плотность напряжения шума на входе усилителя при постоянном напряжении питания моста, при питании моста переменным напряжением с частотой ω она преобразуется в $S_{\text{in.mod.}}$:

$$\begin{aligned} S_{\text{in}}^2 &= S_{\text{n}}^2(\omega) + S_{\text{amp}}^2(\omega) + S_{1/f}^2(\omega) \overset{\text{AM}}{\rightarrow} S_{\text{in.mod.}}^2(\omega) = \\ &= S_{\text{n}}^2(\omega) + S_{\text{amp}}^2(\omega) + \frac{1}{4}S_{1/f}^2(\omega_0 - \omega) + \\ &+ \frac{1}{4}S_{1/f}^2(\omega_0 + \omega). \end{aligned} \tag{8}$$

Здесь мы воспользовались тем фактом, что для сбалансированного моста выходной шум эквивалентен шуму одного из резисторов. Можно показать, что спектральная плотность шума на выходе демодулятора S_{d} описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} S_{\text{d}}^2(\omega) &= K_{\text{amp}}^2 \times \\ &\times \left(\frac{1}{2}S_n^2(\omega + \omega_0) + \frac{1}{2}S_{\text{amp}}^2(\omega + \omega_0) + \frac{1}{4}S_{1/f}^2(\omega)\right). \end{aligned} \tag{9}$$

Спектральная плотность шума на входе АЦП составляет:

$$\begin{aligned} S_{\text{in.conv.}}^2(\omega) &= K_{\text{amp}}^2 K_{\text{l.p.}}^2 \times \\ &\times \left(\frac{1}{2}S_{\text{n}}^2(\omega + \omega_0) + \frac{1}{2}S_{\text{amp}}^2(\omega + \omega_0) + \frac{1}{4}S_{1/f}^2(\omega)\right). \end{aligned} \tag{10}$$

Оценить разрешающую способность тензометра можно по уровню суммарного шума. Чтобы найти величину шумового напряжения u_{Σ}, приведенного ко входу (referred to input, RTI), необходимо проинтегрировать выражение (10) и разделить на коэффициент усиления:

$$u_\Sigma = \frac{\int_{\omega_l}^{\omega_h} S^2_{\text{in.conv.}}(\omega)d\omega}{K_{\text{amp}}} = \sqrt{\int_{\omega_l}^{\omega_h}\left(K^2_{\text{l.p.}}\frac{1}{4}S^2_{1/f}(\omega) + K^2_{\text{l.p.}}\frac{1}{2}S^2_{\text{n}}(\omega+\omega_0) + K^2_{\text{l.p.}}\frac{1}{2}S^2_{\text{amp}}(\omega+\omega_0)\right)d\omega}. \quad (11)$$

В расчетах была использована спектральная плотность напряжения фликер-шума $S_{1/f}$ стандартных константановых тензорезисторов 1-XY33-6, измеренная в работе [21]. Подставляя данные в выражение (11), с учетом (6) и (7) получим уровень среднеквадратичного шумового напряжения, приведенного ко входу: $u_\Sigma = 6.7 \cdot 10^{-9}$ В. Зная уровень входного шума, с учетом выражения (1) можно выразить среднеквадратичное значение кажущегося удлинения:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{4u_\Sigma}{u_b G} = \frac{4\cdot 1.1\cdot 10^{-8}}{1.5\cdot 2} = 1.46\cdot 10^{-8} = 0.015\cdot 10^{-6}. \quad (12)$$

Амплитудное значение шума (ширину шумовой дорожки) $\Delta\varepsilon_{\text{pp}}$ (peak-to-peak) можно оценить по формуле:

$$\Delta\varepsilon_{\text{pp}} \approx 6\sigma_\varepsilon = 0.888 \cdot 10^{-6}. \quad (13)$$

Таким образом, определены ограничения, накладываемые электрическими шумами на разрешение тензометра. Согласно расчетам, основной вклад в уровень электрических шумов делает фликер-шум резистором измерительного моста. Однако, помимо чисто электрических шумов, есть ряд факторов, влияющих на результат измерения удлинения.

Выбор частоты модуляции. Из приведенного анализа видно, что частота модуляции тензомоста должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечить достаточную отстройку от низкочастотной части шумового спектра инструментального усилителя. С другой стороны, при повышении частоты модуляции возрастает влияние паразитных реактивных элементов. Также необходимо отстроиться от промышленной частоты (50 Гц) и ее гармоник. С учетом перечисленных факторов была выбрана частота 410 Гц.

Температурные флуктуации и дрейф. Температуру элементов измерительного моста можно считать равномерной и постоянной лишь приблизительно. В действительности имеют место флуктуации и дрейф температуры, связанные с процессами рассеивания мощности, выделяемой тензорезисторами и инструментальным усилителем, а также с нестабильностью лабораторной температуры.

Типичное значение температурного коэффициента сопротивления константанового тензорезистора составляет ТКС = $10 \cdot 10^{-6}$ 1/K. Оценим изменение температуры, вызывающее ложный отклик на ширину шумовой дорожки:

$$\Delta T = \frac{\Delta\varepsilon_{\text{pp}}}{\text{ТКС}} = 0.009 \text{ K}. \quad (14)$$

Видно, что схема тензометра чрезвычайно чувствительна к неравномерному изменению температуры. Выражение (14) не учитывает, однако, влияние разницы коэффициентов теплового расширения исследуемого образца (sample plate) и датчика (guage) [15] $\Delta\text{ТКР} = \text{ТКР}_{\text{sam.pl.}} - \text{ТКР}_{\text{guage}}$, из-за которого термочувствительность может увеличиться в несколько раз:

$$\Delta T = \frac{\Delta\varepsilon_{\text{pp}}}{\text{ТКС} \pm \Delta\text{ТКР}\cdot G}. \quad (15)$$

В стандартных тензометрических приложениях часто используют методику температурной компенсации, подбирая ТКС тензодатчиков под ТКР материала, так что сумма в знаменателе выражения (15) стремится к нулю. К сожалению, в случае универсального тензометра такой метод практически неприменим, т.к. материал образца может быть разным и его ТКР может быть неизвестен. Дополнительно усложняет ситуацию неопределенность в значении теплопроводности и тепловой массы образца, что влияет на процесс рассеяния тепла, выделяемого тензодатчиком. При конструировании измерительной ячейки были использованы следующие методы борьбы с паразитным влиянием тепловых процессов. Во-первых, ячейка выполнена закрытой, чтобы нивелировать влияние конвективных потоков воздуха. После установки образца и балансировки моста требуется выдержать определенное время, в течение которого происходит выравнивание температуры внутри ячейки. Во-вторых, предусмотрена активная прецизионная стабилизация температуры платы предусилителя с помощью элемента Пельтье. Также конструкция ячейки допускает балансное включение тензорезисторов активного плеча моста, когда оба резистора приклеиваются к образцу, компенсируя в некоторой степени температурную чувствительность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Чтобы оценить разрешающую способность установки по деформации, была записана зависимость выходного сигнала тензометра от времени в отсутствие магнитного поля, $H = 0$. Выборка содержала 1000 точек, время записи составляло 10 мин. Полученная шумовая дорожка показана на рис. 8. Величина

среднеквадратического отклонения на графике составляет $\sigma_\varepsilon \approx 0.016 \cdot 10^{-6}$, что соответствует амплитудному значению шума $\Delta\varepsilon_{pp} = 0.096 \cdot 10^{-6}$. Полученный результат хорошо согласуется с расчетом по (13).

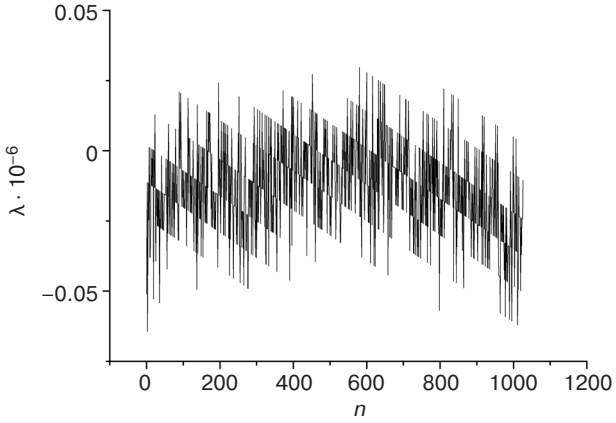


Рис. 8. Шумовая дорожка тензометрической установки (здесь *n* – номер выборки)

Для демонстрации преимуществ созданной установки были измерены кривые магнитострикции образца феррита магния $MgFe_2O_4$ на тензометре с переменным возбуждением и на тензометре постоянного тока [18]. Образец перемагничивали по предельному циклу с шагом по магнитному полю 0.3 Э. На рис. 9 хорошо видна разница в уровне шума двух установок. Кривая *1* существенно чище, демонстрирует гистерезис при перемагничивании, в то время как кривая *2* дает только качественное представление о полевой зависимости магнитострикции образца.

Для расчета полевых характеристик МЭ-эффектов важно знать зависимости пьезомагнитного коэффициента $q = d\lambda/dH$ от магнитного поля. На рис. 10 приведены зависимости $q(H)$, рассчитанные методом численного дифференцирования кривых $\lambda(H)$ (рис. 9). Кривая *1* получена с использованием данных

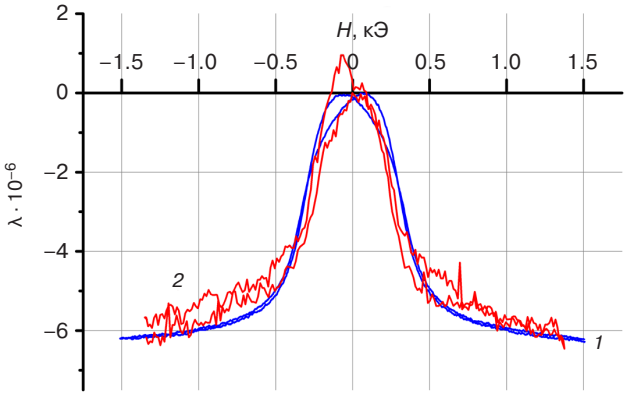


Рис. 9. Зависимости магнитострикции λ пластины $MgFe_2O_4$ от напряженности магнитного поля *H*, измеренные:
1 – тензометром с переменным возбуждением,
2 – тензометром на постоянном токе

с тензометра с переменным возбуждением, а кривая *2* – с использованием данных с обычного тензометра на постоянном токе. Видно, что использование для измерения магнитострикции тензометра с переменным возбуждением позволяет гораздо точнее предсказать форму полевой зависимости линейного МЭ-эффекта.

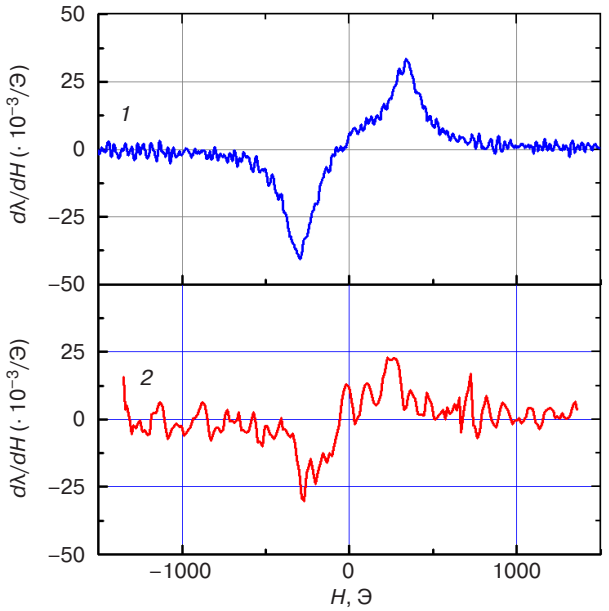


Рис. 10. Рассчитанная зависимость пьезомагнитного коэффициента *q* от напряженности магнитного поля *H* для образца $MgFe_2O_4$ по данным с тензометра:
1 – на переменном токе, *2* – на постоянном токе

Описанная установка, благодаря наличию управляемого двухполярного источника высокого напряжения (ИВН на рис. 2) позволяет измерять также величину ПЭ-эффекта и проводить исследования электро- и магнитоакустических взаимодействий в композитных структурах. Постоянное напряжение *U* величиной до 500 В подается на электроды ПЭ-образца, и измеряется деформация образца. На рис. 11 показана типичная измеренная зависимость удлинения пластины ЦТС-19 (ОАО «НИИ «Элпа», Россия) размерами 5 × 10 × 0.2 мм, поляризованной по толщине, от электрического напряжения, приложенного к электродам на ее поверхности. Величина пьезомодуля d_{31}, рассчитанная по данным на рис. 11 в точке нулевого смещения, составляет около 130 пКл/Н, что близко к данным производителя (d_{31} = 155 пКл/Н).

В таблице приведены основные характеристики созданной установки (alternating current, AC) в сравнении с тензометром на мосте постоянного тока (direct current, DC) [18]. Видно, что по величине шума, приведенного ко входу, установка на переменном токе значительно превосходит установку на постоянном токе, а также стандартный

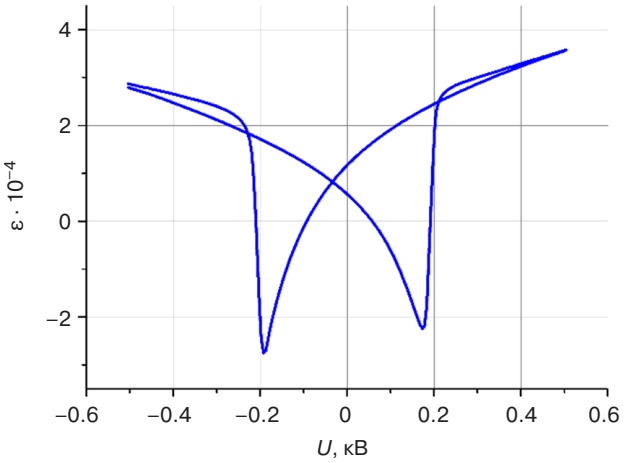


Рис. 11. Измеренная зависимость ПЭ-деформации ε пластины ЦТС-19 от электрического напряжения *U*

тензометрический усилитель DPM911B[1] (Kyowa Electronic Instruments Co., Япония), примененный в работе [6] (RTI = 2).

Таблица. Основные характеристики установки

Параметр	AC	DC [16]
Диапазон измеряемого удлинения, мкм/м	0–2000	0–2000
Приведенный ко входу шум, мкм/м	0.096	2
Максимальные размеры образца, мм × мм	20 × 10	20 × 10
Максимальное магнитное поле, Гс	5000	1500

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана установка для измерения зависимости магнитострикционного удлинения образцов в виде пластин от магнитного поля и электрострикционного/пьезоэлектрического удлинения от электрического поля. Показано, что возбуждение измерительного тензомоста установки переменным током, использование синхронного детектирования и термостабилизация образца и компонентов измерительной схемы позволяют примерно на порядок понизить уровень шумов по сравнению со стандартными установками, использующими питание тензомоста постоянным током. Достигнуто разрешение установки по деформации ~10^{-7}. Установлено, что основным источником шума измерительной схемы является 1/*f* шум тензорезисторов, который, благодаря своей природе, с точки зрения методов обработки сигналов неотличим от полезного сигнала. Измеренный уровень шума совпал с расчетным, полученным на основе опубликованных шумовых характеристик пленочных тензорезисторов. Дальнейшее повышение разрешения измерительной установки может быть достигнуто путем улучшения соотношения между коэффициентом тензочувствительности и уровнем фликер-шума тензодатчиков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов FSFZ-2023-0005).

Данные расчетов могут быть предоставлены по запросу.

ACKNOWLEDGMENTS

The study is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within a State Assignment for Universities (project No. FSFZ-2023-0005).

The calculation data can be provided upon request.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Chu Z., Pourhosseini Asl M., Dong S. Review of multi-layered magnetoelectric composite materials and devices applications. *J. Phys. D: App. Phys.* 2018;51(24):243001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aac29b
2. Серов В.Н., Фетисов Л.Ю., Фетисов Ю.К., Шестаков Е.И., Высокочувствительный магнетометр на основе магнитоэлектрического датчика. *Российский технологический журнал.* 2016;4(5):24–37. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-5-24-37
[Serov V.N., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K., Shestakov E.I. High-sensitivity magnetometer based on a magnetoelectric sensor. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal.* 2016;4(5):24–37 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-5-24-37]

[1] DPM-911B strain guage amplifer datasheet. https://product.kyowa-ei.com/en/products/amplifiers/type-s_dpm-900_series?tab=specification. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

3. Федулов Ф.А., Савельев Д.В., Чашин Д.В., Шишкин В.И., Фетисов Ю.К. Магнитоэлектрический эффект в двухслойных полосковых и периодических гетероструктурах никель – цирконат-титанат свинца. *Russian Technological Journal*. 2022;10(3):64–73. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-64-73
[Fedulov F.A., Saveliev D.V., Chashin D.V., Shishkin V.I., Fetisov Yu.K. Magnetoelectric effects in stripe- and periodic heterostructures based on nickel–lead zirconate titanate bilayers. *Russian Technological Journal*. 2022;10(3):64–73. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-64-73]
4. Kuczynski K., Bienkowski A., Szewczyk R. New Measuring System for Testing of the Magnetostrictive Properties of the Soft Magnetic Materials. In: *10th IMIKO TC4 Int. Workshop on ADC Modeling and testing* – IWADC. 2005. P. 434–439. URL: https://www.imeko.info/publications/tc4-2005/IMEKO-TC4-2005-078.pdf
5. Linhares C.C., Santo J.E., Teixeira R.R., Coutinho C.P., Tavares S.M.O., Pinto M., Costa J.S., Mendes H., Monteiro C.S., Rodrigues A.V., Frazao O. Magnetostriction Assessment with strain gauges and fiber bragg gratings. *EAI Endorsed Trans. on Energy Web*. 2020;7(25):e4. https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.161420
6. Wang Z., Fan Z., Li X., Xu K., Yu R. Measurement of magnetic and magnetostrictive characteristics of transformer core based on triaxial strain gauge and B-H vector sensor. *Sensors.* 2023;23(13):5926. http://doi.org/10.3390/s23135926
7. Pszcaola J., Cetnar T. Measurements of huge magnetostriction of the heavy rare earth – iron intermetallics. *Physics for Economy*. 2021;4:65–74.
8. Wang W., Liu H., Huang R., Zhao Y., Huang C., Guo S., Shan Y., Li L. Thermal expansion and magnetostriction measurements using the Strain Gauge Method. *Front. Chem.* 2018;6:72. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00072
9. Iwakami O., Kawata N., Takeshita M., Yao Y., Abe S., Matsumoto K. Thermal expansion and magnetostriction measurements using a Quantum Design Physical Property Measurement System. *J. Phys.: Conf. Ser*. 2014;568(3):032002. https://doi.org/10.1088/1742-6596/568/3/032002
10. Kundys B., Bukhantsev Y., Vasiliev S., Kundys D., Berkowski M., Dyakonov V.P. Three terminal capacitance technique for magnetostriction and thermal expansion measurements. *Rev. Sci. Instrum.* 2004;75(6):2192–2196. https://doi.org/10.1063/1.1753088
11. Miyake A., Mitamura H., Kawachi S., Kimura K., Kimura T., Kihara T., Tachibana M., Tokunaga M. Capacitive detection of magnetostriction, dielectric constant, and magneto-caloric effects in pulsed magnetic fields. *Rev. Sci. Instrum*. 2020;91:105103. https://doi.org/10.1063/5.0010753
12. Tam A.C., Schroeder H. A new high-precision optical technique to measure magnetostriction of a thin magnetic film deposited on a substrate. *IEEE Trans. Magnetic*. 1989;25(3):2629–2638. https://doi.org/10.1109/20.24502
13. Samata H., Nagata Y., Uchida T., Abe S. New optical technique for bulk magnetostriction measurement. *J. Magn. Magn. Mater*. 2000;212(3):355–360. https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00832-X
14. Hrabovska K., Zivotsky O., Rojicek J., Fusek M., Mares V., Jirakova Y. Surface magnetostriction of FeCoB amorphous ribbons analyzed using magneto-optical Kerr microscopy. *Materials*. 2020;13(2):257. https://doi.org/10.3390/ma13020257
15. Poore M., Kesterson K. Measuring the thermal expansion of solids with strain gauges. *J. Test. Eval*. 1978;6(2):98–102. https://doi.org/10.1520/JTE10926J
16. Khan M.A., Dumstorff G., Winkilmann C., Lang W. Investigation on noise level in AC- and DC-bridge circuits for sensor measurement systems. In: *18th GMA / ITG Conf. Sensors and Meas. Systems*. 2016. P. 601–605. http://doi.org/10.5162/sensoren2016/P4.4
17. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Y., Economov N.A., Fetisov Y.K. Precise measurement of magnetostriction of ferromagnetic plates. *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys*. 2018;11(1):30–34. https://doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-1-30-34
18. Nyquist H. Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors. *Phys. Rev.* 1928;32:110–113. https://doi.org/10.1103/PhysRev.32.110
19. Hooge F.N. 1/f noise is no surface effect. *Phys. Lett. A.* 1969;29(3):139–140. https://doi.org/10.1016/0375-9601(69)90076-0
20. Voss R.F., Clarke J. Flicker (1/f) noise: equilibrium temperature and resistance fluctuations. *Phys. Rev. B*. 1976;13(2):556–573. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.13.556
21. Walter D., Bulau A., Zimmermann A. Review on excess noise measurements of resistors. *Sensors*. 2023;23(3):1107. https://doi.org/10.3390/s23031107

Об авторе

Бурдин Дмитрий Алексеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: phantastic@mail.ru. ResearcherID N-9597-2016, SPIN-код РИНЦ 8152-3011, https://orcid.org/0000-0002-2648-0511

About the Author

Dmitry A. Burdin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Scientific and Educational Center "Magnetoelectric Materials and Devices," MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: phantastic@mail.ru. ResearcherID N-9597-2016, RSCI SPIN-code 8152-3011, https://orcid.org/0000-0002-2648-0511

Russian Technological Journal.
2025;13(4):47–54

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

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 544.225
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-47-54
EDN STUTJW

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Первопринципный расчет электронной структуры монослоя CeI_3

Е.Т. Мирзоева,
А.В. Кудрявцев @

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

• **Поступила:** 15.01.2025 • **Доработана:** 14.02.2025 • **Принята к опубликованию:** 15.05.2025

Резюме

Цели. Двумерные магнетики, благодаря своим уникальным характеристикам и качественно новым физическим свойствам по сравнению с объемными структурами, обладают значительным потенциалом для применения в спинтронике и магнитных запоминающих устройствах. Теоретические исследования двумерных магнитных структур позволяют сузить область поиска новых соединений и дополнить экспериментальные данные. Целью данной работы является теоретический расчет электронной структуры двумерного магнетика CeI_3, включающий учет хаббардовского отталкивания на узле, расчет парциальной плотности электронных состояний и расчет распределения спиновых и зарядовых плотностей.

Методы. Расчеты электронной структуры монослоя CeI_3 выполнены с использованием программного пакета *VASP* в рамках теории функционала плотности, а также в рамках теории функционала плотности с учетом поправки Хаббарда. Для учета поправки Хаббарда использовался метод Дударева.

Результаты. Рассчитаны энергетические плотности электронных состояний и величины запрещенных зон для ферро- и антиферромагнитной конфигураций материала, равные соответственно 1.98 и 2.08 эВ. Для оценки влияния корреляционных эффектов проведен расчет плотностей состояний как с учетом поправки Хаббарда, так и без него. Определено, что в основном магнитном состоянии система проявляет антиферромагнитное упорядочение спиновой подсистемы. Разница полных энергий с ферромагнитной конфигурацией составила 2.8 мэВ на формульную единицу.

Выводы. Учет поправки Хаббарда наглядно продемонстрировал наличие характерной для полупроводниковых материалов запрещенной зоны. Полученные ширины запрещенной зоны для ферромагнитной и антиферромагнитной конфигураций системы относятся к диапазону видимого света, что открывает возможности использования двумерного CeI_3 в качестве люминесцентного материала в устройствах с магнитным управлением излучения. Представленные результаты согласуются с обобщенными результатами экспериментальных исследований соединений на основе церия. Учет корреляционных эффектов и поляризации по спину в представленных расчетах открывает горизонт для дальнейшего изучения магнитных свойств монослоя CeI_3 для технологических применений в области двумерного магнетизма.

Ключевые слова: двумерный магнетизм, теория функционала плотности, поправка Хаббарда, редкоземельные металлы, плотность электронных состояний, люминесценция

© Е.Т. Мирзоева, А.В. Кудрявцев, 2025

Для цитирования: Мирзоева Е.Т., Кудрявцев А.В. Первопринципный расчет электронной структуры монослоя CeI_3. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):47–54. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-47-54, https://www.elibrary.ru/STUTJW

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Ab initio calculations of the electronic structure of CeI_3 monolayer

Elizaveta T. Mirzoeva,
Andrey V. Kudryavtsev @

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

• **Submitted:** 15.01.2025 • **Revised:** 14.02.2025 • **Accepted:** 15.05.2025

Abstract

Objectives. In comparison with three-dimensional structures, two-dimensional (2D) magnetic materials are promising for use in spintronics and magnetic storage devices due to their exceptional characteristics and qualitatively different physical properties. Theoretical studies into 2D magnetic structures pave the way for the development of new compounds based on experimental data. In this work, we carry out a theoretical calculation of the electronic structure of a CeI_3 2D-magnetic material, taking into account the Hubbard repulsion at the site, the partial density of electronic states (DOS), and the distribution of spin and charge densities.

Methods. Calculations of the electronic structure of the CeI_3 monolayer were performed using density functional theory (DFT) and the Hubbard U scheme in the VASP software environment. The Dudarev method was used to account for the Hubbard correction.

Results. The calculated densities of the electronic states and the bandgap values for the ferro- and antiferromagnetic configurations of the material were found to be 1.98 and 2.08 eV, respectively. To assess the influence of correlation effects, the DOS was calculated both with and without the Hubbard correction. It was determined that the system in the ground magnetic state exhibits an antiferromagnetic ordering of the spin subsystem. The difference in the total energies of the antiferro- and ferromagnetic configurations was 2.8 meV per formula unit.

Conclusions. The calculations based on the Hubbard correction clearly demonstrated the presence of a bandgap, which is typical of semiconductor materials. The obtained bandgaps for the ferromagnetic and antiferromagnetic configurations of the system belong to the visible light range, which offers the opportunity of using 2D CeI_3 as a luminescent material in devices with a magnetically controlled emission. To assess the influence of correlation effects, the DOS was calculated both with and without the Hubbard correction. The obtained results agree with those obtained in experimental studies of cerium compounds. The consideration of correlation effects and spin polarization in the presented calculations forms the basis for further research into the magnetic properties of the CeI_3 monolayer for technological applications in the field of 2D magnetism.

Keywords: two-dimensional magnetism, 2D magnetism, density functional theory, DFT, Hubbard correction, rare-earth metals, density of electronic states, luminescence

For citation: Mirzoeva E.T., Kudryavtsev A.V. *Ab initio* calculations of the electronic structure of CeI_3 monolayer. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):47–54. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-47-54, https://www.elibrary.ru/STUTJW

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Широким классом новых низкоразмерных материалов являются двумерные магнетики. Данные материалы обладают рядом уникальных свойств, перспективных с практической точки зрения. Одно из таких свойств – магнитная анизотропия, которая дает возможность управления свойствами системы путем изменения направления внешнего магнитного поля [1]. Она имеет большое значение для двумерного ферромагнетизма, т.к. позволяет избежать случайного перераспределения спина из-за тепловых флуктуаций. К другим важным свойствам систем на основе двумерных магнетиков относятся эффект магнитной близости [2], формирование скирмионов [3], квантовый аномальный эффект Холла [4] гигантское магнетосопротивление [5] и т.д.

В связи с этим двумерные магнетики являются перспективными материалами для применения в устройствах спинтроники и магнитной памяти [6–8]. Экспериментальные исследования подтверждают наличие дальнего магнитного упорядочения в данных материалах [9, 10], несмотря на то, что теорема Мермина – Вагнера говорит о невозможности магнитного порядка в двумерных системах при температуре выше нулевой [11].

Актуальной задачей является поиск материалов и соединений, обладающих набором практически важных свойств. Несмотря на то, что объемные соединения могут быть хорошо изучены как экспериментально, так и теоретически, их двумерные аналоги могут обладать качественно новыми физическими свойствами, при этом экспериментальное изучение данных свойств может сталкиваться с техническими трудностями. Важной задачей в данном контексте является расчет физических свойств материала на основе его структуры из первых принципов (*ab initio*). Мощным теоретическим инструментом являются расчеты в рамках теории функционала плотности (density functional theory, DFT).

В данной работе проводится первопринципный расчет физических свойств двумерного CeI_3, обладающего орторомбической симметрией. Помимо таких хорошо изученных двумерных материалов, как дихалькогениды переходных металлов [12], ведется поиск новых двумерных соединений, перспективных с точки зрения применения их люминесцентных свойств. К подобным соединениям относятся и двумерные материалы на основе редкоземельных элементов [13, 14]. При этом переходы $5d$–$4f$ в атоме Ce обладают коротким временем жизни порядка 17 нс, что способствует высокой эффективности люминесценции [15]. Магнитные свойства двумерных магнетиков обусловлены частично заполненными электронными *d*- и *f*-оболочками. Таким образом, информация о магнитных свойствах двумерного CeI_3 может открыть путь не только для его потенциального применения в спинтронике, но и для создания оптических устройств с магнитным управлением излучения.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчеты проводились с использованием коммерчески доступного программного обеспечения для первопринципного моделирования *VASP* (Vienna *Ab initio* Simulation Package). *VASP* – широко используемый пакет, позволяющий проводить расчеты на основе теории функционала электронной плотности [16] и предназначенный для вычисления свойств материалов в основном состоянии (полной энергии, зонной структуры, плотности электронных состояний, фононных спектров и т.д.) путем решения уравнений Кона – Шэма.

В представленных расчетах обменно-корреляционная энергия электронов аппроксимируется с помощью обобщенного градиентного приближения (GGA – generalized gradient approximation) с использованием функционала типа PBE (Perdew – Burke – Ernzerhof) [17]. Электронно-ионные взаимодействия описываются на основе метода проективно присоединенных волн (project augmented wave, PAW) [18]. Для задания 2D-структуры в рамках трехмерных граничных условий было добавлено псевдовакуумное пространство 25 Å, чтобы исключить взаимодействие между слоями при трансляции элементарной ячейки. Энергия обрезания базиса плоских волн была установлена равной 320 эВ. Для интегрирования по зоне Бриллюэна использовалась гамма-центрированная сетка *k*-точек размером 16 × 16 × 1 для релаксации структуры, 20 × 20 × 1 для самосогласованного расчета и 26 × 26 × 1 для расчета плотности электронных состояний. Релаксация кристаллической структуры проводилась до тех пор, пока суммарные силы, действующие на каждый атом, не становились

меньше 0.001 эВ/Å. Релаксация электронных степеней свободы прекращалась, когда разница энергий между двумя итерациями расчета становилась меньше 10^{-6} эВ. Для учета сил Ван-дер-Ваальса использовалась полуклассическая дисперсионная поправка, известная как DFT-D3 с функцией демпфирования Беке – Джонсона [19].

Для редкоземельных металлов необходимо учитывать отталкивание локализованных (сильно коррелированных) электронных оболочек *d* и *f*. С целью повышения точности искомых параметров в расчете учитывалось хаббардовское отталкивание (DFT+U). DFT+U-расчет подразумевает разделение локализованных *d*- и *f*-электронов, для которых учитывается поправка Хаббарда, и делокализованных *s*- и *p*-электронов. Для учета поправки Хаббарда использовался подход Дударева и др. [20]:

$$E_{\text{DFT+U}} = E_{\text{DFT}} + \frac{U-J}{2} \times \times \sum_{\sigma} \left[\left(\sum_{m_1} n^{\sigma}_{m_1,m_2} \right) - \left(\sum_{m_1,m_2} n^{\sigma}_{m_1,m_2} n^{\sigma}_{m_2,m_1} \right) \right], \quad (1)$$

где m_1, m_2 – магнитные квантовые числа (m_1, m_2 = = −3, −2, …, 3 в случае электронов *f*-оболочек); $n^{\sigma}_{m_1,m_2}$ – матричный элемент матрицы плотности со спином σ; U – параметр, характеризующий кулоновское отталкивание на узле, принятый равным 5.1 эВ для Ce-4*f*; J – параметр, характеризующий межузельное отталкивание *d*- и *f*-электронов [21, 22].

Первое слагаемое E_{DFT} отвечает за энергию делокализованных *s*- и *p*-электронов, стандартно рассчитанную на основе теории функционала плотности в обобщенном градиентном приближении. Второе слагаемое отвечает за учет электрон-электронного взаимодействия (поправку Хаббарда) для локализованных *d*- и *f*-электронов.

Визуализация кристаллической структуры, спиновых и зарядовых плотностей в представленной работе выполнена с помощью программного обеспечения *VESTA* [23]. Для обработки полученных в ходе DFT-расчета данных используется программное обеспечение *VASPKIT* [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе рассчитаны энергетические плотности электронных состояний и значения запрещенных зон для ферромагнитной (ФМ) и антиферромагнитной (АФМ) конфигураций материала и определена конфигурация с минимальной полной энергией. Элементарная ячейка монослоя CeI_3 содержит в себе 2 атома церия и 6 атомов йода. Кристаллическая структура относится к орторомбическому типу с параметрами решетки 4.32 × 9.98 Å и псевдовакуумным пространством 25 Å (рис. 1). Желтым цветом отмечены атомы церия, фиолетовым – атомы йода, модельная ячейка обозначена сплошными черными линиями.

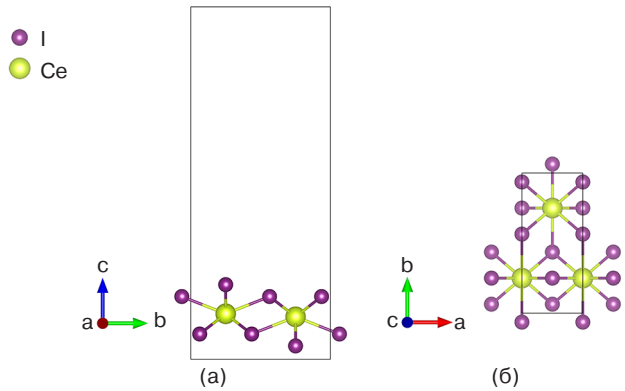


Рис. 1. Монослой CeI_3: (а) вид сбоку, (б) вид сверху

Полученные в рамках теории функционала плотности без учета поправки Хаббарда (DFT-расчет) зависимости парциальных и полной плотностей электронных состояний от энергии для ФМ-конфигурации представлены на рис. 2.

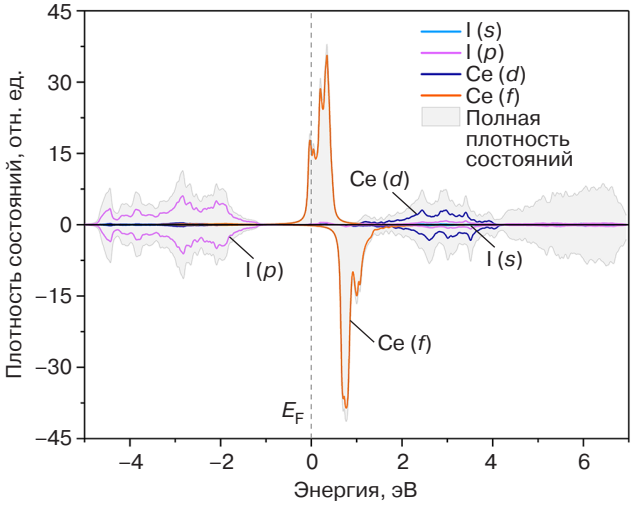


Рис. 2. Плотность электронных состояний монослоя CeI_3 для ФМ-конфигурации (DFT-расчет): заполненная фигура – полная плотность состояний, голубой цвет – вклад *s*-состояний йода, фиолетовый цвет – вклад *p*-состояний йода, синий цвет – вклад *d*-состояний церия, оранжевый цвет – вклад *f*-состояний церия. E_F – энергия Ферми

На представленной зависимости плотности состояний не наблюдается запрещенной зоны энергий, характерной для полупроводников, хотя двумерный CeI_3 предположительно является полупроводниковым материалом. Такое расхождение связано с неправильным учетом корреляционных эффектов для локализованных электронов внешних оболочек церия в рамках стандартной теории функционала плотности.

Для решения этой проблемы были введены поправки Хаббарда в рамках метода Дударева. Данный метод является оптимальным с точки зрения вычислений.

Стоит отметить, что общий вид данных зависимостей по своей структуре аналогичен зависимости плотности электронных состояний для трехмерного кристалла CeI_3, представленной в работе [25]. В данной работе валентная зона образована *p*-состояниями йода, зона проводимости образована *d*-состояниями церия, а 4*f*-состояния церия расположены в области запрещенной зоны энергий. Однако расчеты в упомянутой работе были проведены, как указано выше, для трехмерного материала и без учета корреляционных эффектов, а также без учета поляризации по спину. Это делает невозможным дальнейшее изучение магнитных свойств, в отличие от расчетов, представленных в данной статье.

Зависимости плотностей электронных состояний монослоя CeI_3, полученные в рамках теории функционала плотности с учетом поправки Хаббарда (DFT+U), представлены на рис. 3. Как и предполагалось, материал является полупроводником с запрещенной зоной, равной ~1.9 эВ и находящейся между *p*-оболочками йода и *f*-оболочками церия. Полученное значение ширины запрещенной зоны согласуется с обобщенными результатами экспериментальных исследований соединений на основе редкоземельных элементов, в т.ч. на основе церия [26, 27].

Церий – первый элемент, у которого появляются занятые состояния на *f*-оболочке, что подтверждается наличием соответствующего пика в области валентной зоны, т.е. относящегося к занятым состояниям. Общий вид плотности электронных состояний характерен для ферри- или ферромагнитной структуры с двумя не полностью компенсирующими друг друга спиновыми подсистемами.

Для расчета АФМ-конфигурации была сгенерирована структурная суперъячейка размером 2 × 2 элементарных ячеек, включающая в себя 8 атомов церия и 24 атома йода, а также проведен расчет ФМ-суперъячейки для сравнительного анализа и дальнейшего определения типа магнитного упорядочения, соответствующего минимальной полной энергии.

В результате DFT+U расчетов получены плотности электронных состояний (рис. 4), распределения спиновой плотности (рис. 5) для ФМ- и АФМ-конфигураций, а также общий вид распределения зарядовой плотности (рис. 6).

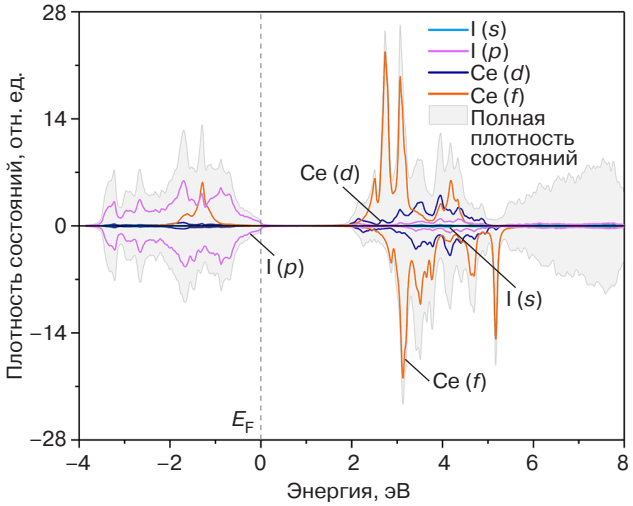


Рис. 3. Плотность электронных состояний монослоя CeI_3 с учетом поправки Хаббарда (DFT+U-расчет): заполненная фигура – полная плотность состояний, голубой цвет – вклад *s*-состояний йода, фиолетовый цвет – вклад *p*-состояний йода, синий цвет – вклад *d*-состояний церия, оранжевый цвет – вклад *f*-состояний церия

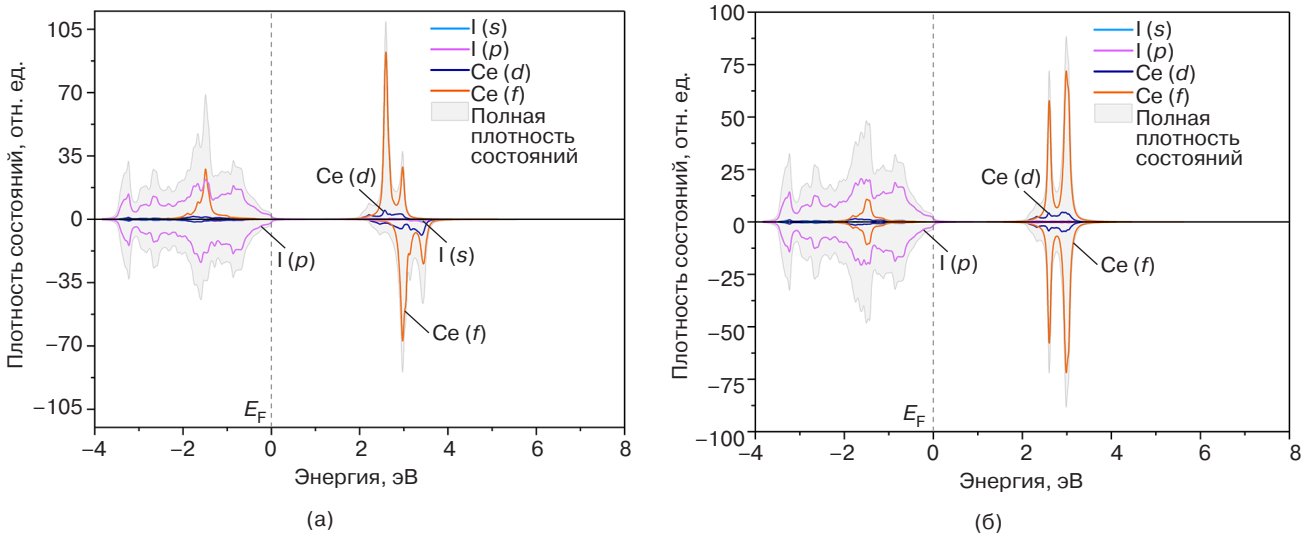


Рис. 4. Плотность электронных состояний монослоя CeI_3 в (а) ФМ- и (б) АФМ-конфигурациях: заполненная фигура – полная плотность состояний, голубой цвет – вклад *s*-состояний йода, фиолетовый цвет – вклад *p*-состояний йода, синий цвет – вклад *d*-состояний церия, оранжевый цвет – вклад *f*-состояний церия

Как видно из представленных зависимостей плотности электронных состояний, ширина запрещенной зоны энергии для АФМ-конфигурации составляет порядка 2.08 эВ, а для ФМ-конфигурации – 1.98 эВ. Полученные значения ширины запрещенной зоны соответствуют диапазону видимого света.

Для определения основного магнитного состояния необходимо найти разницу между полными энергиями АФМ- и ФМ-конфигураций:

$$\Delta E = E_{АФМ} - E_{ФМ} = -2.8 \text{ мэВ}. \quad (2)$$

Отрицательное значение свидетельствует о том, что АФМ-конфигурация является энергетически наиболее выгодной для исследуемой структуры, т.е. обладает меньшей энергией. Различные значения полной энергии связаны с разными вкладами кулоновского отталкивания между параллельными и антипараллельными спинами внешних оболочек системы.

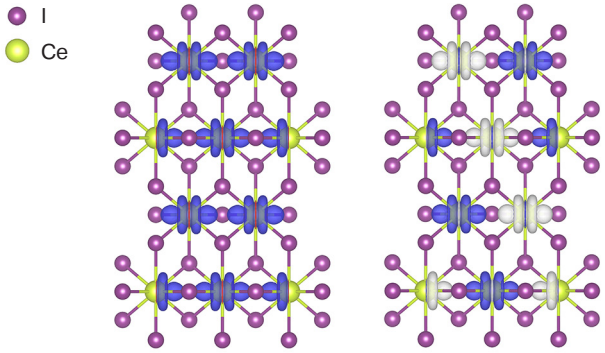


Рис. 5. Распределения спиновых плотностей в суперъячейке CeI_3 для (а) ФМ- и (б) АФМ-конфигураций для изоповерхностей ±0.0009 e/Å^3: синий цвет – спиновая поляризация со спином вверх (spin-up), белый цвет – со спином вниз (spin-down)

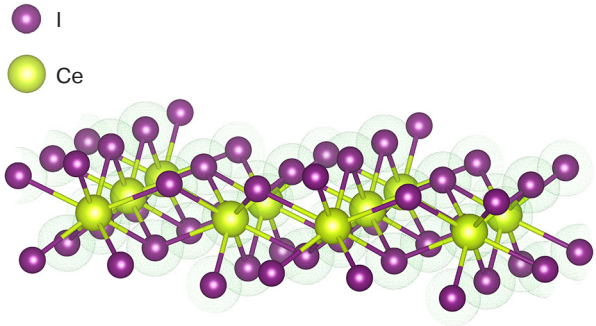


Рис. 6. Распределение зарядовой плотности в суперъячейке CeI_3 для изоповерхности 0.066 e/Å^3. Изоповерхности обозначены светло-зеленым цветом

Распределение спиновой плотности для обеих конфигураций (рис. 5) имеет вид «гантели», сосредоточенной вокруг имеющего ненулевой магнитный момент атома церия, в соответствии с предполагаемым видом орбиталей *f*-оболочек. Из распределения зарядовой плотности (рис. 6) видно, что отрицательный заряд сосредоточен вокруг атомов йода, что связано с большей электроотрицательностью атомов галогенов. Такое смещение зарядовой плотности говорит о большом вкладе ковалентности в химические связи металл–галоген. Образование ковалентных связей между парами Ce–I создает возможность суперобменного взаимодействия между соседними атомами Ce.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы проведен первопринципный расчет электронной структуры нового двумерного соединения CeI_3 в рамках теории функционала плотности. Расчет плотностей электронных состояний с учетом поправки Хаббарда наглядно продемонстрировал наличие характерной для полупроводниковых материалов запрещенной зоны, равной 1.98 и 2.08 эВ для ФМ- и АФМ-конфигураций материала соответственно. Такие значения энергии относятся к диапазону видимого света, что открывает возможности использования двумерного CeI_3 в качестве люминесцентного материала в устройствах с магнитным управлением излучения. В ходе расчетов установлено, что АФМ-конфигурация обладает меньшей полной энергией, т.е. является основным магнитным состоянием структуры. Разница полных энергий ФМ- и АФМ-конфигураций, равная 2.8 мэВ, связана с различными вкладами кулоновского отталкивания между параллельными и антипараллельными спинами внешних оболочек системы. Наличие ковалентных полярных связей, наглядно продемонстрированное на изображении распределения зарядовой плотности, создает возможность суперобменного взаимодействия между соседними атомами церия. Полученные результаты открывают горизонты для дальнейших исследований и технологических применений монослоя CeI_3 в области двумерного магнетизма.

БЛАГОДАРНОСТИ

Расчеты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования вычислительными ресурсами МСЦ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

ACKNOWLEDGMENTS

The calculations were performed using the equipment of the Center for the Collective Use of Computing Resources of the National Research Center “Kurchatov Institute.”

Вклад авторов

Е.Т. Мирзоева – выполнение расчетов, обработка результатов, написание статьи.

А.В. Кудрявцев – выполнение расчетов, обсуждение результатов, написание статьи.

Authors' contributions

E.T. Mirzoeva – performing calculations, processing results, writing the manuscript.

A.V. Kudryavtsev – performing calculations, discussing the results, writing the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Tan H., Shan G., Zhang J. Prediction of novel two-dimensional room-temperature ferromagnetic rare-earth material – GdB_2N_2 with large perpendicular magnetic anisotropy. *Mater. Today Phys.* 2022;24:100700. https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100700
2. Vobornik I., Manju U., Fujii J., Borgatti F., Torelli P., Krizmancic D., Hor Y.S., Cava R.J., Panaccione G. Magnetic proximity effect as a pathway to spintronic applications of topological insulators. *Nano Lett*. 2011;11(10):4079–4082. https://doi.org/10.1021/nl201275q
3. Heinze S., Von Bergmann K., Menzel M., et al. Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions. *Nature Phys.* 2011;7(9):713–718. https://doi.org/10.1038/nphys2045
4. Zhang J., Zhao B., Yao Y., Yang Z. Robust quantum anomalous Hall effect in graphene-based van der Waals heterostructures. *Phys. Rev. B*. 2015;92(16):165418. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.165418
5. Song T., Cai X., Tu M.W.Y., Zhang X., Huang B., Wilson N.P., Seyler K.L., Zhu L., Taniguchi T., Watanabe K., McGuire M.A., Cobden D.H., Xiao D., Yao W., Xu X. Giant tunneling magnetoresistance in spin-filter van der Waals heterostructures. *Science.* 2018;360(6394):1214–1218. https://doi.org/10.1126/science.aar4851
6. Wang Z., Sapkota D., Taniguchi T., Watanabe K., Mandrus D., Morpurgo A.F. Tunneling spin valves based on Fe_3GeTe_2/hBN/Fe_3GeTe_2 van der Waals heterostructures. *Nano Lett.* 2018;18(7):4303–4308. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b01278
7. Ashton M., Gluhovic D., Sinnott S.B., Guo J., Stewart D.A., Hennig R.G. Two-dimensional intrinsic half metals with large spin gaps. *Nano Lett.* 2017;17(9):5251–5257. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b01367
8. Johansen Ø., Risinggård V., Sudbø A., Linder J., Brataas A. Current control of magnetism in two-dimensional Fe_3GeTe_2. *Phys. Rev. Lett.* 2019;122(21):217203. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.217203
9. Jiang X., Liu Q., Xing J., Liu N., Guo Y., Liu Z., Zhao J. Recent progress on 2D magnets: Fundamental mechanism, structural design and modification. *Appl. Phys. Rev*. 2021;8(3):031305. https://doi.org/10.1063/5.0039979
10. Tian S., Zhang J.-F., Li C., Ying T., Li S., Zhang X., Liu K., Lei H. Ferromagnetic van der Waals crystal VI_3. *Am. Chem. Soc*. 2019;141(13):5326–5333. https://doi.org/10.1021/jacs.8b13584
11. Mermin N.D., Wagner H. Absence of Ferromagnetism or Antiferromagnetism in One- or Two-Dimensional Isotropic Heisenberg Models. *Phys. Rev. Lett*. 1966;17(22):1133–1136. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.17.1133
12. Пименов Н.Ю., Лавров С.Д., Кудрявцев А.В., Авдижиян А.Ю. Моделирование зонной структуры двумерных твердых растворов $Mo_xW_{1-x}S_{2y}Se_{2(1-y)}$. *Russian Technological Journal.* 2022;10(3):56–63. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-56-63
[Pimenov N.Yu., Lavrov S.D., Kudryavtsev A.V., Avdizhiyan A.Yu. Modeling of two-dimensional $MoxW_{1-x}S_{2y}Se_{2(1-y)}$ alloy band structure. *Russian Technological Journal*. 2022;10(3):56–63. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-56-63]
13. Guo Q., Wang L., Yang L., et al. Spectra stable deep-blue light-emitting diodes based on cryolite-like cerium(III) halides with nanosecond d-f emission. *Sci. Adv*. 2022;8(50):eabq2148. https://doi.org/10.1126/sciadv.abq2148
14. Wang C., Liu X., She C., Li Y. Luminescence of CeI_3 in organic solvents and its application in water detection. *Polyhedron*. 2021;196:115013. https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.115013
15. Xie W., Hu F., Gong S., Peng L. Study the optical properties of Cs_3CeI_6: First-principles calculations. *AIP Advances.* 2024;14:015062. https://doi.org/10.1063/5.0187100
16. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of *ab initio* total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B*. 1996;54(16):11169–11186. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.11169
17. Constantin L.A., Perdew J.P., Pitarke J.M. Exchange–correlation hole of a generalized gradient approximation for solids and surfaces. *Phys. Rev. B*. 2009;79(7):075126. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.075126
18. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method, *Phys. Rev. B*. 1999;59(3):1758–1775. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.1758
19. Grimme S., Ehrlich S., Goerigk L. Effect of the damping function in dispersion corrected density functional theory. *J. Comput. Chem*. 2011;32(7):1456–1465. https://doi.org/10.1002/jcc.21759
20. Dudarev S.L., Botton G.A., Savrasov S.Y., Humphreys C.J., Sutton A.P. Electron-energy-loss spectra and the structural stability of nickel oxide: An LSDA+*U* study. *Phys. Rev. B*. 1998;57(3):1505–1509. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.1505
21. Sheng K., Chen Q., Yuan H., Wang Z. Monolayer CeI_2: An intrinsic room-temperature ferrovalley semiconductor. *Phys. Rev. B*. 2022;105(7):075304. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.075304

22. Larson P., Lambrecht W.R.L., Chantis A., van Schilfgaarde M. Electronic structure of rare-earth nitrides using the LSDA+*U* approach: Importance of allowing 4*f* orbitals to break the cubic crystal symmetry. *Phys. Rev. B*. 2007;75(4):045114. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.045114
23. Momma K., Izumi F. *VESTA*: a three-dimensional visualization system for electronic and structural analysis. *J. Appl. Cryst.* 2008;41:653–658. https://doi.org/10.1107/S0021889808012016
24. Wang V., Xu N., Liu J., Tang G., Geng W. VASPKIT: A user-friendly interface facilitating high-throughput computing and analysis using VASP code. *Comput. Phys. Commun*. 2021;267:108033. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108033
25. Chornodolskyy Ya.M., Karnaushenko V.O., Vistovskyy V.V., Syrotyuk S.V., Gektin A.V., Voloshinovskii A.S. Energy band structure peculiarities and luminescent parameters of CeX_3 (X = Cl, Br, I) crystals. *J. Lumin*. 2021;237:118147. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118147
26. Birowosuto M.D., Dorenbos P. Novel γ- and X-ray scintillator research: on the emission wavelength, light yield and time response of Ce^{3+} doped halide scintillators. *Phys. Status Solidi A-Appl. Mater. Sci.* 2009;206(1):9–20. https://doi.org/10.1002/pssa.200723669
27. Dorenbos P. Lanthanide 4f-electron binding energies and the nephelauxetic effect in wide band gap compounds. *J. Lumin*. 2013;136:122–129. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.11.030

Об авторах

Мирзоева Елизавета Теофиловна, магистрант, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mirzoeva.elizaveta@gmail.ru. https://orcid.org/0009-0003-4874-7015

Кудрявцев Андрей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, научный сотрудник, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kudryavcev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 55219889700, ResearcherID O-1457-2016, https://orcid.org/0000-0002-2126-7404

About the Authors

Elizaveta T. Mirzoeva, Master Student, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mirzoeva.elizaveta@gmail.ru. https://orcid.org/0009-0003-4874-7015

Andrey V. Kudryavtsev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Researcher, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kudryavcev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 55219889700, ResearcherID O-1457-2016, https://orcid.org/0000-0002-2126-7404

Russian Technological Journal.
2025;13(4):55–68

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

УДК 550.380.8; 621.317.412
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-55-68
EDN PEJBLG

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Расширение возможностей новых магнитометров пондеромоторного и магнитно-реологического типов с полюсами-полусферами

М.Н. Полисмакова [1], Д.А. Сандуляк [1, @], А.С. Харин [1], Д.А. Головченко [1], А.А. Сандуляк [1], А.В. Сандуляк [1], H.M. Baskonus [2]

[1] *МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия*
[2] *Harran University, Sanliurfa, 63190 Turkey*
[@] *Автор для переписки, e-mail: d.sandulyak@mail.ru*

• **Поступила:** 25.01.2025 • **Доработана:** 07.03.2025 • **Принята к опубликованию:** 16.05.2025

Резюме

Цели. Для определения магнитной восприимчивости малообъемных объектов применяются магнитометры пондеромоторного и магнитно-реологического типов с полюсами-полусферами, позволяющими создавать требуемое для лимитированной рабочей зоны магнитное поле. Цель работы – проведением соответствующих исследований показать, что возможности новых созданных магнитометров могут быть расширены.

Методы. Исследование проводится согласно оригинальному методу, включающему получение координатной характеристики индукции поля B (посредством прямых пошаговых измерений датчиком Холла) в межполюсном пространстве по линии действия пондеромоторной силы с последующим нахождением координатной характеристики градиента.

Результаты. В магнитометрах с применением полюсов-полусфер повышенного диаметра D: 157 и 184 мм, взаимно разобщаемых на то или иное расстояние b, экспериментально получены ключевые зависимости магнитной индукции B при пошаговом удалении x от центра симметрии межполюсной области по линии действия пондеромоторной силы, а по ним – зависимости градиента grad$B = dB/dx$. Характерный перегиб каждой из кривых зависимостей B от x и индивидуальный экстремум последовавших из них кривых зависимостей dB/dx от x, в окрестности которого значения dB/dx практически одинаковы, отвечает требованию выбора дислокации исполнительной (рабочей) зоны, где неоднородность поля практически постоянна.

Выводы. По установленным и обобщенным зависимостям B от x и dB/dx от x найдены координаты дислокации исполнительной зоны. Для вычисления этих координат, зависящих от величин D и b и не зависящих от намагничивающей силы обмотки, получены аналитические (феноменологические) выражения степенного и логарифмического вида. Показана возможность использования этих выражений для идентификации исполнительной зоны магнитометров, не прибегая к проведению дополнительных серий экспериментов. Показана целесообразность применения полюсов-полусфер повышенного диаметра, что позволяет увеличить протяженность исполнительной зоны и проводить исследования с образцами более широкого спектра размеров.

© М.Н. Полисмакова, Д.А. Сандуляк, А.С. Харин, Д.А. Головченко, А.А. Сандуляк, А.В. Сандуляк, H.M. Baskonus, 2025

Ключевые слова: пондеромоторный принцип, магнитометр, магнитная восприимчивость образца, исполнительная зона, координатные характеристики индукции и градиента, степенная связь, логарифмическая связь

Для цитирования: Полисмакова М.Н., Сандуляк Д.А., Харин А.С., Головченко Д.А., Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Baskonus H.M. Расширение возможностей новых магнитометров пондеромоторного и магнитно-реологического типов с полюсами-полусферами. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):55–68. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-55-68, https://www.elibrary.ru/PEJBLG

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Expanding the capabilities of new magnetometers of ponderomotive and magnetic-rheological types with hemispherical poles

Maria N. Polismakova [1], Daria A. Sandulyak [1, @], Alexey S. Kharin [1], Daria A. Golovchenko [1], Anna A. Sandulyak [1], Alexander V. Sandulyak [1], Haci M. Baskonus [2]

[1] *MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*
[2] *Harran University, Sanliurfa, 63190 Turkey*
[@] *Corresponding author, e-mail: d.sandulyak@mail.ru*

• **Submitted:** 25.01.2025 • **Revised:** 07.03.2025 • **Accepted:** 16.05.2025

Abstract

Objectives. The work sets out to explain the expanded capabilities of new magnetometers by conducting appropriate studies. In order to determine the magnetic susceptibility of small-volume objects, ponderomotive and magnetic-rheological magnetometers with hemispherical pole pieces are used to create the magnetic field required for a limited working zone.

Methods. The research is carried out using an original method, which includes finding the coordinate characteristic of the induction of the field B through direct step-by-step measurements by the Hall sensor in the interpolar space along the line of action of the ponderomotive force to provide a basis for obtaining the coordinate characteristic of the gradient.

Results. In magnetometers using hemispherical poles of increased diameter D: 157 and 184 mm, mutually disconnected from one or another by the distance b, the desired key dependencies of magnetic induction B were experimentally obtained (with a step-by-step distance x from the center of symmetry of the interpolar space along the line of action of the ponderomotive force) to provide the dependence of the gradient grad$B = dB/dx$. The characteristic inflection of each of the curves B from x and corresponding individual extremum of the following curves dB/dx from x, in the vicinity of which the values of dB/dx are practically stable, meets the requirement of determining the dislocation of the executive (working) zone such that the inhomogeneity of the field is almost constant.

Conclusions. Coordinates of executive zone dislocation are obtained from established and generalized dependencies B from x and dB/dx from x. To calculate these coordinates, which depend on D and b but do not

depend on the magnetizing force of the winding, the corresponding analytical (phenomenological) expressions of power and logarithmic form are obtained. The possibility of using these expressions to identify the executive zone of magnetometers without resorting to additional series of experiments is shown. The expediency of using hemispherical pole pieces of increased diameter is also demonstrated. On this basis, the length of the executive zone can be increased to conduct studies with samples of a wider range of sizes.

Keywords: ponderomotive principle, magnetometer, magnetic susceptibility of the sample, executive zone, coordinate characteristics of induction and gradient, power dependence, logarithmic dependence

For citation: Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Kharin A.S., Golovchenko D.A., Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Baskonus H.M. Expanding the capabilities of new magnetometers of ponderomotive and magnetic-rheological types with hemispherical poles. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):55–68. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-55-68, https://www.elibrary.ru/PEJBLG

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В науке и технике востребованным является получение данных о магнитных свойствах дисперсных материалов, в частности, композитов, порошков, суспензий [1–13]. Особую актуальность этот вопрос приобретает тогда, когда в распоряжении имеется сравнительно небольшой объем изучаемого материала, например, мелкие пробы ферропримесей, выделенные из технологических сыпучих и жидких сред в лабораторных целях.

В связи с этим весьма важно иметь соответствующие средства контроля магнитных свойств малообъемных образцов, в качестве которых, на наш взгляд, предпочтительными продолжают оставаться те магнитометры, которые основаны на пондеромоторном принципе [14–25]. Современным направлением в создании средств контроля магнитных характеристик тел малых размеров, в т.ч. малообъемных дисперсных образцов, их отдельных частиц, в частности, магнитной восприимчивости, является применение в подобного рода магнитометрах полюсных наконечников-полусфер [26–32] (рис. 1). Такое решение позволяет без обычно возникающих в подобных случаях сложностей получать необходимую рабочую зону, т.е. зону стабильной (по определенной координате, как правило – согласно действию пондеромоторной силы) неоднородности: градиента и/или магнитного силового фактора. Указание на дислокацию этой зоны отображено на рис. 1 в виде утолщения на оси x, как оси, вдоль которой осуществляется подвешивание изучаемого образца или принудительное перемещение в жидкости изучаемой частицы.

Для идентификации этой зоны в межполюсной области магнитометра необходимо получить координатные характеристики напряженности H (или индукции B) создаваемого неоднородного магнитного поля [26–32]. Поскольку среда в межполюсной области воздушная, для которой относительная магнитная проницаемость близка к единице, величины H и B связаны лишь посредством константы: $H = B/\mu_0$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

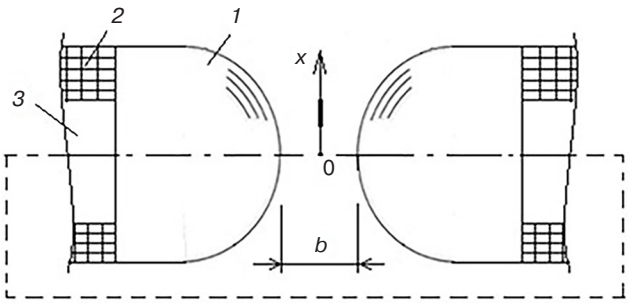


Рис. 1. О применении полюсных наконечников-полусфер *1* в электромагнитной системе с обмоткой *2* на магнитопроводе *3* в магнитометрах, основанных на пондеромоторном принципе

При этом условием наличия в пределах рабочей зоны создаваемого неоднородного поля того или иного стабильного (практически постоянного) значения, например, градиента напряженности grad$H$ (или градиента индукции grad$B$), однозначно является следующее. Значения напряженности поля H (индукции B) в пределах такой зоны, в частности, в том направлении x, в котором действует пондеромоторная сила F (рис. 1), измеряемая в магнитометре, должны соответствовать линейной зависимости. Только в этом случае соответствующее дифференцирование такой зависимости, т.е. переход к искомой зависимости dH/dx или dB/dx, будет демонстрировать постоянство (здесь – стабильность вдоль координаты x) интересующего нас параметра $dH/dx \cong \text{grad}H = \text{const}$ или $dB/dx \cong \text{grad}B = \text{const}$.

Вместе с тем, уже хорошо зарекомендовавшие себя магнитометры, пригодные для реализации этих методов, содержат полюса-полусферы сравнительно небольшого диаметра $D = 100$ мм и 135 мм [26, 27, 29–32]. Это несколько ограничивает получаемую необходимую исполнительную зону, имея в виду ее дислокацию и саму

протяженность в объективно несколько стесненном межполюсном пространстве.

Возможности таких магнитометров можно расширить, применяя полюса-полусферы большего диаметра D. Разумеется, это требует выполнения комплекса исследований – с получением координатных (вдоль направления x действия пондеромоторной, т.е. магнитной, силы) характеристик индукции B (напряженности H), градиента grad$B \cong dB/dx$ (grad$H \cong dH/dx$), силового фактора Bgrad$B$ (Hgrad$H$) и, как следствие, обобщенных аналитических зависимостей, что необходимо для оперативного прогнозирования и контроля местоположения искомой рабочей зоны, а именно, зоны относительно стабильной неоднородности поля. При этом важно установить, в какой мере такие зависимости согласуются с ранее установленными зависимостями, полученными в [26–32] для полюсов-полусфер меньшего диаметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее упомянуто, что для идентификации исполнительной зоны магнитометров оговоренного пондеромоторного принципа, основанных на проявлении пондеромоторной, т.е. магнитной силы, ключевой является координатная характеристика индукции B (напряженности H) магнитного поля между полюсами, здесь – полюсами-полусферами.

Как и в [26–32], пошаговые значения B вдоль избранного направления x (рис. 1) измерялись миллитесламетром, датчик (Холла) которого размещали на координатном столике. При этом заметим, что направление x перемещения датчика, которое должно лежать в плоскости симметрии области между полюсными наконечниками-полусферами, вправе выбирать экспериментатор, совершая перемещение датчика в наиболее удобном для выполнения измерений одном из вариантов такого направления – с конкретными значениями x, соответствующими расстоянию от осевой линии полюсов до текущего расположения датчика. На рис. 1 это направление показано вверх, а в реальном исполнении более удобным являлось перемещение в перпендикулярном чертежу направлении – на себя.

Опыты поочередно выполнены с использованием двух пар полюсных наконечников-полусфер диаметром по D = 157 мм и по D = 184 мм, взаимно удаляемых на то или иное расстояние b: для D = 157 мм – от b = 9.5 мм до b = 24 мм; для D = 184 мм – от b = 6.5 мм до b = 28 мм. Намагничивающую силу $I\omega$ обмотки электромагнитной системы (рис. 1) варьировали величиной тока питания I в пределах $I\omega$ = 3000–22500 А. Здесь число витков обмотки ω = 3000.

Результаты пошаговых измерений магнитной индукции B в принятом направлении x (рис. 1) между полюсами-полусферами диаметром D = 157 мм приведены на рис. 2 (точки) – для разных значений $I\omega$ и b. Это позволило получить соответствующие координатные характеристики (линии) B и $dB/dx \cong$ grad$B$. Для этого опытные данные B (рис. 2, точки) подвергали аппроксимации (рис. 2, линии) полиномом четвертой степени, используя программную среду *Advanced Grapher*[1].

Уже сам извилистый вид координатных характеристик B от x на рис. 2, когда прослеживается их перегиб, как и в [26–32], свидетельствует о возможности искусственной линейной (упрощенной) аппроксимации зависимостей индукции B от координаты x – именно в окрестности точки перегиба каждой из этих зависимостей. Значит, здесь, т.е. где участок кривой B от x поддается линейной аппроксимации, градиент индукции grad$B = dB/dx$ является практически постоянной величиной.

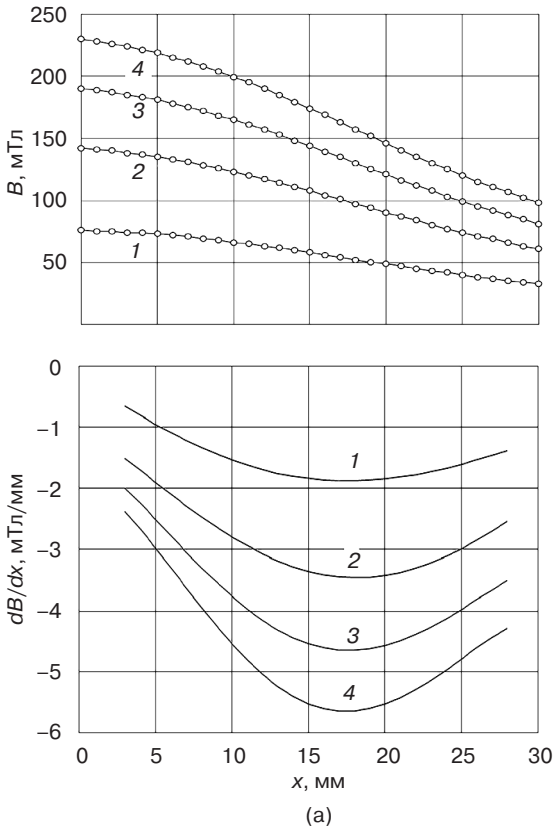
Это находит подтверждение в экстремальном виде координатных характеристик градиента (рис. 2), судя по весьма близким значениям градиента (ограниченная зона) в окрестности экстремума.

Из полученных координатных характеристик градиента (рис. 2) непосредственно следует информация о координате (абсциссе) экстремума каждой из этих характеристик, т.е. величины $x = x_{extr}$ (табл. 1), а значит о координате дислокации соответствующей исполнительной, а именно, рабочей зоны между полюсами-полусферами диаметром D = 157 мм.

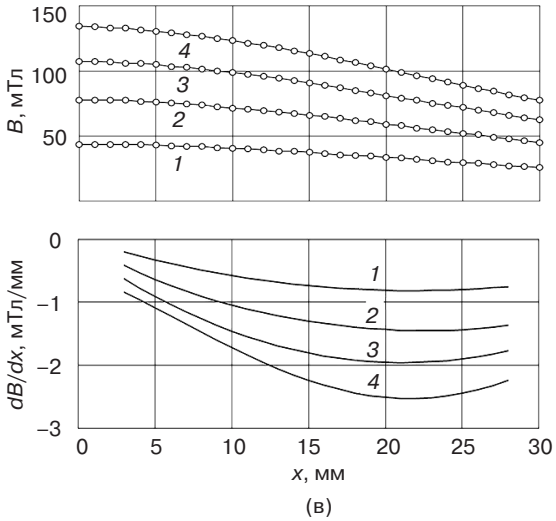
[1] https://www.alentum.com/agrapher/. Дата обращения 12.05.2025. / Accessed May 12, 2025.

Таблица 1. Координаты экстремума x_{extr} (дислокации зоны стабильного градиента) между полюсами-полусферами диаметром D = 157 мм при разных значениях намагничивающей силы $I\omega$ обмотки и разных расстояниях b между полюсами-полусферами

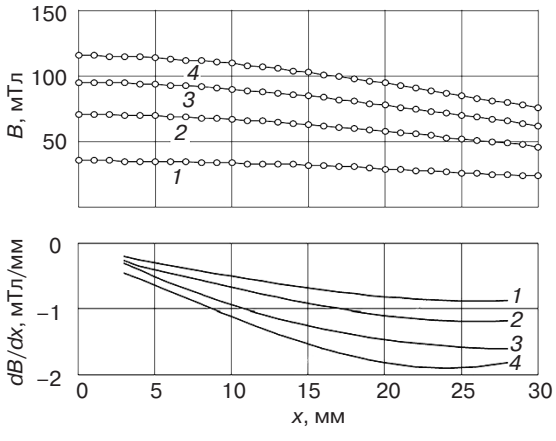
$I\omega$, А	x_{extr}, мм					
	b = 9.5 мм	b = 13 мм	b = 15.5 мм	b = 18 мм	b = 21 мм	b = 24 мм
3000	17.60	22.26	21.90	22.34	22.17	27.70
6000	18.15	20.86	22.73	22.41	26.21	26.01
12000	17.50	20.54	21.17	22.76	29.49	27.46
22500	17.65	19.58	21.61	22.75	24.12	26.58
Среднее	**17.73**	**20.81**	**21.85**	**22.57**	**25.5**	**26.94**



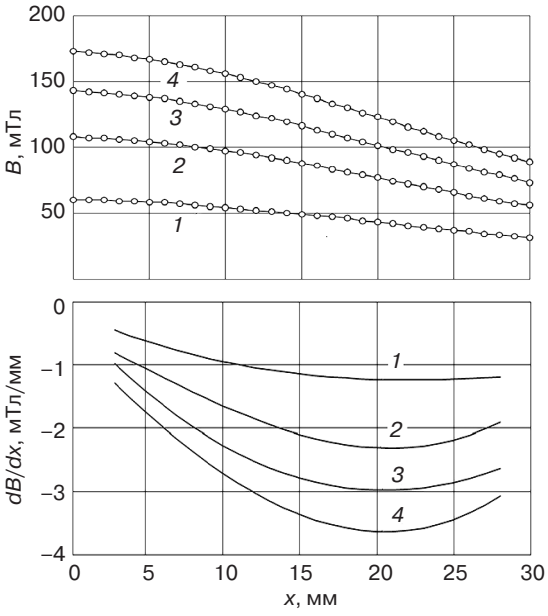
(а)



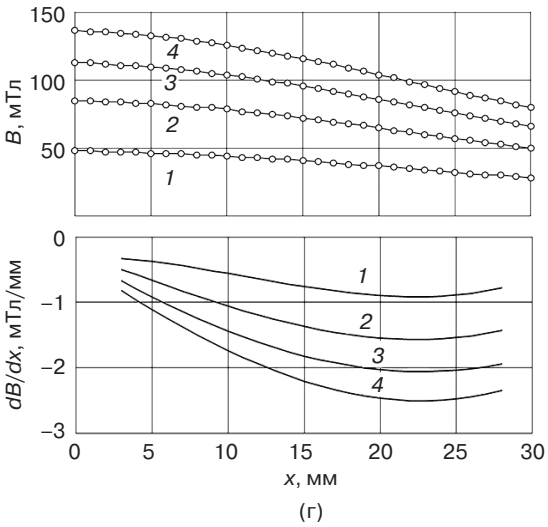
(в)



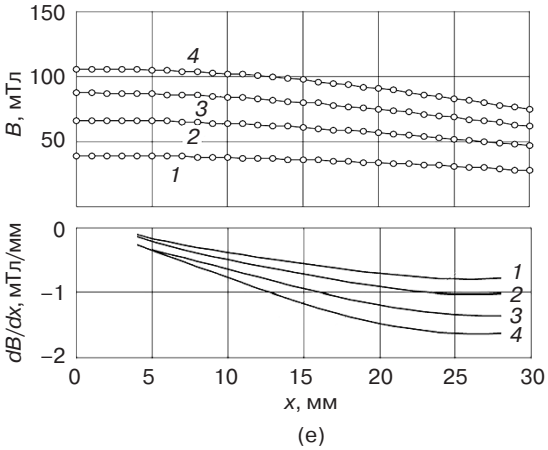
(д)



(б)



(г)



(е)

Рис. 2. Координатные характеристики индукции и градиента поля между полюсами-полусферами диаметром D = 157 мм при их взаимном удалении b: (а) 9.5 мм, (б) 13 мм, (в) 15.5 мм, (г) 18 мм, (д) 21 мм, (е) 24 мм; для значений намагничивающей силы $I\omega$: (*1*) 3000 А, (*2*) 6000 А, (*3*) 12000 А, (*4*) 22500 А

Полученные данные x_{extr} указывают на отмечавшийся ранее важный факт: несмотря на разные значения намагничивающей силы $I\omega$ обмотки электромагнитной системы магнитометра значения координат экстремумов характеристик градиента индукции поля (рис. 2) при одном и том же значении b (т.е. координат дислокации рабочих зон) весьма близки друг к другу.

Этот факт, уже обнаруженный ранее для полюсов-полусфер меньшего диаметра [26–32], тем более усиливается, если представить ординаты исходных характеристик, имеющихся на рис. 2, в относительных величинах, а именно как отношение текущих (по x) значений индукции B к индивидуальному «стартовому» значению индукции B_0, полученному при $x = 0$, т.е. как B/B_0, для соответствующего значения намагничивающей силы $I\omega$.

На рис. 3 в качестве примера показаны такие характеристики, полученные по данным, заимствованным из рис. 2а. Видно, что независимо от величины $I\omega$ данные B/B_0 обобщаются единой зависимостью; здесь, в отличие от рис. 2а, обозначения точек намерено изменены – с соответствующим перегибом этой зависимости. Это указывает и на единую дислокацию рабочих зон, разумеется, при одном и том же взаимном удалении b полюсов-полусфер. Столь же показательными являются зависимости B/B_0 от x для других значений b (рис. 4).

Оговоренные выше аргументы являются методически важными для экспериментатора: при выполнении опытов по определению влияния величины поля на магнитную восприимчивость образца не следует изменять его дислокацию между полюсами.

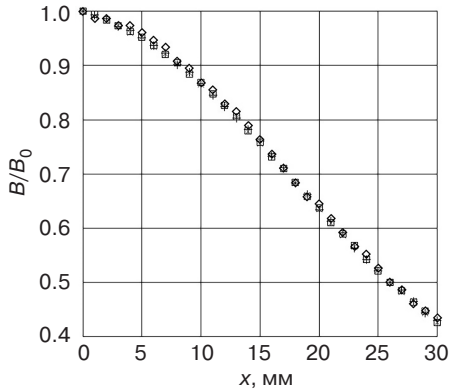


Рис. 3. Обобщенные (по данным рис. 2а) координатные характеристики индукции B в относительных величинах B/B_0, b = 9.5 мм, для значений намагничивающей силы $I\omega$: ◊ 3000 А, + 6000 А, □ 12000 А, × 22500 А

На протяженность зоны (по координате x) практически постоянных значений параметра grad$B$, т.е. на протяженность рабочей зоны магнитометра, указывают данные рис. 2–4, а именно, те участки зависимостей индукции B и относительной индукции B/B_0 от x, которые поддаются линейной аппроксимации (участки в окрестности точки перегиба таких зависимостей).

Еще более наглядно на протяженность рабочей зоны магнитометра указывают координатные характеристики параметра grad$B$ (рис. 2): эта зона локализуется в окрестности экстремума той или иной зависимости параметра dB/dx = grad$B$ от x.

Полученные данные (табл. 1) о координате x_{extr} дислокации рабочей зоны магнитометра в зависимости от взаимного удаления b полюсов-полусфер диаметром D = 157 мм показаны на рис. 5а (точки □). На рис. 5б (точки ■) показаны аналогичные данные,

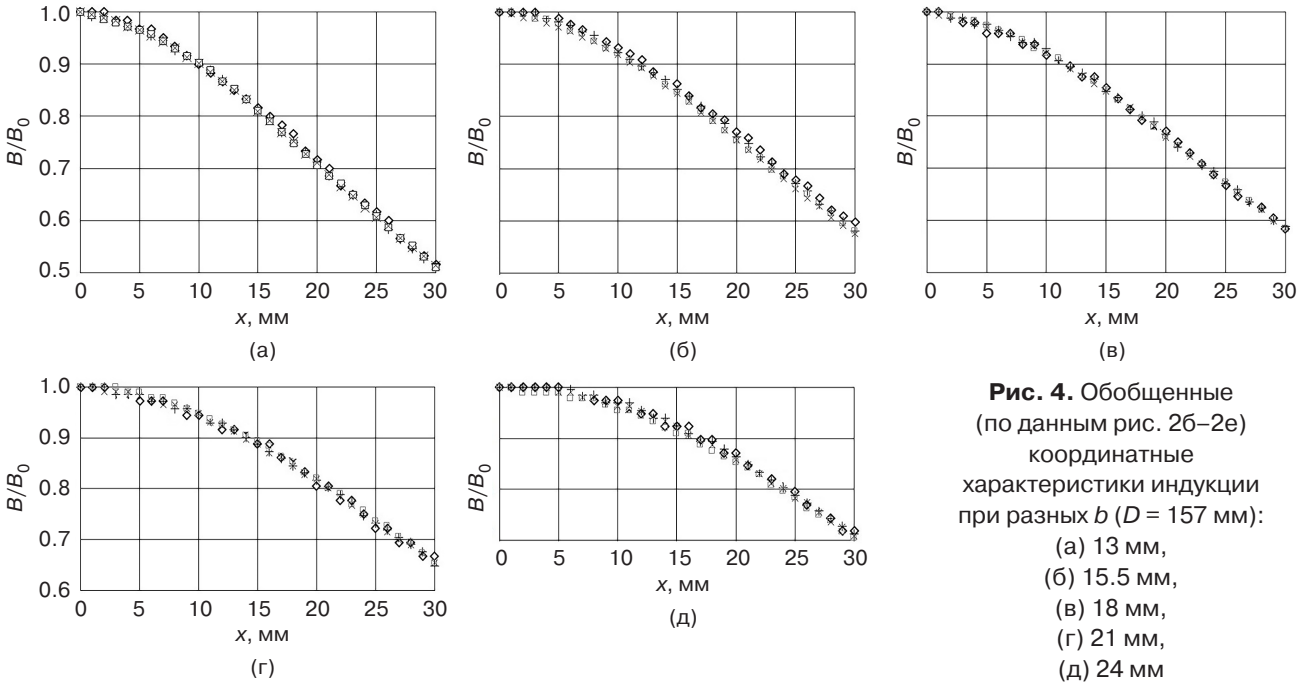


Рис. 4. Обобщенные (по данным рис. 2б–2е) координатные характеристики индукции при разных b (D = 157 мм): (а) 13 мм, (б) 15.5 мм, (в) 18 мм, (г) 21 мм, (д) 24 мм

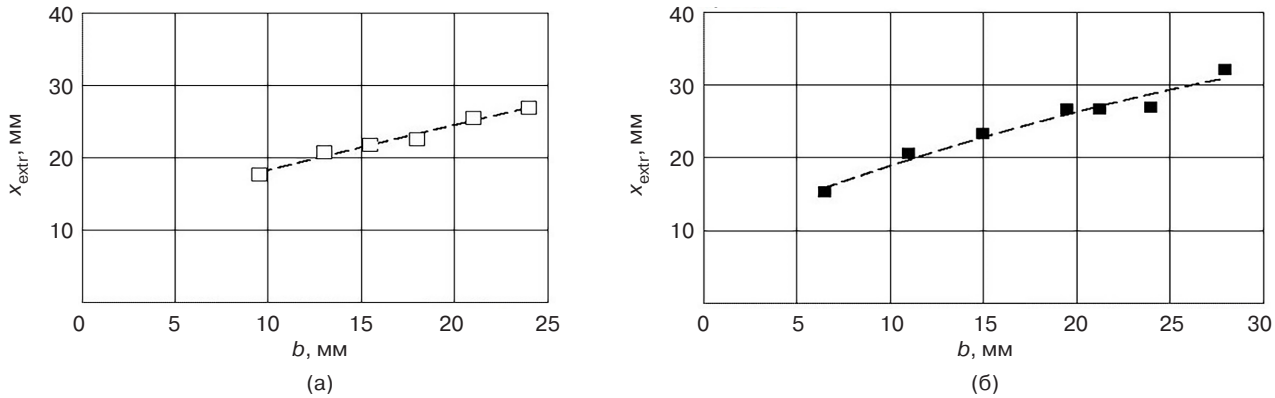


Рис. 5. Зависимость координаты дислокации рабочей зоны магнитометра от расстояния между его полюсами-полусферами диаметром D = 157 мм (а) и D = 184 мм (б)

полученные с использованием полюсов-полусфер диаметром D = 184 мм. Информация, подобная показанной ранее на рис. 2–4 и в табл. 1, при D = 184 мм приведена на рис. 6, 7 и в табл. 2.

Важно отметить, что если данные, полученные для обеих пар полюсов-полусфер (табл. 1, табл. 2, рис. 5), т.е. для D = 157 мм и D = 184 мм, представить в более универсальном, безразмерном виде, а именно как x_{extr}/D от b/D (рис. 8), то последует ожидаемый (подобно [31]) результат – они обобщаются единой зависимостью.

Представление этих данных в полулогарифмических координатах (рис. 8б) показывает возможность их квазилинеаризации в этих координатах в исследуемом диапазоне b/D = 0.035 … 0.153 с получением расчетной формулы логарифмического вида:

$$\frac{x_{extr}}{D} = A \ln \frac{b/D}{k} \qquad (1)$$

при значениях феноменологических параметров A = 0.061 и k = 0.0096.

Возможность квазилинеаризации тех же данных наблюдается и в логарифмических координатах (рис. 8в) – с получением альтернативной расчетной формулы степенного вида:

$$\frac{x_{extr}}{D} = G\left(\frac{b}{D}\right)^z \qquad (2)$$

при значениях феноменологических параметров G = 0.43 и z = 0.48.

Представляет интерес сравнение найденных выражений (1) и (2) с соответствующими выражениями, полученными ранее для полюсов-полусфер меньшего диаметра: D = 100 мм и D = 135 мм [31]. Важно отметить, что, оставаясь сходными функционально, сравниваемые выражения несколько отличаются лишь значениями феноменологических параметров A, k, G и z: A = 0.061 вместо A = 0.063, k = 0.0096 вместо k = 0.0095, G = 0.43 вместо G = 0.45, z = 0.48 вместо z = 0.5.

Если произвести совместную обработку данных, полученных для полюсов-полусфер повышенного диаметра, а именно D = 157 мм и D = 184 мм, с данными, полученными ранее для полюсов-полусфер меньшего диаметра, а именно D = 100 мм и D = 135 мм, то обобщенная зависимость, представленная на рис. 9, в полулогарифмических (рис. 9б) и логарифмических (рис. 9в) координатах, примет вид, аналогичный (1) и (2), со значениями феноменологических параметров A = 0.061, k = 0.0094, G = 0.43 и z = 0.48.

Таблица 2. Координаты экстремума x_{extr} между полюсами-полусферами диаметром D = 184 мм при разных значениях намагничивающей силы $I\omega$ обмотки и разных расстояниях b между полюсами-полусферами

$I\omega$, А	x_{extr}, мм						
	b = 6.5 мм	b = 11 мм	b = 15 мм	b = 19.5 мм	b = 21.2 мм	b = 24 мм	b = 28 мм
3000	15.65	20.75	23.71	–	26.3	25.58	32.20
6000	15.59	20.67	23.44	26.77	26.965	28.2	32.17
12000	14.89	20.55	22.97	26.71	27.25	28.025	32.32
22500	14.81	20.27	22.81	–	25.85	25.66	31.86
Среднее	**15.24**	**20.56**	**23.23**	**26.74**	**26.59**	**26.87**	**32.14**

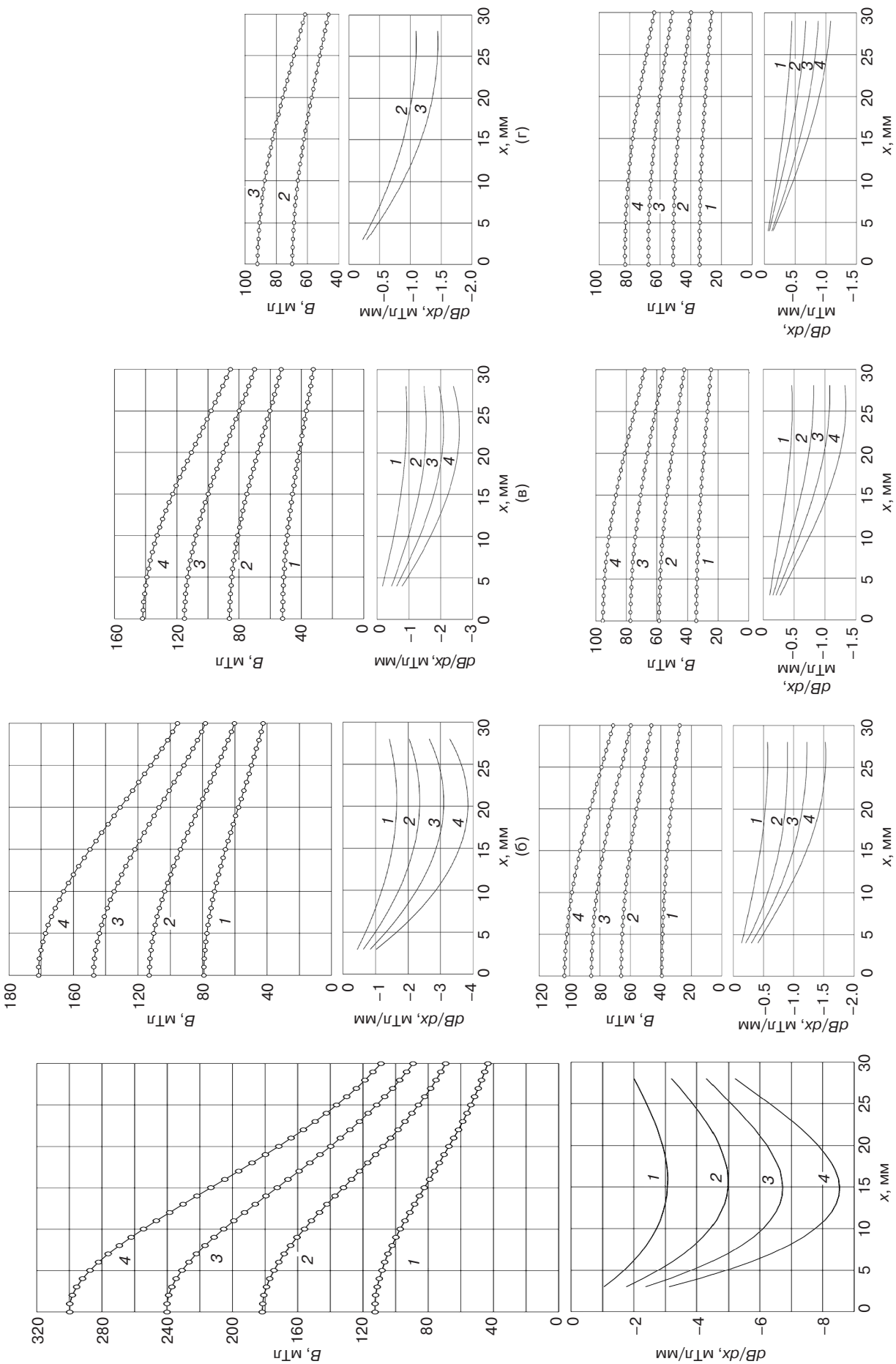


Рис. 6. Координатные характеристики индукции и градиента поля между полюсами-полусферами диаметром D = 184 мм при их взаимном удалении b: (а) 6.5 мм, (б) 11 мм, (в) 15 мм, (г) 19.5 мм, (д) 21.2 мм, (е) 24 мм, (ж) 28 мм; для значений намагничивающей силы $I\omega$: (*1*) 3000 А, (*2*) 6000 А, (*3*) 12000 А, (*4*) 22500 А

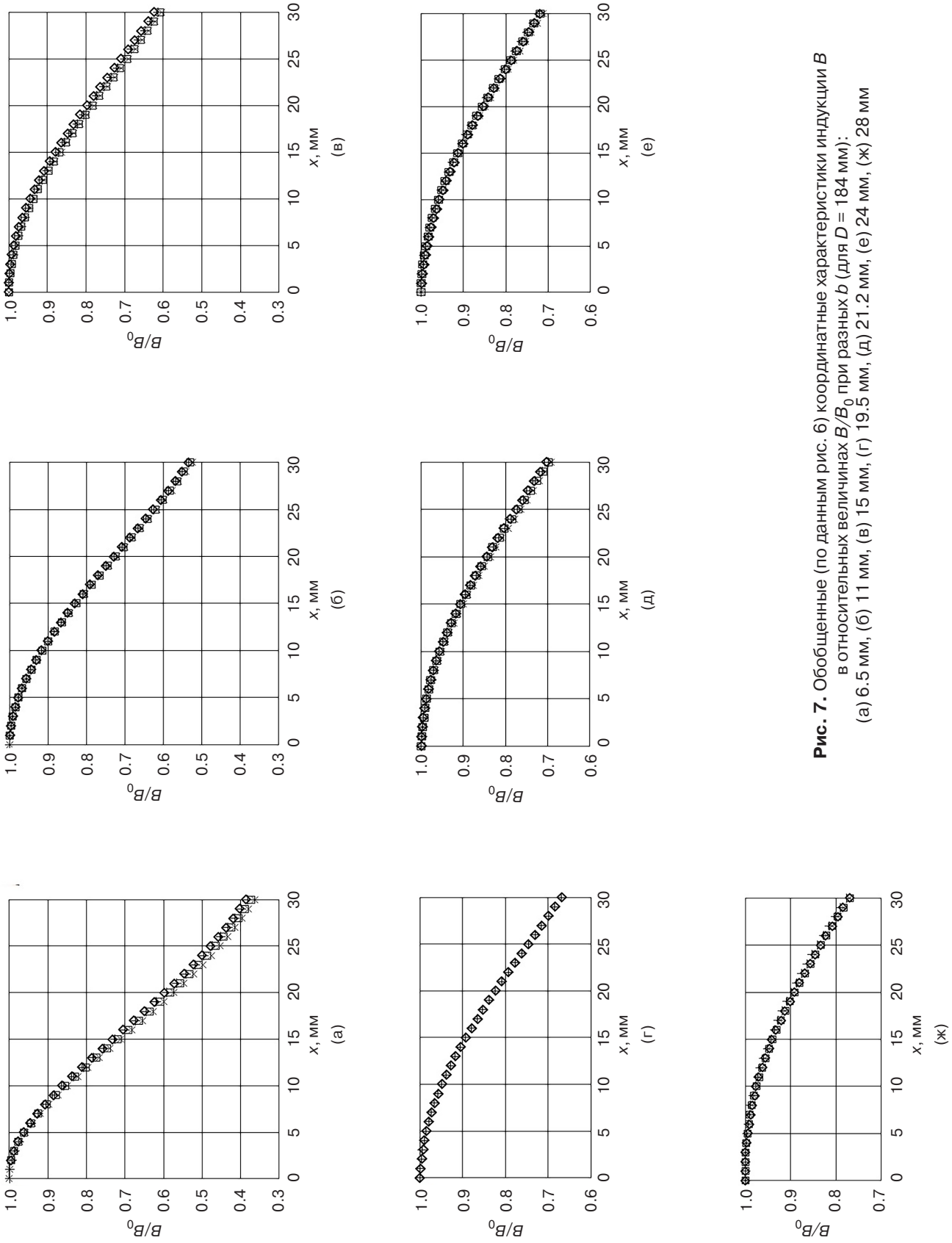


Рис. 7. Обобщенные (по данным рис. 6) координатные характеристики индукции B в относительных величинах B/B_0 при разных b (для D = 184 мм): (а) 6.5 мм, (б) 11 мм, (в) 15 мм, (г) 19.5 мм, (д) 21.2 мм, (е) 24 мм, (ж) 28 мм

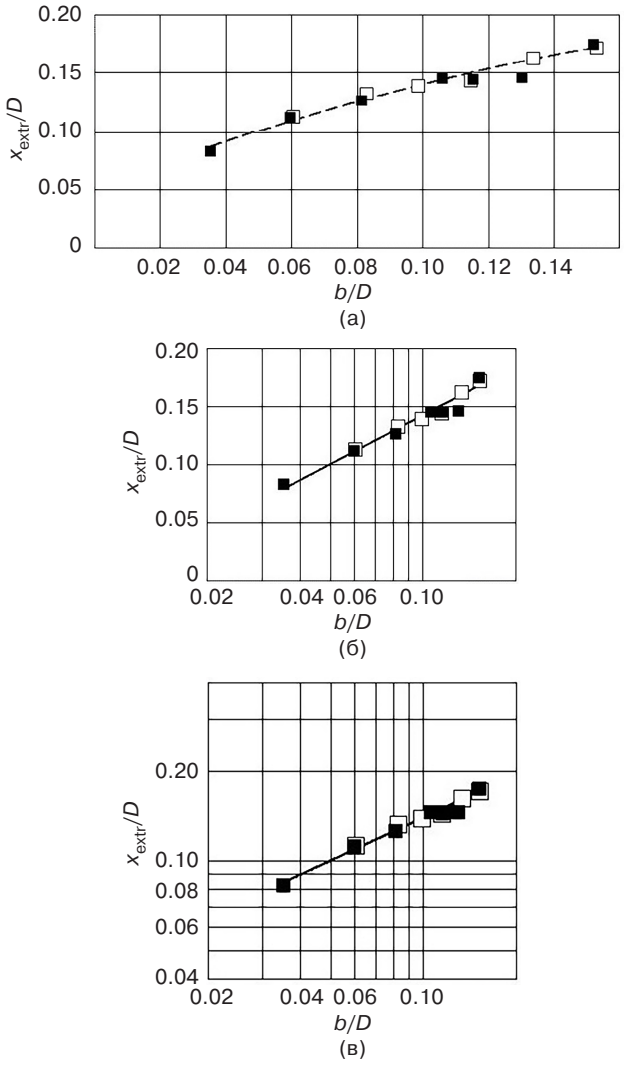


Рис. 8. Зависимость относительной координаты дислокации рабочей зоны магнитометра от относительного расстояния между его полюсами-полусферами диаметром D (□ 157 мм, ■ 184 мм) в обычных (а), полулогарифмических (б) и логарифмических (в) координатах

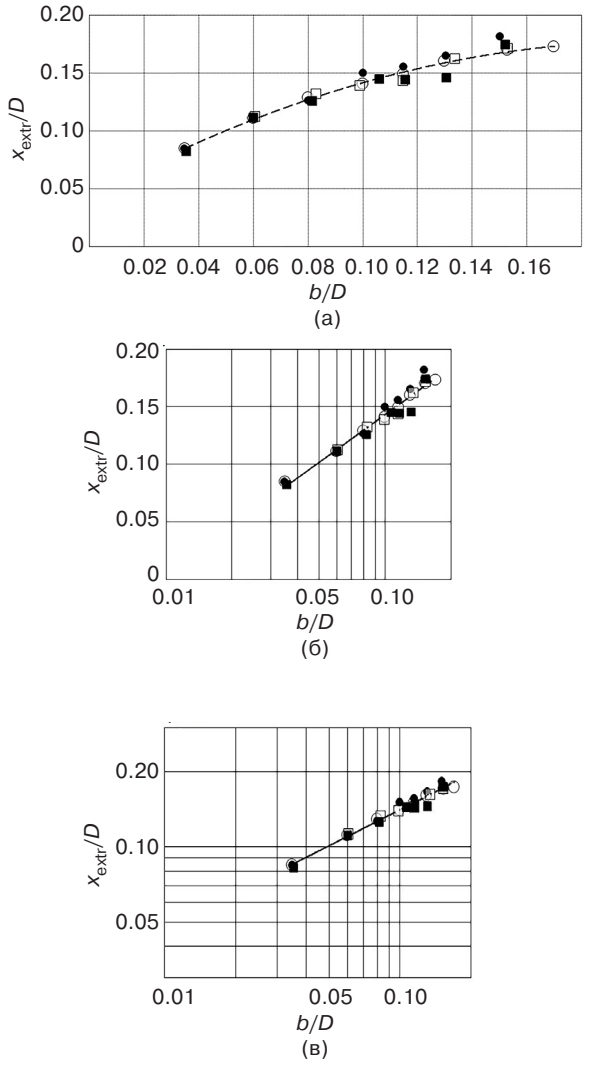


Рис. 9. Обобщенная зависимость относительной координаты дислокации рабочей зоны магнитометра от относительного расстояния между его полюсами-полусферами диаметром D (○ 100 мм, ● 135 мм, □ 157 мм, ■ 184 мм) в обычных (а), полулогарифмических (б) и логарифмических (в) координатах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вопрос расширения возможностей магнитометров пондеромоторного и магнитно-реологического типов, предназначенных для контроля магнитной восприимчивости объектов малых размеров: как дисперсных, так и отдельных частиц.

В дополнение к ранее полученным данным, установленным при использовании пар полюсов-полусфер диаметрами D = 100 мм и 135 мм, получены данные для полусфер повышенного диаметра D = 157 мм и 184 мм, взаимно разобщаемых на то или иное расстояние b.

Экспериментально определены ключевые зависимости магнитной индукции B при пошаговом удалении x от центра симметрии межполюсной области, т.е. по линии действия пондеромоторной силы, а по ним – зависимости градиента $\text{grad}B \cong dB/dx$. Это позволяет установить характерный перегиб каждой из кривых зависимостей B от x и экстремум каждой из кривых зависимостей dB/dx от x, в окрестности которого значения dB/dx практически одинаковы, что отвечает требованию постоянства неоднородности поля при выборе дислокации исполнительной зоны.

По установленным и обобщенным зависимостям B от x и dB/dx от x найдены координаты дислокации исполнительной зоны. Для вычисления этих координат, зависящих от величин D и b и не зависящих от намагничивающей силы $I\omega$ обмотки электромагнитной системы, получены аналитические выражения степенного и логарифмического вида.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки (проект № FSFZ-2024-0005).

ACKNOWLEDGMENTS

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment in the field of science (project No. FSFZ-2024-0005).

Вклад авторов

М.Н. Полисмакова – концептуализация, проведение исследования, создание рукописи и ее редактирование.

Д.А. Сандуляк – методология, верификация данных, применение математических методов анализа, создание рукописи и ее редактирование.

А.С. Харин – проведение исследования, сбор материалов для исследования.

Д.А. Головченко – сбор и анализ материалов для исследования, создание черновика рукописи.

А.А. Сандуляк – методология, редактирование рукописи.

А.В. Сандуляк – верификация данных, формальный анализ, руководство исследованием.

H.M. Basconus – верификация данных, сбор материалов для исследования.

Authors' contributions

M.N. Polismakova – conceptualization, conducting a research and investigation process, writing and editing the text of the manuscript.

D.A. Sandulyak – methodology, data verification, applying mathematical methods to analyze data, preparation, writing and editing the text of the manuscript.

A.S. Kharin – conducting the study, collecting materials for the study.

D.A. Golovchenko – collecting and analyzing materials for the study, writing the original draft.

A.A. Sandulyak – methodology, editing the manuscript.

A.V. Sandulyak – data verification, formal analysis, supervision.

H.M. Basconus – data verification, collecting materials for the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mosleh N., Insinga A.R., Bahl C.R.H., Bjørk R. The magnetic properties of packings of cylinders. *J. Magn. Magn. Mater*. 2024;607(3):172391. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172391
2. Uestuener K., Katter M., Rodewald W. Dependence of the mean grain size and coercivity of sintered Nd–Fe–B magnets on the initial powder particle size. *IEEE Trans. Magn*. 2006;42(10):2897–2899. https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.879889
3. Anhalt M., Weidenfeller B. Magnetic properties of polymer bonded soft magnetic particles for various filler fractions. *J. App. Phys*. 2007;101(2):023907. https://doi.org/10.1063/1.2424395
4. Schäfer K., Braun T., Riegg S., Musekamp J., Gutfleisch O. Polymer-bonded magnets produced by laser powder bed fusion: Influence of powder morphology, filler fraction and energy input on the magnetic and mechanical properties. *Mater. Res. Bull*. 2023;158(3):112051. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.112051
5. McFarlane J., Weber C., Wiechert A., Yiacoumi S., Tsouris C. High-gradient magnetic separation of colloidal uranium oxide particles from soil components in aqueous suspensions. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects*. 2024;2:100023. https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2023.100023
6. Живулько А.М., Янушкевич К.И., Даниленко Е.Г., Зеленов Ф.В., Бандурина О.Н. Магнитные свойства твердых растворов $Mn_{1-x}Gd_xSe$. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2022;23(4):748–755. https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755
7. Normile P.S., Andersson M.S., Mathieu R., Lee S.S., Singh G., De Toro J.A. Demagnetization effects in dense nanoparticle assemblies. *Appl. Phys. Lett*. 2016;109(15):152404. https://doi.org/10.1063/1.4964517
8. Bjørk R., Zhou Z. The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles. *J. Magn. Magn. Mater*. 2019;476: 417–422. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.005
9. Walmsley N.S., Chantrell R.W., Gore J.G., Maylin M. Experimental and computational investigation of the magnetic susceptibility of composite soft materials. *J. Phys. D: App. Phys*. 2000;33(7):784–790. http://doi.org/10.1088/0022-3727/33/7/306
10. Gao Y., Fujiki T., Dozono H., Muramatsu K., Guan W., Yuan J., Tian C., Chen B. Modeling of Magnetic Characteristics of Soft Magnetic Composite Using Magnetic Field Analysis. *IEEE Trans. Magn*. 2018;54(3):7401504. https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2772293
11. Tortarolo M., Zysler R.D., Romero H. Magnetic order in amorphous $(Fe_{0.25}Nd_{0.75})_{0.6}B_{0.4}$ nanoparticles. *J. Appl. Phys*. 2009;105(11):113918. https://doi.org/10.1063/1.3140607
12. Zysler R.D., De Biasi E., Ramos C.A., Fiorani D., Romero H. Surface and Interparticle Effects in Amorphous Magnetic Nanoparticles. In: Fiorani D. (Ed.). *Surface Effects in Magnetic Nanoparticles.* Springer; 2005. P. 239–261. https://doi.org/10.1007/0-387-26018-8_8
13. Maciaszek R., Kollár P., Birčáková Z., Tkáč M., Füzer J., Olekšáková D., Volavka D., Samuely T., Kováč J., Bureš R., Fáberová M. Effects of particle surface modifcation on magnetic behavior of soft magnetic $Fe@SiO_2$ composites and Fe compacts. *J. Mater. Sci*. 2024;59:11781–11798. https://doi.org/10.1007/s10853-024-09881-1
14. Baskar D., Adler S.B. High temperature Faraday balance for *in situ* measurement of magnetization in transition metal oxides. *Rev. Sci. Instrum*. 2007;78(2):023908. https://doi.org/10.1063/1.2432476
15. Moze O., Giovanelli L., Kockelmann W., de Groot C.H., de Boer F.R., Buschow K.H.J. Structure and magnetic properties of $Nd_2Co_{17-x}Ga_x$ compounds studied by magnetic measurements and neutron diffraction. *J. Magn. Magn. Mater*. 1998;189: 329–334. https://doi.org/10.1016/s0304-8853(98)00291-1

16. Gaucherand F., Beaugnon E. Magnetic texturing in ferromagnetic cobalt alloys. *Physica B: Cond. Matt.* 2004;346–347: 262–266. https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.01.062
17. Caignaert V., Maignan A., Pralong V., Hébert S., Pelloquin D. A cobaltite with a room temperature electrical and magnetic transition: $YBaCo_4O_7$. *Solid State Sci*. 2006;8(10):1160–1163. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.05.004
18. Zhang C.P., Chaud X., Beaugnon E., Zhou L. Crystalline phase transition information induced by high temperature susceptibility transformations in bulk PMP-YBCO superconductor growth *in-situ*. *Physica C.* 2015;508:25–30. https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.11.002
19. Bombik A., Leśniewska B., Pacyna A.W. Magnetic susceptibility of powder and single-crystal $TmFeO_3$ orthoferrite. *J. Magn. Magn. Mater*. 2000;214(3):243–250. https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00049-4
20. Kobayashi H., Tabuchi M., Shikano M., Kageyama H., Kanno R. Structure, and magnetic and electrochemical properties of layered oxides, Li_2IrO_3. *J. Mater. Chem*. 2003;13(4):957–962. https://doi.org/10.1039/b207282c
21. Seidov Z., Krug von Nidda H.-A., Hemberger J., Loidl A., Sultanov G., Kerimova E., Panfilov A. Magnetic susceptibility and ESR study of the covalent-chain antiferromagnets $TlFeS_2$ and $TlFeSe_2$. *Phys. Rev. B*. 2001;65:014433. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.014433
22. Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S.A. Fast sweep-rate plastic Faraday force magnetometer with simultaneous sample temperature measurement. *Rev. Sci. Instrum*. 2012;83(12):125104. https://doi.org/10.1063/1.4769049
23. Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D. Magnetic susceptibility measurements on fly ash admixtured cement hydrated with groundwater and seawater. *Am. J. Mater. Sci*. 2012;2(1):32–36. https://doi.org/10.5923/j.materials.20120201.06
24. Mexner W., Heinemann K. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance. *Rev. Sci. Instrum*. 1993;64(11):3336–3337. https://doi.org/10.1063/1.1144303
25. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer. *J. App. Phys*. 2017;121(9):094701. https://doi.org/10.1063/1.4977719
26. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Сандуляк Д.А. Подход к координации малообъемного образца при реализации пондеромоторного метода определения его магнитной восприимчивости. *Russ. Technol. J*. 2017;5(2):57–69. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-2-57-69
27. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Сандуляк Д.А., Киселев Д.О. *Устройство для создания и диагностики зоны стабильной неоднородности магнитного поля*: пат. 2737609 РФ. Заявка № 2020121691; заявл. 30.06.2020; опубл. 01.12.2020. Бюл. 34.
28. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Сандуляк Д.А. *Способ магнитно-реологического контроля магнитной восприимчивости частицы*: пат. 2753159 РФ. Заявка № 2020143220; заявл. 27.12.2020; опубл. 12.08.2021. Бюл. 23.
29. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Сандуляк Д.А. Магнетометр Фарадея с полюсными наконечниками-полусферами: идентификация зоны стабильного силового фактора. *Russ. Technol. J*. 2017;5(6):43–54. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-43-54
30. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Ershova V.A. The approach to the creation and identification of the positioning zone of the sample in the Faraday magnetometer. *J. Magn. Magn. Mater*. 2019;469:665–673. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.06.068
31. Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Dwivedi A.P., Doumanidis C.C., Sandulyak A.V., Ershova V.A. Magnetic Field Between Polar Hemispheres: Remarks on the Dislocation of Zones of a Constant Gradient and Force Factor. *Nanotechnol. Percept*. 2023;19(3):67–79.
32. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Pamme N. Faraday Magnetometer with Polar Hemispheres: Stability Zones for Measuring of Magnetic Susceptibility of Particles. *Mater. Today: Proc*. 2022;59(3):933–940. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.015

REFERENCES

1. Mosleh N., Insinga A.R., Bahl C.R.H., Bjørk R. The magnetic properties of packings of cylinders. *J. Magn. Magn. Mater*. 2024;607(3):172391. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172391
2. Uestuener K., Katter M., Rodewald W. Dependence of the mean grain size and coercivity of sintered Nd–Fe–B magnets on the initial powder particle size. *IEEE Trans. Magn*. 2006;42(10):2897–2899. https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.879889
3. Anhalt M., Weidenfeller B. Magnetic properties of polymer bonded soft magnetic particles for various filler fractions. *J. App. Phys*. 2007;101(2):023907. https://doi.org/10.1063/1.2424395
4. Schäfer K., Braun T., Riegg S., Musekamp J., Gutfleisch O. Polymer-bonded magnets produced by laser powder bed fusion: Influence of powder morphology, filler fraction and energy input on the magnetic and mechanical properties. *Mater. Res. Bull*. 2023;158(3):112051. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.112051
5. McFarlane J., Weber C., Wiechert A., Yiacoumi S., Tsouris C. High-gradient magnetic separation of colloidal uranium oxide particles from soil components in aqueous suspensions. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects*. 2024;2:100023. https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2023.100023
6. Zhivulko A.M., Yanushkevich K.I., Danilenko E.G., Zelenov F.V., Bandurina O.N. Magnetic properties of $Mn_{1-x}Gd_xSe$ solid solutions. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal = Siberian Aerospace Journal.* 2022;23(4):748–755 (in Russ.). https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755
7. Normile P.S., Andersson M.S., Mathieu R., Lee S.S., Singh G., De Toro J.A. Demagnetization effects in dense nanoparticle assemblies. *Appl. Phys. Lett*. 2016;109(15):152404. https://doi.org/10.1063/1.4964517

8. Bjørk R., Zhou Z. The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles. *J. Magn. Magn. Mater*. 2019;476: 417–422. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.005
9. Walmsley N.S., Chantrell R.W., Gore J.G., Maylin M. Experimental and computational investigation of the magnetic susceptibility of composite soft materials. *J. Phys. D: App. Phys*. 2000;33(7):784–790. http://doi.org/10.1088/0022-3727/33/7/306
10. Gao Y., Fujiki T., Dozono H., Muramatsu K., Guan W., Yuan J., Tian C., Chen B. Modeling of Magnetic Characteristics of Soft Magnetic Composite Using Magnetic Field Analysis. *IEEE Trans. Magn*. 2018;54(3):7401504. https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2772293
11. Tortarolo M., Zysler R.D., Romero H. Magnetic order in amorphous $(Fe_{0.25}Nd_{0.75})_{0.6}B_{0.4}$ nanoparticles. *J. Appl. Phys*. 2009;105(11):113918. https://doi.org/10.1063/1.3140607
12. Zysler R.D., De Biasi E., Ramos C.A., Fiorani D., Romero H. Surface and Interparticle Effects in Amorphous Magnetic Nanoparticles. In: Fiorani D. (Ed.). *Surface Effects in Magnetic Nanoparticles.* Springer; 2005. P. 239–261. https://doi.org/10.1007/0-387-26018-8_8
13. Maciaszek R., Kollár P., Birčáková Z., Tkáč M., Füzer J., Olekšáková D., Volavka D., Samuely T., Kováč J., Bureš R., Fáberová M. Effects of particle surface modifcation on magnetic behavior of soft magnetic $Fe@SiO_2$ composites and Fe compacts. *J. Mater. Sci*. 2024;59:11781–11798. https://doi.org/10.1007/s10853-024-09881-1
14. Baskar D., Adler S.B. High temperature Faraday balance for *in situ* measurement of magnetization in transition metal oxides. *Rev. Sci. Instrum*. 2007;78(2):023908. https://doi.org/10.1063/1.2432476
15. Moze O., Giovanelli L., Kockelmann W., de Groot C.H., de Boer F.R., Buschow K.H.J. Structure and magnetic properties of $Nd_2Co_{17-x}Ga_x$ compounds studied by magnetic measurements and neutron diffraction. *J. Magn. Magn. Mater*. 1998;189: 329–334. https://doi.org/10.1016/s0304-8853(98)00291-1
16. Gaucherand F., Beaugnon E. Magnetic texturing in ferromagnetic cobalt alloys. *Physica B: Cond. Matt.* 2004;346–347: 262–266. https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.01.062
17. Caignaert V., Maignan A., Pralong V., Hébert S., Pelloquin D. A cobaltite with a room temperature electrical and magnetic transition: $YBaCo_4O_7$. *Solid State Sci*. 2006;8(10):1160–1163. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.05.004
18. Zhang C.P., Chaud X., Beaugnon E., Zhou L. Crystalline phase transition information induced by high temperature susceptibility transformations in bulk PMP-YBCO superconductor growth *in-situ*. *Physica C.* 2015;508:25–30. https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.11.002
19. Bombik A., Leśniewska B., Pacyna A.W. Magnetic susceptibility of powder and single-crystal $TmFeO_3$ orthoferrite. *J. Magn. Magn. Mater*. 2000;214(3):243–250. https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00049-4
20. Kobayashi H., Tabuchi M., Shikano M., Kageyama H., Kanno R. Structure, and magnetic and electrochemical properties of layered oxides, Li_2IrO_3. *J. Mater. Chem*. 2003;13(4):957–962. https://doi.org/10.1039/b207282c
21. Seidov Z., Krug von Nidda H.-A., Hemberger J., Loidl A., Sultanov G., Kerimova E., Panfilov A. Magnetic susceptibility and ESR study of the covalent-chain antiferromagnets $TlFeS_2$ and $TlFeSe_2$. *Phys. Rev. B*. 2001;65:014433. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.014433
22. Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S.A. Fast sweep-rate plastic Faraday force magnetometer with simultaneous sample temperature measurement. *Rev. Sci. Instrum*. 2012;83(12):125104. https://doi.org/10.1063/1.4769049
23. Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D. Magnetic susceptibility measurements on fly ash admixtured cement hydrated with groundwater and seawater. *Am. J. Mater. Sci*. 2012;2(1):32–36. https://doi.org/10.5923/j.materials.20120201.06
24. Mexner W., Heinemann K. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance. *Rev. Sci. Instrum*. 1993;64(11):3336–3337. https://doi.org/10.1063/1.1144303
25. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer. *J. App. Phys*. 2017;121(9):094701. https://doi.org/10.1063/1.4977719
26. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Sandulyak D.A. An approach for choosing positioning of small volume sample at instantiation ponderomotive Faraday method in determining its magnetic susceptibility. *Russ. Technol. J*. 2017;5(2):57–69 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-2-57-69
27. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Kiselev D.O. *Device for Creation and Diagnostics of Stable Magnetic Field Inhomogeneity Zone*: Pat. RU 2737609 Publ. 01.12.2020 (in Russ.).
28. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ershova V.A., Sandulyak D.A. *Method for Magnetic-Reological Control of Magnetic Susceptibility of Particle*: Pat. RU 2753159. Publ. 12.08.2021 (in Russ.).
29. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Sandulyak D.A. Faraday magnetometer with spheric pole pieces: identification zone with a stable force factor. *Russ. Technol. J*. 2017;5(6):43–54 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-43-54
30. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Ershova V.A. The approach to the creation and identification of the positioning zone of the sample in the Faraday magnetometer. *J. Magn. Magn. Mater*. 2019;469:665–673. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.06.068
31. Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Dwivedi A.P., Doumanidis C.C., Sandulyak A.V., Ershova V.A. Magnetic Field Between Polar Hemispheres: Remarks on the Dislocation of Zones of a Constant Gradient and Force Factor. *Nanotechnol. Percept*. 2023;19(3):67–79.
32. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Pamme N. Faraday Magnetometer with Polar Hemispheres: Stability Zones for Measuring of Magnetic Susceptibility of Particles. *Mater. Today: Proc*. 2022;59(3):933–940. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.015

Об авторах

Полисмакова Мария Николаевна, к.т.н., доцент, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: polismakova@mirea.ru. Scopus Author ID 36621096600, ResearcherID O-8796-2017, SPIN-код РИНЦ 3845-8391, https://orcid.org/0000-0002-4564-6206

Сандуляк Дарья Александровна, к.т.н., доцент, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sandulyak_d@mirea.ru. Scopus Author ID 36621369400, ResearcherID L-9814-2016, SPIN-код РИНЦ 8114-8109, https://orcid.org/0000-0003-4269-6133

Харин Алексей Сергеевич, преподаватель-исследователь, инженер лаборатории магнитного контроля и разделения материалов, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: linnetdar@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 8435-3232, https://orcid.org/0000-0002-0922-1366

Головченко Дарья Андреевна, преподаватель-исследователь, стажер-исследователь лаборатории магнитного контроля и разделения материалов, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golovchenko@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4303-1093, https://orcid.org/0000-0002-6227-6884

Сандуляк Анна Александровна, д.т.н., профессор, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sandulyak_a@mirea.ru. Scopus Author ID 7004032043, ResearcherID S-5187-2017, SPIN-код РИНЦ 8858-1720, https://orcid.org/0000-0002-5111-6092

Сандуляк Александр Васильевич, д.т.н., профессор, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sandulyak@mirea.ru. Scopus Author ID 57194504434, ResearcherID V-6094-2018, SPIN-код РИНЦ 3795-5374, https://orcid.org/0000-0001-7605-2702

Haci Mehmet Baskonus, Professor, Department of Mathematics and Science Education, Faculty of Education, Harran University (Sanliurfa, 63190 Turkey). E-mail: hmbaskonus@gmail.com. Scopus Author ID 36835781300, ResearcherID H-4335-2019, https://orcid.org/0000-0003-4085-3625

About the Authors

Maria N. Polismakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Devices and Information-Measuring Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: polismakova@mirea.ru. Scopus Author ID 36621096600, ResearcherID O-8796-2017, RSCI SPIN-code 3845-8391, https://orcid.org/0000-0002-4564-6206

Daria A. Sandulyak, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Devices and Information-Measuring Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sandulyak_d@mirea.ru. Scopus Author ID 36621369400, ResearcherID L-9814-2016, RSCI SPIN-code 8114-8109, https://orcid.org/0000-0003-4269-6133

Alexey S. Kharin, Engineer, Laboratory of Magnetic Control and Material's Separation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: linnetdar@mail.ru. RSCI SPIN-code 8435-3232, https://orcid.org/0000-0002-0922-1366

Daria A. Golovchenko, Researcher Intern, Laboratory of Magnetic Control and Material's Separation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: golovchenko@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4303-1093, https://orcid.org/0000-0002-6227-6884

Anna A. Sandulyak, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Devices and Information-Measuring Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sandulyak_a@mirea.ru. Scopus Author ID 7004032043, ResearcherID S-5187-2017, RSCI SPIN-code 8858-1720, https://orcid.org/0000-0002-5111-6092

Alexander V. Sandulyak, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Devices and Information-Measuring Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sandulyak@mirea.ru. Scopus Author ID 57194504434, ResearcherID V-6094-2018, RSCI SPIN-code 3795-5374, https://orcid.org/0000-0001-7605-2702

Haci Mehmet Baskonus, Professor, Department of Mathematics and Science Education, Faculty of Education, Harran University (Sanliurfa, 63190 Turkey). E-mail: hmbaskonus@gmail.com. Scopus Author ID 36835781300, ResearcherID H-4335-2019, https://orcid.org/0000-0003-4085-3625

Russian Technological Journal.
2025;13(4):69–77

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

УДК 621.313.8
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-69-77
EDN AVHESX

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока

А.С. Кривогузова [@], **С.Н. Ткаченко**, **А.А. Шпилевой**

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041 Россия
[@] *Автор для переписки, e-mail: krivoguzova99@bk.ru*

• **Поступила:** 14.11.2024 • **Доработана:** 11.02.2025 • **Принята к опубликованию:** 27.05.2025

Резюме

Цели. Цель работы – определение оптимального количества витков в каждой из обмоток и влияния параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока (brushless direct current electric motor, BLDC-двигателя).

Методы. Использованы методы натурного эксперимента на испытательном стенде, состоящем из модернизированного BLDC-двигателя, источника питания и регулятора скорости. Также использовались методы математического моделирования, решения задачи линейного программирования и аппроксимации.

Результаты. В ходе экспериментов получены зависимости пускового тока и числа оборотов на старте от числа витков в каждой из обмоток для модернизированного BLDC-двигателя. Экспериментально установлено, что количество витков в обмотках имеет предельное значение, признаками чего является пересечение кривых пускового тока и стартовых оборотов или исчезновение функциональной зависимости между пусковым током и оборотами двигателя. Разработана математическая модель модернизированного BLDC-двигателя, которая хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Используя математическую модель, можно определить оптимальное количество витков в каждой из обмоток двигателя, а также уровень коэффициента полезного действия BLDC-двигателя. Предложена параметрическая модель, которая позволяет определить значение стартовых оборотов двигателя по значению пускового тока и напряжению батареи для диапазона витков в обмотке от 8 до 14. Данные модели позволяют определять характеристики двигателя на стадии его проектирования.

Выводы. Выявлено, что существует интервал для количества витков в каждой из обмоток BLDC-двигателя, в котором будет наблюдаться оптимум коэффициента полезного действия двигателя. Также выявлено, что для определения базовых пусковых характеристик BLDC-двигателя достаточно двух параметров, которые легко измерить на практике: пусковой ток и уровень напряжения источника питания.

Ключевые слова: BLDC-двигатель, пусковые характеристики двигателя, обмотки двигателя, количество витков в обмотках двигателя, математическая модель

© А.С. Кривогузова, С.Н. Ткаченко, А.А. Шпилевой, 2025

Для цитирования: Кривогузова А.С., Ткаченко С.Н., Шпилевой А.А. Влияние параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):69–77. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-69-77, https://www.elibrary.ru/AVHESX

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Effect of winding and power supply parameters on the starting characteristics of an upgraded brushless DC motor

Alexandra S. Krivoguzova [@],
Sergey N. Tkachenko,
Andrey A. Shpilevoy

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: krivoguzova99@bk.ru

• **Submitted:** 14.11.2024 • **Revised:** 11.02.2025 • **Accepted:** 27.05.2025

Abstract

Objectives. This work is aimed at determining the optimum number of turns in each winding and the effect of winding and power supply parameters on the starting characteristics of an upgraded brushless direct current motor (BLDC motor).

Methods. A full-scale experiment on a test bench consisting of an upgraded BLDC motor, a power supply source, and a speed controller was conducted. Methods of mathematical simulation, linear programming, and approximation were also applied.

Results. During the experiments, the dependencies of inrush current and starting speed on the number of turns in each winding of the upgraded BLDC motor were obtained. It was experimentally established that the number of turns in the windings has a limiting value, which is confirmed by either the intersection of the curves of inrush current and starting speed, or the disappearance of the functional dependence between the inrush current and motor speed. A mathematical model for the upgraded BLDC motor was developed, which showed good agreement with the experimental results. Using this mathematical model, the optimum number of turns in each of the motor windings and the efficiency of a BLDC motor can be determined. A parametric model for determining the motor starting speed by the values of inrush current and battery voltage at the number of turns in the winding from 8 to 14 was proposed. The developed models make it possible to determine the motor characteristics at the design stage.

Conclusions. There exists an interval of the number of turns in each of the windings of a BLDC motor, where the motor demonstrates its optimum efficiency. Inrush current and supply voltage were found to be the parameters that are easily measurable in practice and sufficient for determining the basic starting characteristics of a BLDC motor.

Keywords: brushless direct current motor, BLDC motor, motor starting characteristics, motor windings, number of motor winding turns, mathematical simulation

For citation: Krivoguzova A.S., Tkachenko S.N., Shpilevoy A.A. Effect of winding and power supply parameters on the starting characteristics of an upgraded brushless DC motor. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):69–77. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-69-77, https://www.elibrary.ru/AVHESX

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Бесщеточные двигатели постоянного тока (brushless direct current electric motor, BLDC-двигатели) находят широкое применение в самых разных отраслях и сферах [1, 2]. На сегодняшний день данный тип двигателя может иметь коэффициент полезного действия (КПД) до 94% при условии минимизации потерь в регуляторе скорости [3, 4] и оптимальном режиме работы батареи питания [5]. Минимальный набор оборудования, необходимый для работы BLDC-двигателя, состоит из регулятора скорости (electronic electronic speed controlle, ESC-регулятор) и батареи питания, которая питает регулятор скорости, преобразованное напряжение с которого подается на каждую из 3 фаз двигателя.

Конструктивно BLDC-двигатель представляет собой статор с обмотками и постоянными магнитами и вращающийся в статоре ротор. Одна из наиболее часто встречающихся конструкций BLDC-двигателя – 12N14P: 12 обмоток статора и 14 магнитных полюсов ротора. При этом двигатель является трехфазным и обмоток фактически не 12, а только 3. Один провод навит вокруг 4 магнитов. Для управления подобным двигателем используются трехфазные регуляторы скорости. Подобные устройства чувствительны к пульсациям напряжения, которые в свою очередь приводят к резким изменениям крутящего момента и снижению эффективности [6].

Улучшение контроля каждой отдельной обмотки позволяет уменьшить колебания крутящего момента [7], что повышает стабильность системы и снижает энергопотребление. Таким образом, направлением модернизации BLDC-двигателей является увеличение количества отдельных обмоток. Например, в [8] рассматривается пятифазный двигатель, что требует увеличения количества обмоток. Подобное изменение количества фаз приводит к повышению стабильности и безотказности работы двигателя.

Аналогичные примеры [9] доказывают необходимость как внедрения нового регулятора скорости BLDC-двигателя, так и конструктивного изменения самого BLDC-двигателя. Вместо традиционной схемы с 3 обмотками можно использовать 12 отдельных обмоток. Это позволит регулировать ток в каждой из них по отдельности, обеспечивая более точный контроль магнитного поля и крутящего момента. Такая модернизация улучшает динамические характеристики двигателя, снижает пульсации, обеспечивает более гибкую адаптацию под различные режимы работы и повышает надежность [10, 11]. Это особенно важно при работе двигателя в сложных эксплуатационных условиях.

Первым этапом подобной работы является модернизация традиционного BLDC-двигателя. При этом необходимо заново изготовить все обмотки двигателя и создать отдельные выводы для каждой из них. Следовательно, возникает вопрос о влиянии количества витков на параметры работы BLDC-двигателя, прежде всего, на пусковые характеристики.

Классически оптимальное число витков в обмотке определяется на основе нескольких параметров [12]: необходимого крутящего момента, рабочей частоты, сопротивления и индуктивности обмоток. При переходе к 12 отдельным обмоткам, важно учитывать увеличение сопротивления из-за увеличения числа витков, а также влияние их взаимной индуктивности.

Таким образом, целью данной работы является определение оптимального количества витков в каждой из обмоток и влияния параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного BLDC-двигателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поскольку конфигурация BLDC-двигателя 12N14P является одной из наиболее часто встречающихся, то для проведения исследований был выбран подобный двигатель, в частности, Brother Hobby Avenger 2806.5 1300kV (Brotherhobby, Китай), в котором на роторе установлены дуговые магниты N52H, статор выполнен из кремнистой стали Kawasaki 0.2 мм, материал корпуса – алюминиевый сплав Al 7075, а вал является полым и выполнен из титанового сплава. В двигателе используется медная обмотка сечением 0.75 мм.

Два двигателя были разобраны и перемотаны медным проводом того же сечения, после чего получилось 12 отдельных обмоток, каждая со своим отдельным выводом. Каждая из 12 обмоток размещена в отдельном пазе в соответствии со схемой статора. На рис. 1 представлены оригинальный BLDC-двигатель (слева) и модернизированный (справа). Как можно видеть, из оригинального двигателя выходит 3 провода, а из модернизированного – 12.

Измерения проводились на 2 двигателях с целью обеспечения повторяемости получаемых значений. Никаких отличий в работе первого и второго модернизированного двигателей не наблюдалось.

Рис. 1. BLDC-двигатель 2806 + 1350kV до перемотки (слева) и после перемотки с убранным ротором (справа)

В качестве батареи питания использован источник постоянного тока GW INSTEK GPD-73303S (GOOD WILL INSTRUMENT, Китай; погрешность по напряжению ±(0.03% + 10 е.м.р.); погрешность по току ±(0.3% + 10 е.м.р.)), позволяющий фиксировать уровень подаваемого напряжения и ограничивать максимальный ток на ESC-регуляторе. Также использовался стандартный трехфазный ESC-регулятор. Подключение регулятора скорости к модернизированному двигателю осуществлялось путем подачи напряжения на каждую из обмоток, причем с каждой из фаз ESC-регулятора напряжение подавалось на 4 обмотки двигателя.

ESC-регулятор имеет следующие параметры: входное напряжение: DC 5-36 В (удельное напряжение равно номинальному напряжению двигателя), выходной ток – в пределах 15 А, ток защиты – 15 А.

Измерения были проведены при различном количестве витков (от 8 до 16) в каждой из обмоток двигателя с шагом в 1 виток. Напряжение питания на источнике изменялось в диапазоне 5–7 В с шагом в 1 В. Ограничение по току на источнике питания было установлено на отметке 1 А. Относительно узкий диапазон напряжений обусловлен тем, что при питании, превышающем 7 В, в процессе пуска возникают большие перенапряжения, и измеряемые значения пускового тока носят случайный характер.

Ток с источника подавался на ESC-регулятор, который уже через специальную развязку питал BLDC-двигатель. Пусковой ток измерялся на входе двигателя при помощи цифрового универсального измерителя Tektronix DMM4020 (Tektronix Corporation, Китай) с базовой погрешностью 0.015%.

На вал двигателя был прикреплен винт с укрепленной на нем светоотражающей полосой для измерения частоты оборотов. Для этого использовался цифровой тахометр лазерного типа DT2234A (Shenzhen Sanpo Instrument, Китай) с разрешением 1 оборот в минуту (revolution per minute, RPM) для всего измеряемого диапазона и точностью ±0.05%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения оптимального числа витков были получены зависимости между количеством витков в каждой из 12 обмоток двигателя, пусковым током и начальными оборотами при фиксированном напряжении батареи, питающей двигатель через регулятор скорости (рис. 2–4).

Под пусковым током понимается минимальное значение тока на каждой из фаз двигателя (он же на выходе из ESC-регулятора), при котором происходит его запуск. Стартовые обороты двигателя – это количество оборотов двигателя в минуту при токе, равном пусковому значению.

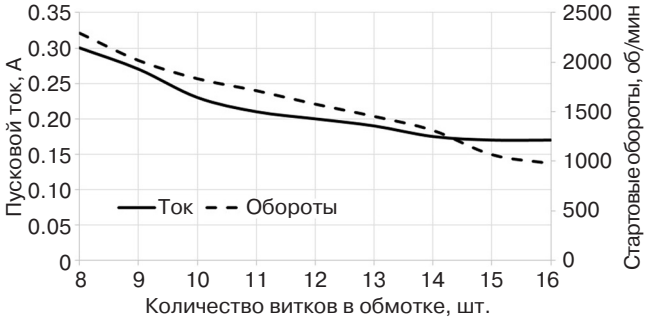


Рис. 2. Зависимость пускового тока и числа оборотов двигателя на старте от числа витков в каждой из обмоток при напряжении батареи 5 В

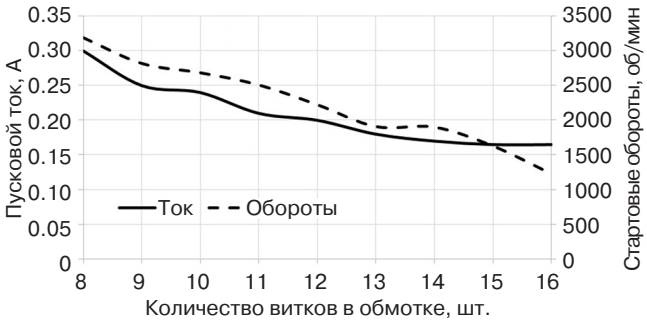


Рис. 3. Зависимость пускового тока и числа оборотов двигателя на старте от числа витков в каждой из обмоток при напряжении батареи 6 В

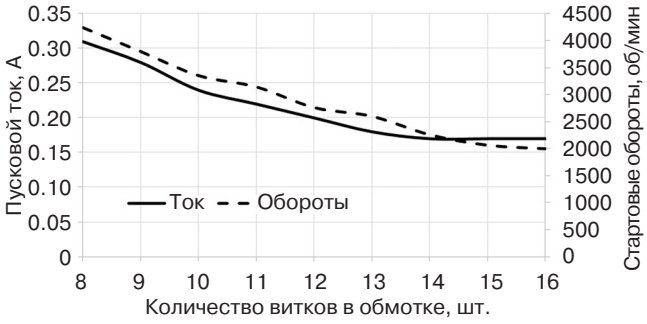


Рис. 4. Зависимость пускового тока и числа оборотов двигателя на старте от числа витков в каждой из обмоток при уровне напряжения батареи 7 В

Как показано на рис. 2–4, после 14 витков пусковой ток стабилизируется, переходя в стационарный режим, а обороты снижаются. Это значение витков является предельно допустимым. Именно при нем исчезает функциональная зависимость между пусковым током и оборотами двигателя. Характерная зависимость между этими величинами приведена на рис. 5. С увеличением количества витков пусковой ток перестает изменяться, а стартовые обороты продолжают снижаться.

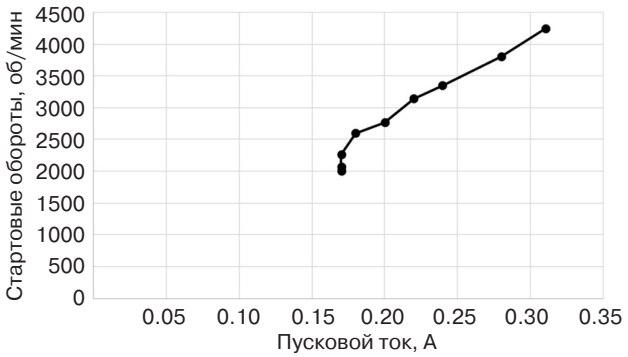


Рис. 5. Зависимость между пусковым током и стартовыми оборотами двигателя при уровне напряжения батареи 7 В

Как видно из рис. 5, имеются 3 точки с одним и тем же значением пускового тока, при этом обороты вращения двигателя снижаются. Аналогичные зависимости получены и при других исследованных уровнях напряжения батареи питания. Данный факт свидетельствует о том, что количество витков в каждой из обмоток, превышающее 14, является нецелесообразным, т.к. это приводит только к росту потерь, а не к увеличению скоростных характеристик двигателя (стартовых оборотов, в частности).

Таким образом, экспериментально установлено, что количество витков в обмотках имеет предельное значение, признаками чего является исчезновение функциональной зависимости между пусковым током и оборотами двигателя (как на рис. 5). Превышение некоторого предельного количества витков в каждой из обмоток (в исследованном случае – 14 витков) ведет к ухудшению характеристик работы BLDC-двигателя.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для объяснения полученных в предыдущем разделе зависимостей в среде *MATLAB*[1] была построена модель BLDC-двигателя с учетом отклонений, вносимых элементами двигателя и ESC-регулятором [13, 14].

[1] https://www.mathworks.com/products/matlab.html. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

Чтобы описать зависимости между пусковым током, стартовыми оборотами двигателя и количеством витков с учетом отклонений, вносимых элементами двигателя и регулятором ESC, создана математическая модель, которая учитывает характеристики элементов системы и взаимосвязь этих параметров. Модель основывается на характеристиках BLDC-двигателя с учетом параметров электромагнитного сопротивления и индуктивности.

Электрические параметры:

1. Сопротивление обмотки на фазу R_{phase} и ее индуктивность L_{phase}, которые зависят от количества витков N.
2. Внутреннее сопротивление R_{ESC} и индуктивность L_{ESC} регулятора.
3. Параметры батареи: напряжение V_{bat} и внутреннее сопротивление R_{bat}.

Пусковые параметры:

1. Пусковой ток I_{start}.
2. Стартовая угловая скорость ω_{start}.

Необходимо построить зависимость следующих параметров от количества витков:

1. Индуктивность обмотки:

$$L_{phase}(N) = k_L N^2, \quad (1)$$

где k_L – коэффициент индуктивности на виток, зависящий от материала и геометрии обмотки.

2. Сопротивление обмотки:

$$R_{phase}(N) = k_R N, \quad (2)$$

где k_R – коэффициент сопротивления на виток.

3. Полное сопротивление R_{total} и индуктивность L_{total} цепи:

$$R_{total} = R_{phase} + R_{ESC} + R_{bat}, \quad (3)$$

$$L_{total} = L_{phase} + L_{ESC}. \quad (4)$$

При запуске двигателя пусковой ток будет определяться полным сопротивлением и индуктивностью, а также напряжением батареи. В момент запуска противо-ЭДС (противодействующая электродвижущая сила) отсутствует, т.к. угловая скорость равна нулю:

$$I_{start} = \frac{V_{bat}}{R_{total}}. \quad (5)$$

Модель для зависимости пускового тока от количества витков.

Поскольку R_{total} и L_{total} зависят от количества витков N, можно выразить I_{start} как

$$I_{start}(N) = \frac{V_{bat}}{k_R N + R_{ESC} + R_{bat}}. \quad (6)$$

Модель для зависимости стартовой угловой скорости от пускового тока.

Стартовая угловая скорость ω_{start} зависит от пускового крутящего момента T_{start}, создаваемого пусковым током. При этом крутящий момент определяется как:

$$T_{start} = K_t I_{start}, \quad (7)$$

где K_t – постоянная момента двигателя.

Соответственно, стартовая угловая скорость ω_{start} определяется уравнением движения, где силы сопротивления в начальный момент времени не влияют не ее значение:

$$\omega_{start} = \frac{K_t I_{start}}{J}. \quad (8)$$

С увеличением момента инерции J стартовая угловая скорость ω_{start} уменьшается, следовательно, двигатель дольше разгоняется до начальных оборотов.

Теперь можно выразить зависимости I_{start} и ω_{start} через количество витков:

$$I_{start}(N) = \frac{V_{bat}}{k_R N + R_{ESC} + R_{bat}}, \quad (9)$$

$$\omega_{start}(N) = \frac{K_t V_{bat}}{J(k_R N + R_{ESC} + R_{bat})}. \quad (10)$$

Для учета отклонений в системе можно добавить случайные возмущения в значения сопротивлений и индуктивностей:

- сопротивление обмотки $R_{phase} = (1 + \delta_R)k_R N$, где δ_R – случайное отклонение сопротивления обмотки;
- индуктивность обмотки $L_{phase} = (1 + \delta_L)k_L N^2$, где δ_L – случайное отклонение индуктивности обмотки.

Теперь с учетом возможных отклонений:

- пусковой ток

$$I_{start}(N) = \frac{V_{bat}}{(1+\delta_R)k_R N + R_{ESC} + R_{bat}}, \quad (11)$$

- стартовая угловая скорость

$$\omega_{start}(N) = \frac{K_t V_{bat}}{J((1+\delta_R)k_R N + R_{ESC} + R_{bat})}. \quad (12)$$

Преобразование угловой скорости в зависимость скорости в оборотах в минуту (RPM) осуществляется следующим образом:

$$RPM_{start} = \omega_{start}\frac{60}{2\pi}. \quad (13)$$

Стартовые обороты с учетом отклонений:

$$RPM_{start}(N) = \omega_{start}(N)\frac{60}{2\pi} = \frac{K_t V_{bat} 60}{2\pi J((1+\delta_R)k_R N + R_{ESC} + R_{bat})}. \quad (14)$$

Модель выражает зависимость стартовых оборотов двигателя RPM_{start} от различных факторов, таких как количество витков N, напряжение питания V_{bat}, сопротивление R, индуктивность обмоток, а также моменты инерции системы. Крутящий момент двигателя T пропорционален току, протекающему через обмотки, с учетом коэффициента K_t, который отражает конструктивные особенности двигателя. При старте двигатель сталкивается с моментом сопротивления, определяемым сопротивлением обмоток, внешних цепей (контроллера R_{ESC}, батареи R_{bat}) и внутренним трением.

В формуле учитываются отклонения в сопротивлении обмоток δ_R, которые могут возникать из-за нагрева или других внешних факторов. Сопротивление всей системы представлено в виде суммы $(1 + \delta_R)k_R N + R_{ESC} + R_{bat}$.

Индуктивность обмоток влияет на время реакции двигателя, но в данной модели индуктивность включена косвенно через изменение электрических параметров (сопротивление и падение напряжения). Увеличение количества витков N приводит к снижению стартовых оборотов из-за возрастания общего сопротивления системы. Увеличение напряжения питания V_{bat} повышает стартовые обороты. Отклонения в сопротивлении обмоток δ_R и других элементов системы могут заметно снизить эффективность работы двигателя на старте.

Таким образом, данная модель демонстрирует, как стартовые обороты зависят от электрических и механических параметров системы. Она позволяет учитывать реальное состояние компонентов и помогает оптимизировать конструкцию двигателя для достижения нужных характеристик.

Результаты моделирования пускового тока, соответствующие рис. 2–4, представлены на рис. 6. Здесь приведены экспериментальная и расчетная зависимость пускового тока от числа витков при уровне напряжения батареи 6 В. При других уровнях напряжения батареи наблюдается аналогичное хорошее соответствие расчетных значений с экспериментом. Следовательно, построенная модель достаточно хорошо описывает реальные зависимости пускового тока.

Особый интерес представляют результаты моделирования КПД двигателя, которые представлены на рис. 7. Видно, что при количестве витков менее 8 и более 14 значения КПД – минимальные, особенно, по сравнению с диапазоном витков от 12 до 14. Другими словами, при малом количестве витков в обмотке наблюдается низкая эффективность работы

двигателя ввиду недостаточной интенсивности магнитного поля. При количестве витков более 14 наблюдается низкий крутящий момент из-за высоких потерь мощности на сопротивлении обмотки.

На основании приведенных результатов можно сделать следующий вывод: из рядов данных для пускового тока и стартовых оборотов двигателя необходимо удалить значения, которые соответствуют 15 и 16 виткам. При этом добавлять значения при 6 и 7 витках также нецелесообразно, т.к. соответствующие им КПД слишком низкие. В этом случае получим полноценные функциональные зависимости между стартовыми оборотами и пусковым током. На рис. 8 представлены зависимости числа оборотов от пускового тока и их аппроксимации при 3 уровнях напряжения батареи питания.

Как видно, все три графика можно аппроксимировать линейными зависимостями [15], причем угол наклона этих линий будет одним и тем же.

Наряду с предложенной выше математической моделью разработана параметрическая модель, которая позволяет просто и быстро выполнить инженерные расчеты, а именно, предсказывает значение стартовых оборотов RPM_{start} по значению пускового тока I_{start} и напряжению батареи V_{bat} для диапазона витков в обмотке от 8 до 14.

В результате моделирования получена следующая аналитическая зависимость:

$$\lg RPM_{\text{start}} = 1.817 I_{\text{start}} + \frac{1}{8} V_{\text{bat}} + 2.2. \qquad (15)$$

Таким образом, становится возможным рассчитать значение стартовых оборотов по легко измеряемым характеристикам пускового тока и напряжению батареи для различного количества витков. Следовательно, возможно конструировать двигатели с заранее ожидаемыми характеристиками.

В таблице приведены значения оборотов двигателя, рассчитанные по формуле (15), в сравнении с величинами, измеренными экспериментально для батареи с напряжением 5 В.

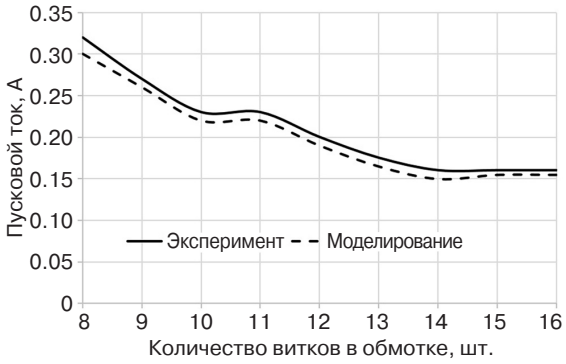


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная зависимости пускового тока модернизированного двигателя от числа витков в каждой из обмоток при напряжении батареи 6 В

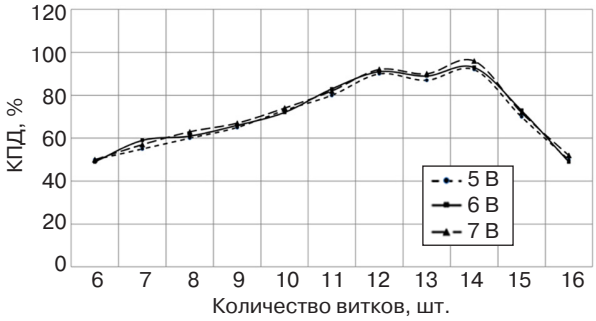


Рис. 7. Зависимость КПД двигателя от количества витков в каждой из обмоток при напряжениях батареи 5–7 В

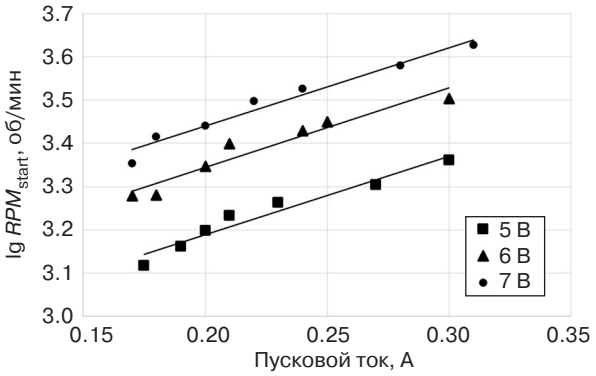


Рис. 8. Зависимости числа оборотов от пускового тока при различном уровне напряжения батареи питания

Таблица. Сравнение значений стартовых оборотов двигателя, полученных экспериментально и исходя из расчета по формуле (15) при значении напряжения батареи питания 5 В

Количество витков в каждой из обмоток двигателя, шт.	Стартовый ток, А	Стартовые обороты двигателя, эксперимент	Стартовые обороты двигателя, расчет	Относительное расхождение
8	0.30	2293	2345	2%
9	0.27	2017	2068	3%
10	0.23	1833	1749	5%
11	0.21	1712	1609	6%
12	0.20	1576	1543	2%
13	0.19	1452	1480	2%
14	0.175	1310	1390	6%

Как видно из таблицы, относительное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 6%. Для других напряжений батареи относительное расхождение не превышает 9%.

Таким образом, можно утверждать, что предложенная в работе формула позволяет определить стартовые обороты двигателя на стадии проектирования с достаточной для инженерных расчетов точностью.

ВЫВОДЫ

Построена математическая модель модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока, хорошо согласующаяся с реальным прототипом. С помощью данной модели можно определять оптимальное количество витков в каждой из обмоток через расчет КПД двигателя.

Построена параметрическая модель расчета стартовых оборотов BLDC-двигателя по значениям пускового тока и напряжения питающей батареи. Показана взаимосвязь стартовых оборотов модернизированного двигателя с базовыми характеристиками источника питания и ESC-регулятора, которые можно легко измерить. Полученная формула позволит проводить инженерные расчеты на стадии проектирования двигателей.

Для получения аналогичных зависимостей для двигателей других конфигураций необходимы дальнейшие исследования и построение соответствующих математических моделей. Также наличие постоянного слагаемого «2.2» в формуле (15) позволяет считать, что обнаружены не все фундаментальные зависимости, и, вероятно, обороты двигателя определяются не двумя, а тремя физическими величинами. Для подтверждения данной гипотезы предполагаются дальнейшие исследования.

Вклад авторов

А.С. Кривогузова – литературный обзор, вывод расчетных формул, написание компьютерных программ, проведение модельных расчетов, построение графиков, обсуждение результатов.

С.Н. Ткаченко – постановка задачи, проверка математической корректности вывода расчетных формул, корректура текста статьи, обсуждение результатов.

А.А. Шпилевой – постановка задачи, идея вывода расчетных соотношений, обсуждение результатов.

Authors' contributions

A.S. Krivoguzova – literature review, deriving the calculation formulas, writing the computer programs, conducting the model calculations, plotting, and discussing the results.

S.N. Tkachenko – formulating the problem, verifying the mathematical correctness of the calculation formulas, proofreading the text of the article, and discussing the results.

A.A. Shpilevoy – formulating the problem, the idea of deriving the calculation formulas, and discussing the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Moosavi S.S., Djerdir A., Amirat Y.A., Khaburi D.A. Demagnetization fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors: A review of the state-of-the-art. *J. Magn. Magn. Mater*. 2015;391:203–212. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.04.062
2. Mohanraj D., Aruldavid R., Verma R., Sathyasekar K., Barnawi A., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*. 2022;10:54833–54869. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011
3. Nguyen Q., Tran V., Pham Q.D., Giap V.N., Trinh M. Design brushless DC motor control by using proportional-integral strategy for a smart storage cabinet system. *Int. J. Power Electron. Drive Syst*. 2023;14:708–718. https://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i2.pp708-718
4. Carev V., Roháč J., Tkachenko S., Alloyarov K. The Electronic Switch of Windings of a Standard BLDC Motor. *Appl. Sci*. 2022;12(21):11096. https://doi.org/10.3390/app122111096
5. Conradt R., Heidinger F., Birke K. Methodology for Determining Time-Dependent Lead Battery Failure Rates from Field Data. *Batteries*. 2021;7(2):39. https://doi.org/10.3390/batteries7020039
6. Zhu Z., Leong J. Analysis and mitigation of torsional vibration of PM brushless AC/DC drives with direct torque controller. *IEEE Trans. Ind. Appl*. 2012;48(4):1296–1306. https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2199452
7. Premkumar K., Manikandan B.V. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor. *Neurocomputing*. 2014;138:260–270. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.01.038
8. Assoun I., Idkhajine L., Nahid-Mobarakeh B., Meibody-Tabar F., Monmasson E., Pacault N. Wide-Speed Range Sensorless Control of Five-Phase PMSM Drive under Healthy and Open Phase Fault Conditions for Aerospace Applications. *Energies*. 2023;16(1):279. https://doi.org/10.3390/en16010279
9. Tapre M., Karampuri R. Design and Comparison of Five-Phase Induction Motors with Different Dimensions for Heavy Duty Electric Vehicles. In: *IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation* (*SEFET*). IEEE; 2023. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/SeFeT57834.2023.10245615
10. Xia K., Li Z., Lu J., Dong B., Bi C. Acoustic noise of brushless DC motors induced by electromagnetic torque ripple. *J. Power Electron*. 2018;17(4):963–971. https://doi.org/10.6113/JPE.2017.17.4.963

11. Viswanathan V., Seenithangom J. Commutation torque ripple reduction in the BLDC motor using modified SEPIC and three-level NPC inverter. *IEEE Trans. Power Electron*. 2018;33(1):535–546. https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2671400
12. Varshney A., Gupta D., Dwivedi B. Speed response of brushless DC motor using fuzzy PID controller under varying load condition. *J. Electr. Syst. Inf. Technol*. 2017;4(2):310–321. https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.12.014
13. Manda P., Veeramalla S.K. Brushless DC motor modeling and simulation in the MATLAB/SIMULINK software environment. *Adv. Modelling Anal. B*. 2021;64(1–4):27–33. https://doi.org/10.18280/ama_b.641-404
14. Sial M., Sahoo N. Torque ripple minimization and speed control of switched reluctance motor drives using extremum-seeking PI controller. *Electr. Eng*. 2024;106(6):7301–7322. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02427-3
15. Harris F.E. *Mathematics for Physical Science and Engineering*. Academic Press; 2014. 944 p.

Об авторах

Кривогузова Александра Сергеевна, аспирант, Высшая школа компьютерных наук и искусственного интеллекта, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, д. 14). E-mail: krivoguzova99@bk.ru. SPIN-код РИНЦ 6326-2294, https://orcid.org/0000-0002-4090-662X

Ткаченко Сергей Николаевич, к.т.н., доцент ОНК «Институт высоких технологий», руководитель Цифровой кафедры, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, д. 14). E-mail: sntkachenko@kantiana.ru. Scopus Author ID 35750902000, SPIN-код РИНЦ 3717-6698, https://orcid.org/0000-0002-4708-6556

Шпилевой Андрей Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент, заместитель руководителя ОНК «Институт высоких технологий», ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, д. 14). E-mail: ashpilevoi@kantiana.ru. Scopus Author ID 6602332593, https://orcid.org/0000-0003-2610-6551

About the Authors

Alexandra S. Krivoguzova, Postgraduate Student, Higher School of Computer Science and Artificial Intelligence, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, A. Nevskogo ul., Kaliningrad, 236041 Russia). E-mail: krivoguzova99@bk.ru. RSCI SPIN-code 6326-2294, https://orcid.org/0000-0002-4090-662X

Sergey N. Tkachenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Institute of High Technologies, Head of the Digital Department, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, A. Nevskogo ul., Kaliningrad, 236041 Russia). E-mail: sntkachenko@kantiana.ru. Scopus Author ID 35750902000, RSCI SPIN-code 3717-6698, https://orcid.org/0000-0002-4708-6556

Andrey A. Shpilevoy, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Deputy Head, Institute of High Technologies, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, A. Nevskogo ul., Kaliningrad, 236041 Russia). E-mail: ashpilevoi@kantiana.ru. Scopus Author ID 6602332593, https://orcid.org/0000-0003-2610-6551

Russian Technological Journal.
2025;13(4):78–94

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

Математическое моделирование

Mathematical modeling

УДК 004.02
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-78-94
EDN CVZOXD

CC BY

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Современные методы оптимизации и особенности их применения

С.М. Бекетов [@], **Д.А. Зубкова, А.М. Гинцяк, Ж.В. Бурлуцкая, С.Г. Редько**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251 Россия
[@] *Автор для переписки, e-mail: salbek.beketov@spbpu.com*

• **Поступила:** 29.10.2024 • **Доработана:** 13.01.2025 • **Принята к опубликованию:** 13.05.2025

Резюме

Цели. Цель статьи – провести аналитический обзор методов и инструментов оптимизации, используемых в моделировании, для выявления их ключевых особенностей, эффективности и областей возможного применения. Исследование направлено на формирование целостной картины современных подходов, что позволит специалистам выбирать наиболее удобные методы для решения разнообразных задач. Ключевая задача – составить систематизированное представление об инструментах оптимизации, охватывающее различные методики и подходы, которые обеспечат как теоретическую, так и практическую ценность для разработки более эффективных моделей.

Методы. Для достижения поставленных целей исследование основывалось на обширной выборке научных публикаций и аналитических материалов, отобранных из специализированных баз данных и технической документации.

Результаты. Проведены анализ и классификация существующих методов оптимизации, что позволило выявить их сильные и слабые стороны, особенности применения, а также определить взаимосвязь между теоретическими концепциями и их практической реализацией. В ходе анализа рассмотрены различные подходы к оптимизации, охватывающие как классические, так и современные методы, что обеспечило всесторонний обзор применимых подходов в моделировании.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает важность грамотного подбора методов оптимизации, что способствует более эффективному и точному моделированию. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего изучения и сравнительного анализа методов на практике с целью более глубокого понимания их эффективности и применимости в различных условиях. Перспективы будущих исследований включают экспериментальное тестирование эффективности различных подходов на базе нескольких моделей, что позволит определить их преимущества и недостатки для более точного выбора метода в зависимости от специфики задач.

Ключевые слова: методы оптимизации, особенности применения, многокритериальные методы оптимизации, оптимизационные алгоритмы, эволюционные алгоритмы, оптимизация цифровых моделей, оптимизационная задача, программные инструменты оптимизации

© С.М. Бекетов, Д.А. Зубкова, А.М. Гинцяк, Ж.В. Бурлуцкая, С.Г. Редько, 2025

Для цитирования: Бекетов С.М., Зубкова Д.А., Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Редько С.Г. Современные методы оптимизации и особенности их применения. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):78–94. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-78-94, https://www.elibrary.ru/CVZOXD

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Modern optimization methods and their application features

Salbek M. Beketov [@], Daria A. Zubkova, Aleksei M. Gintciak, Zhanna V. Burlutskaya, Sergey G. Redko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: salbek.beketov@spbpu.com

• **Submitted:** 29.10.2024 • **Revised:** 13.01.2025 • **Accepted:** 13.05.2025

Abstract

Objectives. The authors conduct an analytical review of available optimization methods and simulation tools to identify their key features, effectiveness, and possible applications. The aim was to form an integrated picture of modern approaches, which may facilitate decision making when selecting the most appropriate method for a particular task. The key objective was to review and classify various optimization tools, which of theoretical and practical value for developers of new models.

Methods. Scientific publications and analytical materials were retrieved from specialized databases and technical documentation libraries.

Results. The analysis and classification of existing optimization methods allowed the authors to identify their advantages, disadvantages, and application features, as well as to determine the relationship between theoretical concepts and their practical implementation. During the analysis, various optimization approaches were considered, covering both classical and modern simulation methods.

Conclusions. The importance of informed selection of optimization methods, which raise the efficiency and accuracy of simulation procedures, is highlighted. The results obtained indicate the need for further study and comparative analysis of the methods used in practice in order to establish their efficiency and applicability in various scenarios. Future research directions include experimental testing of the effectiveness of various approaches based on several models in order to determine their advantages and disadvantages for a more informed selection of the method suitable for a particular task.

Keywords: optimization methods, application features, multi-criteria optimization methods, optimization algorithms, evolutionary algorithms, optimization of digital models, optimization problem, optimization software tools

For citation: Beketov S.M., Zubkova D.A., Gintciak A.M., Burlutskaya Zh.V., Redko S.G. Modern optimization methods and their application features. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):78–94. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-78-94, https://www.elibrary.ru/CVZOXD

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация играет важную роль в моделировании, помогая достигать оптимальных результатов, экономить ресурсы и повышать качество разрабатываемых продуктов и систем. Она становится необходимым элементом современного инженерного процесса, направленного на эффективное решение сложных задач и достижение высоких стандартов в технологическом прогрессе [1]. Однако для обеспечения эффективности и точности оптимизации важно избегать излишних повторений и учитывать разнообразие методов и их сложность в программной реализации. Это особенно важно в таких областях, как проектная деятельность [2], энергетика [3] и система здравоохранения [4], где даже небольшие улучшения могут иметь значительные последствия.

Библиометрический анализ оптимизационных техник подчеркивает эволюцию концепции «оптимизация» от проб и ошибок к более формализованным подходам [5, 6]. Данная эволюция приводит к необходимости систематизированного изложения основных методов приближенного решения задач оптимизации, которые рассматривают их вычислительные аспекты, области применимости и достоинства. Однако выбор метода оптимизации должен соответствовать особенностям моделей. Для этого необходимо учитывать требования к подходящим методам и инструментам, основываясь на понимании сути моделей и особенностей систем для создания более гибких и адаптивных условий для развития [7, 8].

Актуальность исследования методов оптимизации обусловлена рядом факторов, включая растущую сложность социотехнических и социоэкономических систем, развитие вычислительных мощностей и появление новых, более эффективных методов [9, 10].

Целью статьи является проведение аналитического обзора методов оптимизации. Данная цель направлена на классификацию методов оптимизации, а также оценку перспективности применения этих методов в моделях. Рассмотрение большого разнообразия методов оптимизации и дальнейший их анализ упрощает процесс исследования и делает оптимизационные подходы более доступными для широкого круга специалистов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ литературы позволяет выделить несколько ключевых методов оптимизации, которые широко применяются в различных областях исследования. Рост интереса к проблемам оптимизации моделей вызвал значительный объем исследований в этой области за последние несколько лет, что подчеркивает актуальность и важность разработки эффективных методов оптимизации.

Обзор литературы в рамках данной статьи основан на научно-исследовательских базах данных, Scopus[1], RSCI[2] и ВАК[3]. Поиск литературы проводился по следующим ключевым словам: «тип оптимизации», «многокритериальные методы оптимизации», «вычислительная сложность методов оптимизации», «параллельные вычисления», «методы оптимизации», «принятие решений», «оптимизационные алгоритмы», «эволюционные алгоритмы», «статистические методы», «математические методы», «имитационное моделирование», «оптимизация моделей», «оптимизационная задача», «проблемы оптимизации». Общее количество статей по этим запросам за 5 лет составляет 434.

Был выполнен анализ статей, и выбраны наиболее распространенные методы оптимизации в различных областях исследования. Результаты проведенного анализа (доли встречающихся статей относительно общего объема за последние 5 лет) показаны на рис. 1.

Методы оптимизации моделей определяют условия существования объекта или протекания процесса, при которых достигается наилучшее значение какого-либо свойства этого объекта или процесса. Они применяются для эффективного нахождения наилучших решений в различных задачах, где необходимо оптимизировать определенные параметры или критерии [11].

Результаты представляют собой сводный обзор методов оптимизации и их классификацию, позволяя

[1] https://www.scopus.com/. Дата обращения 29.10.2024. / Accessed October 29, 2024.

[2] Russian Science Citation Index – база данных, которая выделяет лучшие российские журналы в РИНЦ и размещает их на платформе Web of Science. [Russian Science Citation Index is a database that distinguishes the best Russian journals and places them on the Web of Science platform.]

[3] Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. [Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.]. https://vak.minobrnauki.gov.ru/. Дата обращения 29.10.2024. / Accessed October 29, 2024.

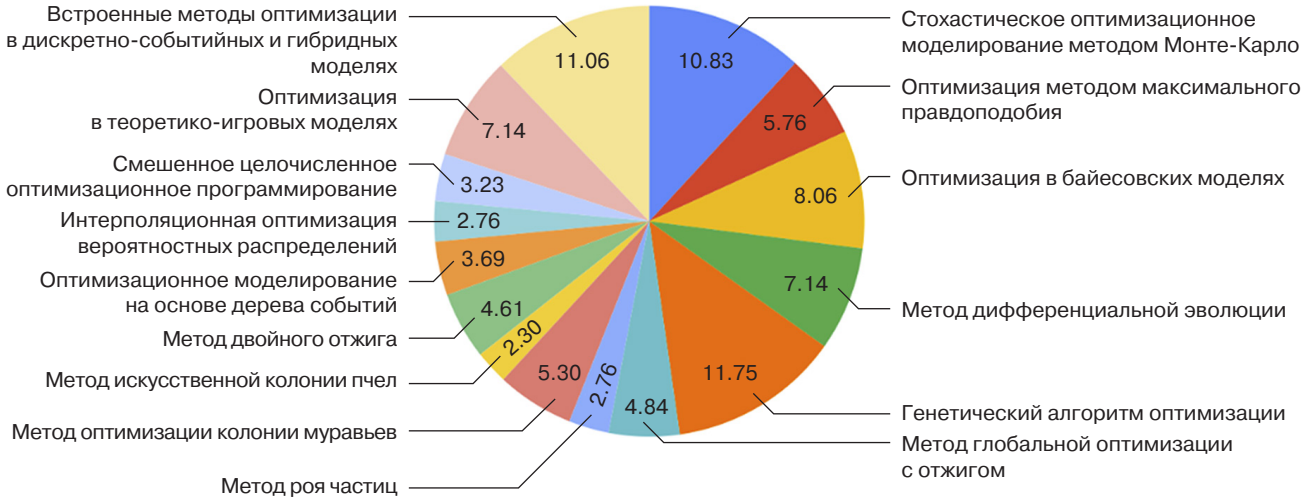


Рис. 1. Доли статей в различных областях исследования за 5 лет

исследователям выбирать конкретный метод оптимизации моделей в зависимости от поставленных задач, типа оптимизации, возможности учета сложных целевых функций, а также достоинств и недостатков методов.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Методы оптимизации можно разделить на две категории: методы, основанные на оценке параметров апостериорного распределения, и методы, основанные на неточной и аппроксимационной оценке. Апостериорная оценка – оценка, полученная эмпирическим путем, при выполнении опыта, эксперимента, а аппроксимационная оценка – это оценка, приближенная к реальным значениям. Внутри последней включены еще две подгруппы – первая основана на эволюционных алгоритмах, а вторая основана на имитационном моделировании. Разработанная авторами классификация методов оптимизации приведена на рис. 2.

Стохастическое оптимизационное моделирование методом Монте-Карло

В стохастическом моделировании часто применяется метод Монте-Карло, особенно в ситуациях, где требуется учет вероятностных параметров. Его широкое применение обусловлено возможностью

Рис. 2. Классификация методов оптимизации

прогнозирования различных исходов на основе вероятностных факторов.

Процесс стохастического моделирования методом Монте-Карло включает в себя следующие шаги: генерация случайных входных данных, выполнение моделирования, аккумуляция результатов и оценка явлений, которая в общем виде может быть описана формулой:

$$mc = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f(i), \quad (1)$$

где mc – оценка явления методом Монте-Карло, N – количество выполненных моделирований, $f(i)$ – результат i-го запуска модели.

В отличие от детерминированных методов, предполагающих строгое следование фиксированным алгоритмам, метод Монте-Карло основан на многократном повторении экспериментов (симуляций) с использованием случайных входных данных. Каждый запуск модели дает один возможный результат, а множество таких результатов позволяет оценить статистическое распределение исходов и, таким образом, более точно прогнозировать вероятностные явления.

Процесс стохастического моделирования методом Монте-Карло включает такие этапы как генерация случайных входных данных, моделирование, аккумуляция результатов (результаты каждого отдельного моделирования сохраняются), оценка явлений, где на основе накопленных данных проводится статистическая обработка, вычисляются средние значения, дисперсии, вероятности наступления событий и другие характеристики.

Применение метода Монте-Карло не ограничивается определенной областью и находит применение в различных задачах прогнозирования. Например, метод Монте-Карло использовался в сочетании с функцией ошибки в виде гауссовой функции для прогнозирования распространения эпидемии COVID-19 в Италии [12]. Авторы провели 150 симуляций методом Монте-Карло, чтобы получить более точный прогноз числа смертных случаев в Китае и Италии.

Метод Монте-Карло также применялся для сравнения производительности методов приоритезации критериев для выбора мест строительства солнечных электростанций в Иране [13]. В исследовании использовались две меры надежности для оценки различных методов приоритезации, и симулятор Монте-Карло оценивал значения надежности в каждом из этих методов, проводя анализ чувствительности.

Оптимизация методом максимального правдоподобия

Метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Estimation, MLE) представляет собой статистический подход, часто используемый самостоятельно или в сочетании с другими методами для обработки данных в исследованиях или при решении задач. Метод позволяет оценивать неизвестные параметры, максимизируя функцию правдоподобия, и находит применение для различных целей [14].

Метод MLE ищет такое значение θ, при котором функция правдоподобия максимальна:

$$\theta_{MLE} = \arg\max_{\theta} L(\theta|X), \quad (2)$$

где X – выборка данных; θ – параметрическая модель; $L(\theta|X)$ – функция правдоподобия, которая для данной модели измеряет вероятность получения наблюдаемых данных X при условии значения параметра θ.

Данный алгоритм реализации метода можно представить следующим образом: если предполагается, что данные наблюдений описываются определенной статистической моделью, то MLE позволяет подобрать такие параметры модели, которые делают наблюдаемые данные наиболее вероятными.

Основные шаги применения метода максимального правдоподобия состоят из определения параметрической модели, формулировки функции правдоподобия, максимизации функции правдоподобия.

Метод максимального правдоподобия широко применяется в статистике для оценки параметров в различных моделях, таких как линейные и обобщенные линейные модели, факторный анализ, моделирование структурных уравнений, проверка гипотез, формирование доверительных интервалов и дискретные модели выбора. Он основан на максимизации функции правдоподобия, отражающей вероятность выбора конкретного параметра при известных событиях. Метод MLE нацелен на поиск параметров, при которых результаты модели наиболее соответствуют реальным данным. Оценка правильности параметров производится с использованием информационного критерия Акаике, который сбалансированно оценивает сложность модели и увеличивает достоверность при оптимальном соотношении с максимальным правдоподобием. Наилучшей считается модель с минимальным значением информационного критерия Акаике и максимальным значением правдоподобия. Используется следующая формула для информационного критерия Акаике (Akaike information criterion, AIC):

$$AIC = -2\ln L + 2K, \quad (3)$$

где L – значение функции правдоподобия модели (условная вероятность получить наблюдаемые данные при заданных параметрах модели), K – число параметров модели.

Критерий Акаике можно понять как меру компромисса между точностью и простотой модели.

Если модель слишком сложна (например, содержит большое количество параметров), она может хорошо подстраиваться под данные, но теряет способность обобщать их. Критерий Акаике помогает избежать этой проблемы, добавляя штраф за увеличение количества параметров.

Оптимизация в байесовских моделях

Байесовские модели основаны на теореме Байеса, которая описывает способ обновления вероятностных оценок параметров модели на основе новых данных. Эти модели учитывают априорную информацию о параметрах и корректируют ее с учетом наблюдаемых данных. Теорема Байеса определена формулой:

$$P(\boldsymbol{\theta} \mid D) = \frac{P(D \mid \boldsymbol{\theta})P(\boldsymbol{\theta})}{P(D)}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\theta}$ – вектор параметров модели; D – набор данных, на котором обучается модель; $P(\boldsymbol{\theta}|D)$ – апостериорная вероятность параметров модели с учетом данных; $P(D|\boldsymbol{\theta})$ – вероятность данных с учетом параметров модели; $P(\boldsymbol{\theta})$ – априорная вероятность параметров модели; $P(D)$ – маргинальная вероятность данных.

Применение байесовских моделей начинается с задания априорного распределения, которое отражает начальные предположения о параметрах модели. Данное распределение может быть информативным, если есть данные из предыдущих исследований, или неинформативным, если начальные предположения минимальны. Затем вычисляется правдоподобие, которое показывает, насколько вероятны наблюдаемые данные при различных значениях параметров. На следующем этапе с помощью теоремы Байеса априорное распределение объединяется с правдоподобием для получения апостериорного распределения, которое отражает обновленные знания о параметрах модели после учета данных. Полученное апостериорное распределение интерпретируется для оценки параметров, определения доверительных интервалов и других статистических выводов. Таким образом, байесовские модели представляют собой метод, позволяющий объединять априорные знания и новые данные для более точной оценки параметров [15].

Такие модели применяются в задачах статистического анализа, машинного обучения и других областях, где необходимо учитывать неопределенность и обновлять вероятностные оценки по мере поступления новых данных.

Например, в работе [16] предложена математическая модель обнаружения аномальных наблюдений с использованием анализа чувствительности нейронной сети. Байесовский подход в данном исследовании позволяет учитывать неопределенность параметров и накапливать знания о поведении данных, что делает метод эффективным для выявления аномалий в сложных многомерных пространствах данных, таких как медицинские системы мониторинга или прогнозирования заболеваний.

В области экономики байесовские модели помогают оценивать влияние налоговых схем на различные социальные группы [17]. Использование теоретических основ плановой экономики в сочетании с байесовскими методами позволяет анализировать вероятностные эффекты изменений в налоговой политике и разрабатывать оптимальные схемы налогообложения, учитывающие неопределенность исходных данных и прогнозов. Байесовские методы используются при разработке и анализе машинных алгоритмов обучения, особенно в задачах оптимизации.

Например, в работе [18] предложена модель машинного обучения для организации работы сотрудников в удаленном и гибридном режимах. Байесовский подход позволяет эффективно оценивать неопределенность в данных, связанных с производительностью сотрудников, и учитывать вероятностное распределение различных факторов, таких как график работы, взаимодействие в команде и особенности рабочих процессов, что делает модель более адаптивной и гибкой.

Интерполяционная оптимизация вероятностных распределений

Интерполяционная оптимизация вероятностных распределений – это метод, который сочетает интерполяцию данных с построением вероятностных распределений для заполнения промежуточных значений между известными дискретными точками. Для этого используются сплайны – гладкие кусочно-полиномиальные функции, которые позволяют аппроксимировать сложные зависимости с высокой степенью точности.

В этом подходе ключевая задача состоит в том, чтобы построить функцию, которая не только проходит через заданные точки вероятностных распределений, но и сохраняет их важные характеристики, такие как математическое ожидание. Для построения сплайнов задается функция вида [19]:

$$S_i = a_i + b_i(x - x_i) + \frac{c_i}{2}(x - x_i)^2 + \frac{d_i}{6}(x - x_i)^3, \quad (5)$$

где a_i, b_i, c_i, d_i – коэффициенты, подлежащие определению на каждом из отрезков; $i = \overline{1,n}$, $x_{i-1} \le x \le x_i$.

Метод применяется в тех случаях, когда необходимо предсказать значения вероятностных распределений

в промежуточных точках на основе дискретных данных. Например, в моделях сплайны могут использоваться для интерполяции вероятностных распределений во времени или по значениям параметров.

Особое внимание уделяется сохранению средних характеристик распределения. Для этого используются сплайны, которые обеспечивают совпадение математического ожидания аппроксимированной функции с математическим ожиданием исходного распределения. Такой подход позволяет сохранять статистические свойства данных, что особенно важно в задачах, где требуется корректное представление вероятностных характеристик.

Одним из примеров применения такого подхода является исследование отказов сложных систем при комбинированных нагрузках. В работе [20] описан интерполяционный метод, который позволяет оценивать вероятность отказа системы на основе ограниченного количества данных об испытаниях при различных типах нагрузок. Использование сплайнов для интерполяции вероятностей отказа позволяет восстановить распределения для промежуточных значений параметров нагрузки, сохраняя при этом исходные статистические характеристики.

Другой пример связан с моделированием солнечной радиации, где сплайны с сохранением среднего значения применяются для интерполяции данных о солнечной активности [21]. Автор предложил метод интерполяции, который позволяет корректно восстанавливать распределение солнечной радиации в промежуточных точках временного ряда, обеспечивая совпадение математического ожидания сплайн-функции с исходным усредненным значением.

Смешанно-целочисленное оптимизационное программирование

Смешанно-целочисленное программирование представляет собой следующую оптимизационную задачу [22]:

$$\max\{\mathbf{c}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} : \mathbf{b}^1 \le \mathbf{A}\mathbf{x} \le \mathbf{b}^2, \mathbf{d}^1 \le \mathbf{x} \le \mathbf{d}^2, x_i \in S\}, \quad (6)$$

где $\mathbf{b}^1, \mathbf{b}^2, \mathbf{c}, \mathbf{d}^1, \mathbf{d}^2 \in \mathbb{R}^m$; $\mathbf{A}$ – действительная $m \times n$ -матрица; $\mathbf{x}$ – n-вектор переменных (неизвестных); $S \subseteq \{1, ..., n\}$ – множество целочисленных переменных, а x_i – подмножество S, ограниченное целыми числами.

Для решения задач смешанного целочисленного программирования на практике часто используется несколько подходов.

Метод ветвления и привязки [23] основан на разбиении исходной задачи на подзадачи, каждая из которых решается отдельно. Основная идея заключается в построении дерева решений, где на каждом уровне происходит разбиение пространства поиска, а привязка используется для исключения нерелевантных вариантов на основе решений предыдущих узлов дерева. Данный метод применяется в задачах логистики, где необходимо учитывать как целочисленные, так и непрерывные переменные, например, при оптимизации маршрутов доставки.

Метод разрезания плоскостей [24] направлен на улучшение приближенного решения путем добавления новых ограничений, которые исключают нецелые решения из области допустимых решений. Такие ограничения, называемые «разрезами», позволяют постепенно уточнять область поиска и улучшать качество решения. Метод разрезов часто используется в задачах управления запасами и распределения ресурсов.

Методы декомпозиции [25], такие как обобщенная декомпозиция Бендерса, предполагают разбиение сложной задачи на более простые подзадачи. Каждая из подзадач решается отдельно, а затем результаты объединяются для получения решения исходной задачи. Такой подход эффективен для задач большого объема, например, в задачах сетевого планирования или моделирования энергосистем.

Исследование, представленное в работе [26], подробно анализирует эти методы и их применение в задачах линейной и нелинейной оптимизации. Основное внимание уделяется особенностям каждого подхода и их эффективности в зависимости от специфики задачи. Примеры включают как задачи планирования, так и оптимизацию моделей, где необходимо учитывать смешанные ограничения.

Оптимизационные моделирование на основе дерева событий

Деревья решений (Decision Trees) – метод моделирования, классификации и регрессии [27]. Это иерархическая структура, в которой каждый узел представляет собой проверку некоторого признака, каждая ветвь – результат проверки, а листья содержат значения целевой переменной или решение. Деревья решений позволяют строить модели, способные принимать решения на основе анализа множества входных признаков, что делает их полезными в задачах анализа данных и прогнозирования.

Однако для задач, в которых необходимо учитывать временной фактор и вероятности последовательности событий, используются непрерывные деревья событий (Continuous-Time Event Trees, CTET) [28]. Такие структуры являются развитием идеи деревьев решений и позволяют моделировать временные зависимости и вероятностный характер событий. В таких деревьях события описываются статистическими вероятностями или экспоненциально распределенными скоростями событий.

События в дереве событий связаны со статистическими вероятностями или постоянными скоростями, экспоненциально распределенными по Пуассону. Например, отказы компонентов обычно могут происходить при некоторой постоянной частоте отказов λ (постоянная функция опасности). В простейшем случае вероятность отказа зависит от скорости λ и времени воздействия t:

$$P = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

где $P \approx \lambda t$, если $\lambda t < 0.001$.

Данная формула описывает экспоненциальное распределение событий, характерное для процессов, происходящих случайным образом во времени, таких как отказы оборудования или других систем.

Непрерывные деревья событий полезны при оценке рисков в проектах, где возможны цепочки событий с временной зависимостью. Например, в управлении проектами дерево событий может моделировать риски, связанные с отказами оборудования или задержками в процессе, учитывая вероятность возникновения проблем на каждом этапе [29]. Данный подход позволяет предсказать вероятные сценарии развития событий и разработать стратегии минимизации рисков.

Оптимизация в теоретико-игровых моделях

Теоретико-игровое моделирование представляет собой метод анализа стратегических взаимодействий между участниками с целью оптимизации их стратегий [30]. Данный метод широко применяется для изучения ситуаций конфликта или сотрудничества, где каждый участник стремится максимизировать свой выигрыш или минимизировать потери в зависимости от решений других участников.

Ключевым понятием в теории игр является равновесие Нэша. Равновесие Нэша возникает, когда ни один участник не имеет мотивации изменить свою стратегию, учитывая выбранные стратегии других участников. Это означает, что при данной стратегии каждого игрока никто не имеет желания изменить свои действия, т.к. любое отклонение от текущей стратегии не приведет к улучшению его выигрыша.

Математическая формулировка: (S, H) – некооперативная игра n лиц в нормальной форме, где S – набор чистых стратегий, а H – набор выигрышей. Когда каждый игрок $i \in \{1, ..., n\}$ выбирает стратегию $x\{i\}$, принадлежащую S в профиле стратегий $(x\{1\}, \ldots, (x\{n\})$, игрок i получает свой выигрыш $H\{i\}(x)$. Профиль стратегий $x^*\{i\} \in S$ является равновесием по Нэшу, если изменение своей стратегии с $x^*\{i\}$ на $x\{i\}$ не выгодно ни одному игроку i, т.е. для любого игрока i: $H_i(x^*) \geq H_i(x_i, x^*_{-i})$.

Работа [31] посвящена решению задач оптимизации в условиях неопределенности с использованием теории игр, в частности модели игры с природой. Данная модель применяется, когда участник (игрок) взаимодействует с внешней средой, поведение которой невозможно контролировать и которая представляется в виде «природы» или внешнего фактора неопределенности. Для выбора оптимальной стратегии использовались три классических критерия: Вальда, Байеса и Гурвица.

Встроенные методы оптимизации в дискретно-событийных и гибридных моделях

Дискретно-событийное и гибридное моделирование с встроенной процессной оптимизацией представляют методы оптимизации системных процессов в контексте научных исследований. Дискретно-событийное моделирование позволяет представлять систему в виде набора сущностей и ресурсов, акцентируя изменения, связанные с дискретными событиями, в то время как гибридное моделирование, объединяя дискретные и непрерывные аспекты, обеспечивает более точное отражение динамики систем [32].

Процессная оптимизация, встроенная в модели, представляет собой интегрированный механизм, направленный на автоматическую регулировку параметров, эффективное управление ресурсами и динамическую адаптацию процессов в процессе моделирования.

Данный подход к оптимизации работает при простом изменении варьируемых параметров (например, при разных дискретных значениях мощности ресурсов), однако значительно усложняется с появлением различных по структуре вариантов осуществления процессов. Кроме того, некоторые из существующих сред имитационного моделирования, имеющие встроенную подсистему процессной оптимизации, предполагают ручную настройку репликаций, что вызывает сложности ввиду большого объема требуемых для задачи репликаций и вероятности человеческой ошибки: пользователь может случайно упустить оптимальный вариант из списка прогонов.

Также наблюдается тенденция к использованию гибридного моделирования для описания сложных социально-экономических и социотехнических систем. Данный подход включает в себя комбинации базовых парадигм имитационного моделирования. Гибридное моделирование позволяет рассматривать систему с различных точек зрения, что позволяет получить более полное и точное представление о ее поведении [33].

Метод дифференциальной эволюции

Метод дифференциальной эволюции является одним из методов эволюционного моделирования, предназначенным для решения задачи многомерной

оптимизации. По классификации оптимизационных методов он относится к классу стохастических методов, т.к. использует в процессе поиска решения генератор случайных чисел. Также он использует и некоторые идеи генетических алгоритмов, но, в отличие от них, не требует работы с переменными в бинарном коде.

Алгоритм работы метода начинается с инициализации начальной популяции точек (кандидатов), которая случайным образом генерируется в пространстве поиска. Эта популяция представляет потенциальные решения для оптимизационной задачи [34]. На следующем этапе осуществляется выбор трех случайных точек (векторов) из текущей популяции. Эти три точки будут использоваться для создания нового вектора, который представляет собой потомка в процессе мутации.

Разностное векторное уточнение представляет собой создание нового вектора (потомка) путем разности двух случайных векторов, умноженной на коэффициент масштабирования. Этот шаг моделирует мутацию, внося разнообразие в популяцию и обеспечивая новые кандидаты для оптимизации.

Следующий этап – скрещивание (кроссовер), где происходит сравнение элементов нового вектора с элементами базового вектора. Если элемент нового вектора лучше (меньше) соответствующего элемента базового вектора, то он заменяет соответствующий элемент базового вектора. Этот механизм обеспечивает сохранение лучших характеристик векторов в популяции.

Оценка приспособленности происходит путем использования функции цели (стоимости). Новый вектор оценивается, и, если он оказывается лучше (имеет более низкую стоимость), чем старый вектор, то новый вектор принимается в популяцию.

Шаги повторяются до достижения критерия остановки, такого как максимальное количество итераций или достижение необходимого уровня приспособленности. Таким образом, метод дифференциальной эволюции эффективно итеративно улучшает популяцию кандидатов в поиске оптимального решения задачи оптимизации.

Генетический алгоритм оптимизации

Генетический алгоритм – это метод эволюционной оптимизации, основанный на механизмах естественного отбора и генетической эволюции [35]. Основная цель этого метода – найти оптимальное решение задачи путем имитации эволюционного процесса. Алгоритм начинается с инициализации, в ходе которой создается начальная популяция, состоящая из множества возможных решений задачи, представленных в виде хромосом, где каждая хромосома кодирует определенное решение в пространстве поиска. На каждом шаге работы алгоритма оценивается приспособленность каждого индивидуума с помощью целевой функции, значение которой отражает качество соответствующего решения. Особи с наибольшей приспособленностью получают преимущество в процессе отбора для дальнейших этапов эволюции.

В основе эволюционного процесса лежат операции селекции, скрещивания и мутации. Селекция осуществляется для выбора наиболее приспособленных особей, которые формируют основу новой популяции. Скрещивание комбинирует генетические данные двух родителей, порождая потомков с объединенными характеристиками, что способствует исследованию новых комбинаций признаков. Мутация вносит случайные изменения в генотип отдельных хромосом, позволяя исследовать новые области пространства решений и предотвращая преждевременную сходимость алгоритма к локальным экстремумам. После применения этих операций формируется новая популяция, которая заменяет предыдущую. Процесс повторяется до достижения заданного числа итераций или получения решения с приемлемым уровнем качества.

Эффективность генетического алгоритма во многом определяется настройкой ключевых параметров, таких как размер популяции, вероятность мутации и скрещивания, а также количество итераций. Данные параметры регулируют баланс между исследованием пространства решений и уточнением текущих оптимальных значений, что делает этот подход универсальным.

Например, в статье [36] рассматривается применение генетического алгоритма, основанного на теории естественного отбора, для решения задач оптимизации. Авторы демонстрируют эффективность предложенного подхода на примере оптимизации функции распределения нагрузки в системах с ограниченными ресурсами. Генетический алгоритм использовался для нахождения оптимального распределения задач между доступными вычислительными узлами таким образом, чтобы минимизировать общее время выполнения и одновременно сбалансировать нагрузку между узлами.

Метод глобальной оптимизации с отжигом

Метод глобальной оптимизации с отжигом (Simulated Annealing, SA) представляет собой эвристический алгоритм, который нашел свое вдохновение в физическом процессе отжига металла [37]. Метод стал частью инструментария для решения сложных задач глобальной оптимизации, особенно в ситуациях, когда пространство поиска может быть сложным, содержащим множество локальных минимумов или обладающим неопределенными характеристиками.

Основная концепция метода симулирует процесс охлаждения материала после нагрева. Начальная

«температура» алгоритма определяет степень агрессивности его шагов в пространстве решений. На начальных этапах процесса алгоритм более толерантен к случайным изменениям, что позволяет ему избегать застревания в локальных минимумах. С течением времени температура постепенно снижается, что уменьшает вероятность принятия худших решений, делая алгоритм более сфокусированным на поиске глобальных оптимумов.

Механизм работы метода глобальной оптимизации с отжигом позволяет алгоритму с легкостью преодолевать локальные минимумы благодаря случайному природному блужданию по пространству решений. Это обеспечивает более широкий охват поиска оптимальных решений в сложных и многомерных пространствах.

Метод роя частиц

Метод роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) – один из эвристических алгоритмов, вдохновленных коллективным поведением природных систем, таких как стаи птиц или косяки рыб [38]. Алгоритм применяется для решения задач оптимизации, особенно в случаях, когда пространство поиска характеризуется высокой размерностью, нелинейностью и наличием многочисленных локальных оптимумов.

В основе PSO лежит идея имитации движения частиц, каждая из которых представляет собой потенциальное решение задачи. Каждая частица характеризуется своим положением и скоростью, которые обновляются на каждом шаге алгоритма. Обновление происходит с учетом двух ключевых факторов: личного опыта частицы (лучшего положения, которое она обнаружила ранее) и коллективного опыта группы (лучшего решения, найденного среди всех частиц). Это позволяет частицам одновременно исследовать пространство поиска и сосредотачиваться на наиболее перспективных областях [39].

Алгоритм PSO имеет несколько параметров, таких как коэффициент инерции, параметры когнитивного и социального влияния, которые определяют динамику движения частиц и их способность к исследованию и поиску. Правильная настройка этих параметров способствует балансированию между глобальным исследованием пространства решений и его локальной проработкой.

Применение метода роя частиц охватывает широкий спектр задач оптимизации, включая обучение машин, проектирование нейронных сетей, а также в различных инженерных и научных областях.

Метод оптимизации колонии муравьев

Оптимизация колонии муравьев (Ant Colony Optimization, ACO) – это эвристический метод, разработанный на основе наблюдений за коллективным поведением муравьев в природе [40]. В его основе лежит концепция использования феромонов и стигмергии для решения задач оптимизации. Принцип работы ACO базируется на моделировании поведения муравьев, которые при поиске пищи оставляют химический след – феромоны. Данные следы служат ориентиром для других муравьев, повышая вероятность того, что они пойдут по тому же маршруту.

Особенностью алгоритма является динамическое обновление феромонных следов. При этом более короткие и эффективные пути получают усиление за счет большего количества феромонов, оставляемых муравьями. Такой механизм позволяет алгоритму постепенно концентрироваться на наиболее оптимальных решениях, устраняя менее перспективные маршруты [41]. Метод ACO эффективен в задачах, где требуется исследовать большое пространство возможных решений и выбрать наилучшее из них.

Применение ACO охватывает широкий спектр задач оптимизации. Например, метод активно используется в задачах маршрутизации, где необходимо найти оптимальные пути в сетях, таких как транспортные системы или компьютерные сети. Распараллеливание алгоритма, заключающееся в разделении работы на несколько независимых агентов, позволяет существенно сократить время вычислений и сделать алгоритм применимым для задач с большим количеством переменных.

Метод искусственной колонии пчел

Метод искусственной пчелиной колонии (Artificial Bee Colony, ABC) является оптимизационным алгоритмом, который моделирует стратегии поиска источников пищи пчел в природе [42]. В алгоритме выделяют три типа пчел: рабочие, наблюдатели и разведчики.

На начальном этапе имеется предварительная информация о расположении источников пищи, представляющих допустимые решения задачи оптимизации. Рабочие пчелы направляются к этим источникам, проводят поиск в их окрестности и запоминают новые решения, улучшающие параметры задачи.

После завершения этапа поиска рабочие пчелы возвращаются в «улей» и передают информацию пчелам-наблюдателям о более привлекательных источниках. Пчелы-наблюдатели вероятностным образом выбирают источник для начала своего поиска, проводя его аналогично рабочим пчелам. Новые решения сохраняются только в случае улучшения качества по заданным параметрам. Процесс поиска продолжается до достижения заданного числа итераций [43].

Метод двойного отжига

Двойной отжиг (Dual Annealing, DA) – это стохастический метод глобальной оптимизации, который является расширением алгоритма имитационного отжига (Simulated Annealing, SA) [44]. Метод предназначен для повышения эффективности поиска глобального оптимума за счет использования локального алгоритма поиска в дополнение к процедуре имитационного отжига. Такой подход позволяет повысить точность нахождения оптимального решения, особенно в задачах с большим количеством локальных экстремумов.

Основной принцип двойного отжига заключается в том, что на начальном этапе используется стохастический процесс глобального поиска, основанный на принципах термодинамического отжига. Моделируемый отжиг успешно определяет область пространства решений, в которой находится глобальный оптимум, но не всегда гарантирует нахождение точного решения внутри этой области. Чтобы преодолеть это ограничение, алгоритм двойного отжига на заключительном этапе применяет локальный метод оптимизации к решению, найденному с помощью моделируемого отжига. Локальный поиск позволяет уточнить найденное решение, минимизируя риск пропуска глобального оптимума из-за недостаточной проработки ограниченной области пространства решений.

Алгоритм DA успешно применяется в задачах, где пространство поиска является сложным, многомерным и содержит множество локальных экстремумов. Например, в задачах оптимизации инженерных конструкций, при разработке сложных технических систем или для настройки гиперпараметров в моделях машинного обучения двойной отжиг демонстрирует высокую эффективность. Его способность комбинировать преимущества глобального и локального поиска делает этот метод универсальным и пригодным для решения

Тем не менее, детальное исследование эволюционных методов оптимизации представляет собой отдельную область научного исследования.

Сравнительный анализ методов оптимизации представлен в таблице.

Таблица. Сравнение методов оптимизации

Метод	Тип	Область применения	Достоинства	Недостатки
Стохастическое оптимизационное моделирование методом Монте-Карло	Стохастический	Имитация случайных процессов, оценка вероятностей, оптимизация сложных систем	Простота, универсальность, высокая точность	Требует большого количества вычислений, может быть вычислительно затратным
Оптимизация методом максимального правдоподобия	Детерминированный	Оценка параметров модели на основе данных	Точность, эффективность	Требует знания формы целевой функции, может быть чувствительным к выбору начальных значений
Оптимизация в байесовских моделях	Детерминированный	Анализ вероятностей, учет априорных данных, прогнозирование	Точность, гибкость, учет априорных данных	Требует знания формы целевой функции, может быть вычислительно затратным
Метод дифференциальной эволюции	Эволюционный	Глобальная оптимизация многомерных функций	Эффективность, устойчивость к локальным минимумам	Требует знания формы целевой функции, может быть чувствительным к выбору параметров
Метод «генетический алгоритм оптимизации»	Эволюционный	Поиск оптимальных решений в сложных задачах	Устойчивость к локальным минимумам, решение многокритериальных задач	Требует большого количества вычислений, может быть вычислительно затратным
Метод глобальной оптимизации с отжигом	Эволюционный	Имитация процесса отжига металлов для поиска глобального минимума	Эффективность, устойчивость к локальным минимумам	Требует большого количества вычислений, может быть вычислительно затратным
Метод роя частиц	Эволюционный	Коллективный поиск оптимальных решений, имитация поведения роя пчел	Эффективность, устойчивость к локальным минимумам	Требует большого количества вычислений, может быть вычислительно затратным
Метод оптимизации колонии муравьев	Эволюционный	Поиск кратчайших путей, оптимизация маршрутов	Эффективность, устойчивость к локальным минимумам	Требует большого количества вычислений, может быть вычислительно затратным

Таблица. Продолжение

Метод	Тип	Область применения	Достоинства	Недостатки
Метод искусственной колонии пчел	Эволюционный	Имитация поведения пчел-разведчиц и пчел-фуражиров для поиска решений	Эффективность, устойчивость к локальным минимумам	Требует большого количества вычислений, может быть вычислительно затратным
Метод двойного отжига	Эволюционный	Использования двух температурных режимов	Эффективность, устойчивость к локальным минимумам	Требует большого количества вычислений, может быть вычислительно затратным
Оптимизационное моделирование на основе дерева событий	Стохастический	Анализ рисков, оценка вероятности наступления событий	Точность, гибкость	Требует знания формы целевой функции, может быть вычислительно затратным
Интерполяционная оптимизация вероятностных распределений	Стохастический	Моделирование сложных вероятностных распределений	Точность, гибкость	Требует знания формы целевой функции, может быть вычислительно затратным
Смешанно-целочисленное оптимизационное программирование	Детерминированный	Решение задач оптимизации с дискретными переменными	Точность, эффективность	Требует знания формы целевой функции, может быть вычислительно затратным
Оптимизация в теоретико-игровых моделях	Детерминированный	Анализ и оптимизация стратегий в конкурентных средах	Точность, гибкость	Требует знания формы целевой функции, может быть вычислительно затратным
Дискретно-событийные и гибридные модели	Стохастический	Оптимизация динамических систем с дискретными событиями	Точность, гибкость	Требует знания формы целевой функции, может быть вычислительно затратным

Стохастические методы используются во многих областях, поскольку являются базовыми методами оценки параметров модели, учета различных вероятностных факторов и хорошо подходят для подгонки моделей.

В детерминированных методах оптимизации процесс полностью определен и предсказуем. Алгоритмы детерминированной оптимизации стремятся найти решение, следуя строго заданному набору правил или процедуре.

Эволюционные алгоритмы работают, создавая популяции кандидатов, подвергая их эволюционным операторам, таким как скрещивание, мутация и отбор, чтобы постепенно улучшить популяцию в направлении оптимизации заданной функции. Методы также могут использоваться для многокритериальной оптимизации, когда необходимо учитывать несколько целевых функций.

На основе приведенных результатов можно сформулировать алгоритм выбора необходимого метода оптимизации:

- Сначала требуется определить качество входных данных, насколько полной является выборка, сколько признаков рассмотрено. В зависимости от этого выбрать группу методов, основанных на апостериорной или на аппроксимационной оценке.
- Следующим шагом требуется рассмотреть область применения, оценить сложность системы, выбрать объект оптимизации. В зависимости от задачи и ожидаемых результатов выбрать метод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье осуществлен аналитический обзор методов оптимизации и приведена их классификация. На основе рассмотренных методов выделены две основные категории: методы, основанные на оценке параметров апостериорного распределения, и методы, основанные на неточной и аппроксимационной оценке. Указаны достоинства и недостатки каждого метода в рамках применимости к моделям.

Результаты исследования полезны как для научных исследований в области оптимизации моделей, так и для практического использования в процессе разработки моделей и систем поддержки принятия решений на их основе.

Дальнейшие перспективы развития исследования предполагают детальное изучение эволюционных

методов оптимизации, а также сравнение эффективности методов оптимизации на практике на базе нескольких различных моделей с целью более глубокого понимания их применимости и результативности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-03-2025-256 от 16.01.2025).

ACKNOWLEDGMENTS

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. 075-03-2025-256 dated January 16, 2025).

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. Космачева И.М., Давидюк Н.В., Сибикина И.В., Кучин И.Ю. Модель оценки эффективности конфигурации системы защиты информации на базе генетических алгоритмов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3):40–41. https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.022
2. Бекетов С.М., Поспелов К.Н., Редько С.Г. Имитационная модель человеческого капитала в инновационных проектах. *Проблемы управления*. 2024;3:20–31. http://doi.org/10.25728/pu.2024.3.2
3. Кенден К.В., Кузнецов А.В. Оптимизация методом роя частиц структуры автономного энергетического комплекса с использованием солнечной энергии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020;24(3):616–626. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-616-626
4. Филиппова К.А., Редько С.Г. Использование метода имитационного моделирования в медицинском учреждении с целью оптимизации перемещения пациентов в условиях ограничений пандемии COVID-19. *Вопросы устойчивого развития общества*. 2023;(4 МКВГ). https://doi.org/10.34755/IROK.2022.61.82.009
5. Van Thieu N., Mirjalili S. MEALPY: An open-source library for latest meta-heuristic algorithms in Python. *J. Syst. Architecture.* 2023;139:102871. https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102871
6. Dalavi A.M., Gomes A., Husain A.J. Bibliometric analysis of nature inspired optimization techniques. *Comput. Ind. Eng.* 2022;169:108161. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108161
7. Nagpal A., Gabrani G. Python for data analytics, scientific and technical applications. In: *2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence* (*AICAI*). IEEE; 2019. P. 140–145. https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701341
8. Gintciak A.M., Bolsunovskaya M.V., Burlutskaya Z.V., Petryaeva A.A. Hybrid Simulation as a Key Tool for Socio-economic Systems Modeling. In: Vasiliev Y.S., Pankratova N.D., Volkova V.N., Shipunova O.D., Lyabakh N.N. (Eds.). *System Analysis in Engineering and Control.* Book Series: *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer; 2022. V. 442. P. 262–272. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98832-6_23
9. Николаев С.В. Многоаспектность и системность цифровой трансформации: устойчивое развитие на примере транспортного комплекса. *E-Management.* 2023;6(3):39–50. https://doi.org/10.26425/2658-3445-2023-6-3-39-50
10. Lychkina N. Modelling of Developing Socio-economic Systems Using Multiparadigm Simulation Modelling: Advancing Towards Complexity Theory and Synergetics. In: Perko I., Espejo R., Lepskiy V., Novikov D.A. (Eds.). *World Organization of Systems and Cybernetics 18. Congress-WOSC2021*. Book Series: *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer; 2022. V. 495. P. 191–204. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08195-8_19
11. Певнева А.Г., Калинкина М.Е. *Методы оптимизации*. СПб.: Университет ИТМО; 2020. 64 с.
12. Ciufolini I., Paolozzi A. Mathematical prediction of the time evolution of the COVID-19 pandemic in Italy by a Gauss error function and Monte Carlo simulations. *Eur. Phys. J. Plus.* 2020;135(4):355. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00383-y
13. Kannan D., Moazzeni S., Darmian S.M. A hybrid approach based on MCDM methods and Monte Carlo simulation for sustainable evaluation of potential solar sites in east of Iran. *J. Clean. Product.* 2021;279:122368. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122368
14. Xue H., Shen X., Pan W. Constrained maximum likelihood-based Mendelian randomization robust to both correlated and uncorrelated pleiotropic effects. *Am. J. Human Genet.* 2021;108(7):1251–1269. https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2021.05.014
15. Ломиворотов Р.В. Использование байесовских методов для анализа денежно-кредитной политики в России. *Прикладная эконометрика*. 2015;38(2):41–63.
16. Щеглеватых Р.В., Сысоев А.С. Математическая модель обнаружения аномальных наблюдений с использованием анализа чувствительности нейронной сети. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(1):14. https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.020
17. Манаширов Э.С. Теоретические рамки плановой экономики и налогообложения: анализ эффекта на средний класс и оптимизация налоговых схем. *Инновации и инвестиции.* 2023;10:272–276.
18. Васильева Е.В., Громова А.А., Вишневская Н.А. Модель машинного обучения для оптимизации организации работы сотрудников офиса в удаленном и гибридном режимах. *Инновации и инвестиции.* 2023;5:288–295.

19. Глотов А.Ф. *Начала математического моделирования в электронике*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2017. 363 с.
20. Горюнов О.В., Куриков Н.Н., Егоров К.А. Интерполяционный метод оценки вероятности отказа при сложном нагружении. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2023;1(140):42–52.
21. Ruiz-Arias J.A. Mean-preserving interpolation with splines for solar radiation modeling. *Solar Energy.* 2022;248:121–127. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.038
22. Bourguignon S., Ninin J., Carfantan H., Mongeau M. Exact sparse approximation problems via mixed-integer programming: Formulations and computational performance. *IEEE Trans. Signal Process.* 2015;64(6):1405–1419. https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2496367
23. Ponz-Tienda J.L., Salcedo-Bernal A., Pellicer E. A parallel branch and bound algorithm for the resource leveling problem with minimal lags. *Comput. Aided Civil Infrastruct. Eng*. 2017;32(6):474–498. https://doi.org/10.1111/mice.12233
24. Bertsimas D., Tsitsiklis J.N. Integer programming methods. In: *Introduction to Linear Optimization*. Belmont, MA: Athena Scientific; 1997. V. 6. P. 479–530.
25. Bolusani S., Ralphs T.K. A framework for generalized Benders' decomposition and its application to multilevel optimization. *Math. Program*. 2022;196(1):389–426. https://doi.org/10.1007/s10107-021-01763-7
26. Kleinert T., Labbé M., Ljubić I., Schmidt M. A survey on mixed-integer programming techniques in bilevel optimization. *EURO J. Computational Opt*. 2021;9(2):100007. https://doi.org/10.1016/j.ejco.2021.100007
27. Кондратов Д.В., Володин Д.Н. Математическое моделирование алгоритмов машинного обучения. *Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках.* 2023;2:2–7. https://doi.org/10.24412/2541-9269-2023-2-02-07
28. Sprague C.I., Ögren P. Continuous-time behavior trees as discontinuous dynamical systems. *IEEE Control Syst. Lett.* 2021;6:1891–1896. https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3134453
29. Phiri D., Simwanda M., Nyirenda V.R., et al. Decision tree algorithms for developing rulesets for object-based land cover classification. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2020;9(5):329. https://doi.org/10.3390/ijgi9050329
30. Белозёров С.А., Соколовская Е.В. Теоретико-игровой подход к моделированию конфликта интересов: экономические санкции. *Terra Economicus*. 2022;20(1):65–80. http://doi.org/10.18522/2073-6606-2022-20-1-65-80
31. Петриченко Д.Г., Петриченко Г.С. Решение ситуационных задач в сфере недвижимости в условиях неопределенности. *Вестник Академии знаний*. 2023;54(1):400–405.
32. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик. *Бизнес-информатика*. 2021;15(2):7–20. http://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20
33. Болсуновская М.В., Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Петряева А.А., Зубкова Д.А., Успенский М.Б., Селедцова И.А. Возможности применения гибридного подхода в моделировании социально-экономических и социотехнических систем. *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии.* 20224(3):73–86. https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86
34. Ahmad M.F., Isa N.A.M., Lim W.H., Ang K.M. Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works. *Alexandria Eng. J.* 2022;61(5):3831–3872. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.013
35. Холодков Д.В. Анализ особенностей применения генетических алгоритмов. *Вестник науки*. 2024;4(4–73):678–682.
36. Albadr M.A., Tiun S., Al-Dhief F.T., Ayob M. Genetic algorithm based on natural selection theory for optimization problems. *Symmetry.* 2020;12(11):1758. https://doi.org/10.3390/sym12111758
37. Костин А.С., Майоров Н.Н. Исследование моделей и методов маршрутизации и практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.* 2023;15(3):524–536. https://doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536
38. Словохотов Ю.Л., Новиков Д.А. Распределенный интеллект мультиагентных систем. Ч. 2. Коллективный интеллект социальных систем. *Проблемы управления*. 2023;6:3–21. https://doi.org/10.25728/pu.2023.6.1
39. Gad A.G. Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review. *Arch. Computat. Methods Eng*. 2022;29(5):2531–2561. https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4
40. Кулиев Э.В., Запорожец Д.Ю., Кравченко Ю.А., Семенова М.М. Решение задачи интеллектуального анализа данных на основе биоинспирированного алгоритма. *Известия Южного федерального университета. Технические науки.* 2021;6(223):89–99. https://doi.org/10.18522/2311-3103-2021-6-89-99
41. Dorigo M., Stützle T. Ant colony optimization: overview and recent advances. In: Gendreau M., Potvin J.Y. (Eds.). *Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science*. Springer; 2019. P. 311–351. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_8
42. Курейчик В.В., Родзин С.И. Вычислительные модели эволюционных и роевых биоэвристик (обзор). *Информационные технологии*. 2021;27(10):507–520. https://doi.org/10.17587/it.27.507-520
43. Almufti S.M., Alkurdi A.A.H., Khoursheed E.A. Artificial Bee Colony Algorithm Performances in Solving Constraint-Based Optimization Problem. *Telematique.* 2022;21(1):6785–6799.
44. Lee J., Perkins D. A simulated annealing algorithm with a dual perturbation method for clustering. *Pattern Recogn.* 2021;112:107713. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107713

REFERENCES

1. Kosmacheva I.M., Davidyuk N.V., Sibikina I.V., Kuchin I.Yu. The model for evaluating the effectiveness of an information security system configuration based on genetic algorithms. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3):40–41 (in Russ.). https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.022
2. Beketov S.M., Pospelov K.N., Redko S.G. A human capital simulation model in innovation projects. *Control Sci.* 2024;3: 16–25. http://doi.org/10.25728/cs.2024.3.2
   [Original Russian Text: Beketov S.M., Pospelov K.N., Redko S.G. A human capital simulation model in innovation projects. *Problemy upravleniya.* 2024;3:20–31 (in Russ.). http://doi.org/10.25728/pu.2024.3.2]
3. Kenden K.V., Kuznetsov A.V. Particle swarm optimisation for the structure of an autonomous solar energy complex. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):616–626 (in Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-616-626
4. Filippova K.A., Redko S.G. The use of the simulation modeling method in a medical institution in order to optimize the movement of patients under the constraints of the COVID-19 pandemic. *Voprosy ustoichivogo razvitiya obshchestva*. 2023:(4 MKVG) (in Russ.). https://doi.org/10.34755/IROK.2022.61.82.009
5. Van Thieu N., Mirjalili S. MEALPY: An open-source library for latest meta-heuristic algorithms in Python. *J. Syst. Architecture.* 2023;139:102871. https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102871
6. Dalavi A.M., Gomes A., Husain A.J. Bibliometric analysis of nature inspired optimization techniques. *Comput. Ind. Eng.* 2022;169:108161. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108161
7. Nagpal A., Gabrani G. Python for data analytics, scientific and technical applications. In: *2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence* (*AICAI*). IEEE; 2019. P. 140–145. https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701341
8. Gintciak A.M., Bolsunovskaya M.V., Burlutskaya Z.V., Petryaeva A.A. Hybrid Simulation as a Key Tool for Socio-economic Systems Modeling. In: Vasiliev Y.S., Pankratova N.D., Volkova V.N., Shipunova O.D., Lyabakh N.N. (Eds.). *System Analysis in Engineering and Control.* Book Series: *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer; 2022. V. 442. P. 262–272. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98832-6_23
9. Nikolaev S.V. Multidimensional and systematic digital transformation: sustainable development on the example of the transport industry. *E-Management.* 2023;6(3):39–50 (in Russ.). https://doi.org/10.26425/2658-3445-2023-6-3-39-50
10. Lychkina N. Modelling of Developing Socio-economic Systems Using Multiparadigm Simulation Modelling: Advancing Towards Complexity Theory and Synergetics. In: Perko I., Espejo R., Lepskiy V., Novikov D.A. (Eds.). *World Organization of Systems and Cybernetics 18*. *Congress-WOSC2021*. Book Series: *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer; 2022. V. 495. P. 191–204. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08195-8_19
11. Pevneva A.G., Kalinkina M.E. *Metody optimizatsii* (*Optimization Methods*). St. Petersburg: ITMO University; 2022. 64 p. (in Russ.).
12. Ciufolini I., Paolozzi A. Mathematical prediction of the time evolution of the COVID-19 pandemic in Italy by a Gauss error function and Monte Carlo simulations. *Eur. Phys. J. Plus.* 2020;135(4):355. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00383-y
13. Kannan D., Moazzeni S., Darmian S.M. A hybrid approach based on MCDM methods and Monte Carlo simulation for sustainable evaluation of potential solar sites in east of Iran. *J. Clean. Product.* 2021;279:122368. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122368
14. Xue H., Shen X., Pan W. Constrained maximum likelihood-based Mendelian randomization robust to both correlated and uncorrelated pleiotropic effects. *Am. J. Human Genet.* 2021;108(7):1251–1269. https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2021.05.014
15. Lomivorotov R.V. The use of Bayesian methods for the analysis of monetary policy in Russia. *Prikladnaya ekonometrika = Applied Econometrics*. 2015;38(2):41–63 (in Russ.).
16. Scheglevatych R.V., Sysoev A.S. Mathematical model to detect anomalies using Sensitivity Analysis applying to neural network. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;8(1):14 (in Russ.). https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.020
17. Manashirov E.S. Theoretical framework of a planned economy and taxation: analysis of the effect on the middle class and optimization of tax schemes. *Innovatsii i investitsii = Innovations and Investments*. 2023;10:272–276 (in Russ.).
18. Vasileva E.V., Gromova A.A., Vishnevskaya N.A. Machine learning model for optimizing the organization of work of office employees in remote and hybrid modes. *Innovatsii i investitsii = Innovations and Investments*. 2023;5:288–295 (in Russ.).
19. Glotov A.F. *Nachala matematicheskogo modelirovaniya v elektronike* (*Beginnings of MAthematical Modeling in Electronics*). Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2017. 363 p. (in Russ.).
20. Goryunov O.V., Kurikov N.N., Egorov K.A. Interpolation method to evaluate the possibility of failure in case of complex load. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva = Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2023;1(140):42–52 (in Russ.).
21. Ruiz-Arias J.A. Mean-preserving interpolation with splines for solar radiation modeling. *Solar Energy.* 2022;248:121–127. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.038
22. Bourguignon S., Ninin J., Carfantan H., Mongeau M. Exact sparse approximation problems via mixed-integer programming: Formulations and computational performance. *IEEE Trans. Signal Process.* 2015;64(6):1405–1419. https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2496367

23. Ponz-Tienda J.L., Salcedo-Bernal A., Pellicer E. A parallel branch and bound algorithm for the resource leveling problem with minimal lags. *Comput. Aided Civil Infrastruct. Eng*. 2017;32(6):474–498. https://doi.org/10.1111/mice.12233
24. Bertsimas D., Tsitsiklis J.N. Integer programming methods. In: *Introduction to Linear Optimization*. Belmont, MA: Athena Scientific; 1997. V. 6. P. 479–530.
25. Bolusani S., Ralphs T.K. A framework for generalized Benders' decomposition and its application to multilevel optimization. *Math. Program*. 2022;196(1):389–426. https://doi.org/10.1007/s10107-021-01763-7
26. Kleinert T., Labbé M., Ljubić I., Schmidt M. A survey on mixed-integer programming techniques in bilevel optimization. *EURO J. Computational Opt*. 2021;9(2):100007. https://doi.org/10.1016/j.ejco.2021.100007
27. Kondratov D.V., Volodin D.N. Mathematical modeling of machine learning algorithms. *Matematicheskoe modelirovanie, komp'yuternyi i naturnyi eksperiment v estestvennykh naukakh*. 2023;2:2–7 (in Russ.). https://doi.org/10.24412/2541-9269-2023-2-02-07
28. Sprague C.I., Ögren P. Continuous-time behavior trees as discontinuous dynamical systems. *IEEE Control Syst. Lett.* 2021;6:1891–1896. https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3134453
29. Phiri D., Simwanda M., Nyirenda V.R., et al. Decision tree algorithms for developing rulesets for object-based land cover classification. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2020;9(5):329. https://doi.org/10.3390/ijgi9050329
30. Belozerov S., Sokolovskaya E. The game-theoretic approach to modeling the conflict of interests: The economic sanctions. *Terra Economicus*. 2022;20(1):65–80 (in Russ.). http://doi.org/10.18522/2073-6606-2022-20-1-65-80
31. Petrichenko D.G., Petrichenko G.S. Solving real estate situational problems in conditions of uncertainty. *Vestnik Akademii znanii = Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2023;54(1):400–405 (in Russ.).
32. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. Digital plant: *methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics. Biznes-informatika = Business Informatics.* 2021;15(2):7–20 (in Russ.). http://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20
33. Bolsunovskaya M.V., Gintsyak A.M., Burlutskaya Zh.V., Petryaeva A.A., Zubkova D.A., Uspenskii M.B., Seledtsova I.A. The opportunities of using a hybrid approach for modeling socio-economic and sociotechnical systems. *Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies.* 2022.;3:73–86 (in Russ.). https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86
34. Ahmad M.F., Isa N.A.M., Lim W.H., Ang K.M. Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works. *Alexandria Eng. J.* 2022;61(5):3831–3872. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.013
35. Holodkov D.V. Analysis of features of application of genetic algorithms. *Vestnik nauki.* 2024;4(4–73):678–682 (in Russ.).
36. Albadr M.A., Tiun S., Al-Dhief F.T., Ayob M. Genetic algorithm based on natural selection theory for optimization problems. *Symmetry.* 2020;12(11):1758. https://doi.org/10.3390/sym12111758
37. Kostin A.S., Maiorov N.N. Research of models and methods for routing and practical implementation of autonomous movement by unmanned transport systems for cargo delivery. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2023;15(3):524–536 (in Russ.). https://doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536
38. Slovokhotov Yu.L., Novikov D.A. Distributed intelligence of multi-agent systems. Part II: Collective intelligence of social systems. *Control Sci.* 2023;6:2–17. https://doi.org/10.25728/cs.2023.6.1
[Original Russian Text: Slovokhotov Yu.L., Novikov D.A. Distributed intelligence of multi-agent systems. Part II: Collective intelligence of social systems. *Problemy upravleniya.* 2023;6:3–21 (in Russ.). https://doi.org/10.25728/pu.2023.6.1]
39. Gad A.G. Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review. *Arch. Computat. Methods Eng*. 2022;29(5):2531–2561. https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4
40. Kuliev E.V., Zaporozhets D.Yu., Kravchenko Yu.A., Semenova M.M. Solution of the problem of intellectual data analysis based on bioinspired algorithm. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2021;6(223):89–99 (in Russ.). https://doi.org/10.18522/2311-3103-2021-6-89-99
41. Dorigo M., Stützle T. Ant colony optimization: overview and recent advances. In book: Gendreau M., Potvin J.Y. (Eds.). *Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science*. Springer; 2019. P. 311–351. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_8
42. Kureychik V.V., Rodzin S.I. Computational models of evolutionary and swarm bio heuristics (Review). *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2021;27(1):507–520 (in Russ.). https://doi.org/10.17587/it.27.507-520
43. Almufti S.M., Alkurdi A.A.H., Khoursheed E.A. Artificial Bee Colony Algorithm Performances in Solving Constraint-Based Optimization Problem. *Telematique.* 2022;21(1):6785–6799.
44. Lee J., Perkins D. A simulated annealing algorithm with a dual perturbation method for clustering. *Pattern Recogn.* 2021;112:107713. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107713

Об авторах

Бекетов Сальбек Мустафаевич, аналитик, лаборатория «Цифровое моделирование индустриальных систем», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29). E-mail: salbek.beketov@spbpu.com. ResearcherID KAM-0488-2024, SPIN-код РИНЦ 6717-9810, https://orcid.org/0009-0009-6448-9486

Зубкова Дарья Андреевна, младший научный сотрудник, лаборатория «Цифровое моделирование индустриальных систем», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29). E-mail: daria.zubkova@spbpu.com. Scopus Author ID 58045650200, SPIN-код РИНЦ 8130-5458, https://orcid.org/0000-0003-1106-5080

Гинцяк Алексей Михайлович, к.т.н., заведующий лабораторией «Цифровое моделирование индустриальных систем», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29). E-mail: aleksei.gintciak@spbpu.com. Scopus Author ID 57203897426, ResearcherID W-8013-2019, SPIN-код РИНЦ 9339-2635, https://orcid.org/0000-0002-9703-5079

Бурлуцкая Жанна Владиславовна, младший научный сотрудник, лаборатория «Цифровое моделирование индустриальных систем», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29). E-mail: zhanna.burlutskaya@spbpu.com. Scopus Author ID 57645600200, ResearcherID AGC-6277-2022, SPIN-код РИНЦ 1310-2126, https://orcid.org/0000-0002-5680-1937

Редько Сергей Георгиевич, директор Высшей школы проектной деятельности и инноваций в промышленности, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29). E-mail: redko_sg@spbstu.ru. Scopus Author ID 57211475098, SPIN-код РИНЦ 3501-2403, https://orcid.org/0000-0002-4343-4154

About the Authors

Salbek M. Beketov, Analyst, Laboratory of Digital Modeling of Industrial Systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Politekhnicheskaya ul., St. Petersburg, 195251 Russia). E-mail: salbek.beketov@spbpu.com. ResearcherID KAM-0488-2024, RSCI SPIN-code 6717-9810, https://orcid.org/0009-0009-6448-9486

Daria A. Zubkova, Junior Researcher, Laboratory of Digital Modeling of Industrial Systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Politekhnicheskaya ul., St. Petersburg, 195251 Russia). E-mail: daria.zubkova@spbpu.com. Scopus Author ID 58045650200, RSCI SPIN-code 8130-5458, https://orcid.org/0000-0003-1106-5080

Aleksei M. Gintciak, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Digital Modeling of Industrial Systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Politekhnicheskaya ul., St. Petersburg, 195251 Russia). E-mail: aleksei.gintciak@spbpu.com. Scopus Author ID 57203897426, ResearcherID W-8013-2019, RSCI SPIN-code 9339-2635, https://orcid.org/0000-0002-9703-5079

Zhanna V. Burlutskaya, Junior Researcher, Laboratory of Digital Modeling of Industrial Systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Politekhnicheskaya ul., St. Petersburg, 195251 Russia). E-mail: zhanna.burlutskaya@spbpu.com. Scopus Author ID 57645600200, ResearcherID AGC-6277-2022, RSCI SPIN-code 1310-2126, https://orcid.org/0000-0002-5680-1937

Sergey G. Redko, Director of the Higher School of Project Management and Innovation in Industry, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Politekhnicheskaya ul., St. Petersburg, 195251 Russia). E-mail: redko_sg@spbstu.ru. Scopus Author ID 57211475098, RSCI SPIN-code 3501-2403, https://orcid.org/0000-0002-4343-4154

Russian Technological Journal.
2025;13(4):95–106

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

Математическое моделирование

Mathematical modeling

УДК 681.5.015
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-95-106
EDN EFGVQG

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Об идентификации децентрализованных систем

Н.Н. Карабутов @, *

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

• **Поступила:** 11.11.2024 • **Доработана:** 18.01.2025 • **Принята к опубликованию:** 21.05.2025

Резюме

Цели. Рассматривается задача идентификации децентрализованных систем (ДС). Усложнение систем и априорная неопределенность требуют разработки соответствующих подходов и методов. Это касается, прежде всего, параметрической идентифицируемости (ПИ) ДС. Такое состояние можно объяснить сложностью ДС, наличием внутренних взаимосвязей, которые усложняли процесс параметрического оценивания. Необходимо предложить подход к ПИ, основанный на выполнении условия постоянства возбуждения и учете взаимосвязей в подсистемах. Рассматривается класс нелинейных ДС, нелинейности в которых удовлетворяют секторному условию. Учет этого условия позволяет обоснованно подойти к анализу свойств ДС, что является одной из целей данного исследования. Кроме того, целями работы являются: 1) разработка подхода к анализу свойств адаптивных систем идентификации (АСИ) с учетом требований к качеству процессов и синтез адаптивных параметрических алгоритмов; 2) исследование возможности применения алгоритмов сигнальной адаптации в системах идентификации ДС и поиск класса функций Ляпунова для анализа АСИ с такими алгоритмами; 3) моделирование предлагаемых методов и алгоритмов с целью подтверждения полученных результатов.

Методы. Применяются метод адаптивной идентификации, неявное идентификационное представление, S-синхронизация нелинейной системы, секторное условие, метод векторных функций Ляпунова.

Результаты. Получены условия ПИ ДС по выходу и в пространстве состояния. Предложен критерий, позволяющий получить оценки устойчивости АСИ с сигнальной адаптацией. Синтезированы алгоритмы настройки параметров АСИ. Доказана экспоненциальная диссипативность системы оценивания. Рассмотрено влияние взаимосвязей в подсистемах на свойства получаемых оценок параметров. Показано, что адаптивный алгоритм можно описать динамической матричной системой, если на АСИ наложить функциональное ограничение. Выполнено моделирование предлагаемых методов и алгоритмов.

Выводы. Рассмотрена проблема идентификации нелинейных ДС в условиях неопределенности. Получены оценки для нелинейной части системы, удовлетворяющей квадратичному условию. Доказана ПИ нелинейных ДС. Синтезированы алгоритмы параметрической и сигнальной адаптивной идентификации. Предложен класс функций Ляпунова для оценки свойств адаптивной системы с сигнальной адаптацией. Доказана экспоненциальная диссипативность процессов в адаптивной системе.

Ключевые слова: адаптивная идентификация, идентифицируемость, экспоненциальная устойчивость, постоянство возбуждения, векторная функция Ляпунова, сигнальная адаптация, секторное условие

* Редакция приносит свои соболезнования в связи с кончиной Николая Николаевича Карабутова после принятия рукописи к публикации.

© Н.Н. Карабутов, 2025

Для цитирования: Карабутов Н.Н. Об идентификации децентрализованных систем. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):95–106. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-95-106, https://www.elibrary.ru/EFGVQG

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

On the identification of decentralized systems

Nikolay N. Karabutov [@], *

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

• **Submitted:** 11.11.2024 • **Revised:** 18.01.2025 • **Accepted:** 21.05.2025

Abstract

Objectives. The work set out to consider the problem of identification of decentralized systems (DS). Due to the increasing complexity of systems and *a priori* uncertainty, it becomes necessary to identify appropriate approaches and methods. In particular, this concerns the parametric identifiability (PI) of DSs. This condition can be explained in terms of the complexity of the DS and the presence of internal relationships that complicates the process of parametric estimation. Thus it becomes necessary to propose an approach to PI based on meeting the conditions of the excitation constancy that takes subsystem relationships into account. A class of nonlinear DS is considered whose nonlinearities satisfy the sectoral condition. By taking this condition into account a more rational approach can be taken to the analysis of the DS properties. The work additionally set out to: (1) develop an approach to the analysis of the properties of adaptive identification systems (AIS), taking into account the requirements for the quality of the processes and synthesis of adaptive parametric algorithms; (2) investigate the possibility of using signal adaptation algorithms in DS identification systems and searching for a class of Lyapunov functions for the analysis of AIS with such algorithms; (3) model the proposed methods and algorithms in order to confirm the results obtained.

Methods. The research is based on adaptive identification, implicit identification representation, S-synchronization of a nonlinear system, sector condition, and Lyapunov vector function methods.

Results. The conditions for the parametric identifiability of the DS at the output and in the state space are obtained. A criterion is proposed for estimating the stability of an AIS with signal adaptation. Algorithms for adjusting the parameters of an AIS are synthesized. The exponential dissipativity of the evaluation system is confirmed. The influence of interrelations in the subsystems on the properties of the obtained parameter estimates is considered. An adaptive algorithm can be described by a dynamic matrix system if a functional constraint is imposed on the AIS. The proposed methods and algorithms are modeled to confirm their validity.

Conclusions. Considering the problem of identifying nonlinear DS under uncertainty, estimates have been obtained for the nonlinear part of the system satisfying the quadratic condition. The parametric identifiability of nonlinear DS has been confirmed. Algorithms for parametric and signal adaptive identification have been synthesized. A class of Lyapunov functions is proposed for evaluating the properties of an adaptive system with signal adaptation. The exponential dissipativity of processes in an adaptive system is demonstrated.

Keywords: adaptive identification, identifiability, exponential stability, excitation constancy, Lyapunov vector function, signal adaptation, sector condition

For citation: Karabutov N.N. On the identification of decentralized systems. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):95–106. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-95-106, https://www.elibrary.ru/EFGVQG

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

The author declares no conflicts of interest.

* The Editorial Board expresses its condolences over the death of Nikolay N. Karabutov after the approval of the manuscript for publication.

ВВЕДЕНИЕ

Системы децентрализованного управления широко применяются для решения различных задач. В большинстве случаев основное внимание уделяется обеспечению устойчивости и качества системы. Как правило, децентрализованные системы (ДС) работают в условиях недостаточной априорной информации [1–7]. Для управления ДС применяются различные подходы и методы. Для восстановления недостающей информации используются методы идентификации, основанные на адаптивных наблюдателях [2, 5], нейронных сетях [6], частотных методах [7], модельный подход [8], корреляционный анализ и метод наименьших квадратов [9]. В [10] реализована двухшаговая процедура идентификации. Применяются адаптивные законы управления, для оценки параметров которых используются различные процедуры [11–13].

Проведенный анализ показывает, что в зависимости от предметной области, для которой разрабатывается ДС, могут применяться различные процедуры и методы идентификации. Имеющиеся параметрические неопределенности, как правило, компенсируются настройкой параметров адаптивного закона управления. Применяются методы ретроспективной идентификации, которые не всегда учитывают текущее состояние системы. Не всегда изучаются свойства предлагаемых алгоритмов и идентифицируемость самой системы, а также влияние связей в системе. Это компенсируется применением многошаговых процедур идентификации.

В работе рассматривается задача адаптивной идентификации нелинейной ДС (НДС) с нелинейностями, для которых выполняется квадратичное условие (раздел 1). Во втором разделе анализируется важная проблема параметрической идентифицируемости (ПИ) НДС как в пространстве переменных состояния, так и выходном пространстве. Анализируется влияние свойств информационного пространства системы на ПИ. Предложен подход к синтезу адаптивных алгоритмов (АА) идентификации на основе второго метода Ляпунова. Рассмотрены два класса алгоритмов – параметрические и сигнальные. Исследованы свойства системы идентификации. Доказана экспоненциальная диссипативность адаптивной системы идентификации (АСИ).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается система, состоящая из m взаимосвязанных подсистем:

$$S_i:\begin{cases}\dot{\mathbf{X}}_i=\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i+\mathbf{B}_i u_i+\sum\limits_{j=1,j\neq i}^{m}\bar{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j+\mathbf{F}_i\left(\mathbf{X}_i\right),\\ \mathbf{Y}_i=\mathbf{C}_i\mathbf{X}_i,\end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{X}_i\in\mathbb{R}^{n_i}$, $\mathbf{Y}_i\in\mathbb{R}^{q_i}$ – векторы состояния и выхода S_i-подсистемы, $u_i\in\mathbb{R}$ – управление, $i=\overline{1,m}$, $\sum\limits_{i=1}^{m}n_i=n$. Элементы матриц $\mathbf{A}_i\in\mathbb{R}^{n_i\times n_i}$, $\mathbf{B}_i\in\mathbb{R}^{n_i}$, $\bar{\mathbf{A}}_{ij}\in\mathbb{R}^{n_i\times n_j}$ неизвестны, $\mathbf{C}_i\in\mathbb{R}^{q_i\times n_i}$. Матрица $\bar{\mathbf{A}}_{ij}$ отражает взаимовлияние S_j подсистемы. $\mathbf{F}_i\left(\mathbf{X}_i\right)\in\mathbb{R}^{n_i}$ учитывает нелинейное состояние подсистемы S_i, а матрица $\mathbf{A}_i\in\mathscr{H}$ является гурвицевой (устойчивой).

Предположение 1. $\mathbf{F}_i(\mathbf{X}_i)$ принадлежит классу

$$\mathscr{H}_{\mathbf{F}}\left(\pi_1,\pi_2\right)=\\ =\left\{\mathbf{F}(\mathbf{X})\in\mathbb{R}^n:\pi_1\mathbf{X}\le\mathbf{F}(\mathbf{X})\le\pi_2\mathbf{X},\ \mathbf{F}(0)=0\right\} \quad (2)$$

и удовлетворяет квадратичному условию

$$\left(\pi_2\mathbf{X}-\mathbf{F}(\mathbf{X})\right)^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{F}(\mathbf{X})-\pi_1\mathbf{X}\right)\ge 0, \quad (3)$$

где $\pi_1>0$, $\pi_2>0$ – заданные числа.

Математическая модель для системы (1) имеет вид:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_i=\mathbf{K}_i\left(\hat{\mathbf{X}}_i-\mathbf{X}_i\right)+\hat{\mathbf{A}}_i\mathbf{X}_i+\hat{\mathbf{B}}_i u_i+\\ +\sum_{j=1,j\neq i}^{m}\hat{\bar{\mathbf{A}}}_{ij}\mathbf{X}_j+\hat{\mathbf{F}}_i\left(\mathbf{X}_i\right), \quad (4)$$

где $\mathbf{K}_i\in\mathscr{H}$ – гурвицева матрица с известными параметрами; $\hat{\mathbf{X}}_i$ – вектор состояния модели; $\hat{\mathbf{A}}_i$, $\hat{\mathbf{B}}_i$, $\hat{\bar{\mathbf{A}}}_{ij}$ – настраиваемые матрицы соответствующих размерностей, $\hat{\mathbf{F}}_i$ – априори заданная нелинейная вектор-функция с известной структурой. Матрица $\mathbf{K}_i$ выбирается на основе требований к системе управления или идентификации.

Необходимо найти алгоритмы оценки параметров модели (4) на основе анализа множества данных измерения $\mathbb{I}_{\mathrm{o},i}=\left\{\mathbf{X}_i(t),u_i(t),\mathbf{X}_j(t),t\in\mathbb{J}=\left[t_0,t_k\right]\right\}$ ($\mathbb{J}$ – интервал съема данных; t – время; t_0, t_{e} – начало и конец временного интервала) и выполнения предположения 1, чтобы

$$\lim_{t\to\infty}\left\|\hat{\mathbf{X}}_i(t)-\mathbf{X}_i(t)\right\|\le\delta_i,$$

где $\delta_i\ge 0$.

2. ОБ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ S_i-ПОДСИСТЕМЫ

Возможность оценивания параметров зависит от идентифицируемости S_i-подсистем. Известно, что в адаптивных системах при реализации алгоритмов

оценивания должно выполняться условие постоянства возбуждения (предельной невырожденности) элементов $\mathbb{I}_{o,i}$.

Пусть функция $u_i(t)$ удовлетворяет условию постоянства возбуждения:

$$\mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{u_i},\overline{\alpha}_{u_i}} : \underline{\alpha}_{u_i} \le u_i^2(t) \le \overline{\alpha}_{u_i} \ \forall t \in \left[t_0, t_0+T\right], \quad (5)$$

где $\underline{\alpha}_{u_i}, \overline{\alpha}_{u_i}$ – положительные числа, $T > 0$. Далее условие (5) будем записывать в виде $u_i(t) \in \mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{u_i},\overline{\alpha}_{u_i}}$. Если $u_i(t)$ не имеет свойства постоянства возбуждения, то будем писать $u_i(t) \notin \mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{u_i},\overline{\alpha}_{u_i}}$ или $u_i(t) \notin \mathscr{EC}$.

Замечание 1. При идентификации (идентифицируемости) нелинейных систем условие (5) нужно выбирать с учетом обеспечения S-синхронизируемости нелинейной системы [14]. Свойство (5) при этом записывается в виде

$$\mathscr{EC}^{\mathrm{S}}_{\underline{\alpha}_{u_i},\overline{\alpha}_{u_i}} : \left(\underline{\alpha}_{u_i} \le u_i^2(t) \le \overline{\alpha}_{u_i}\right) \& \left(\Omega_{u_i}(\omega) \subseteq \Omega_{\mathrm{S}}(\omega)\right),$$

где $\Omega_{u_i}(\omega)$ – множество частот u_i; $\Omega_{\mathrm{S}}(\omega)$ – множество допустимых частот входа u_i, обеспечивающих S-синхронизируемость системы. В дальнейшем свойство постоянства возбуждения будем обозначать через $\mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{u_i},\overline{\alpha}_{u_i}}$, понимая при этом, что оно гарантирует $\mathscr{EC}^{\mathrm{S}}_{\underline{\alpha}_{u_i},\overline{\alpha}_{u_i}}$.

Для получения условий идентифицируемости S_i рассмотрим модель (4). Для ошибки $\mathbf{E}_i = \hat{\mathbf{X}}_i - \mathbf{X}_i$ получаем уравнение:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{E}}_i = \mathbf{K}_i\mathbf{E}_i + \Delta\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i + \Delta\mathbf{B}_i u_i + \\ + \sum_{j=1, j\ne i}^{M} \Delta\overline{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j + \Delta\mathbf{F}_i\left(\mathbf{X}_i\right),\end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta\mathbf{A}_i = \hat{\mathbf{A}}_i - \mathbf{A}_i$, $\Delta\mathbf{B}_i = \hat{\mathbf{B}}_i - \mathbf{B}_i$, $\Delta\overline{\mathbf{A}}_{ij} = \hat{\overline{\mathbf{A}}}_{ij} - \overline{\mathbf{A}}_{ij}$, $\Delta\mathbf{F}_i = \hat{\mathbf{F}}_i - \mathbf{F}_i$ – параметрические невязки.

Лемма 1. Если нелинейность $\mathbf{F}(\mathbf{X}) \in \mathbb{R}^n$ принадлежит классу $\mathbf{F}(\mathbf{X}) \in \mathscr{N}_{\mathbf{F}}\left(\pi_1, \pi_2\right)$ и

$$\pi_1\mathbf{X} \le \mathbf{F}\left(\mathbf{X}\right) \le \pi_2\mathbf{X}, \quad (7)$$

то для $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ справедлива оценка

$$\left\|\mathbf{F}\left(\mathbf{X}\right)\right\|^2 \le \eta\overline{\alpha}_{\mathbf{X}}, \quad (8)$$

где $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^n$, $\pi_1 > 0$, $\pi_2 > 0$, $\eta = \eta\left(\pi_1, \pi_2\right) > 0$, $\overline{\alpha}_{\mathbf{X}} = \overline{\alpha}_{\mathbf{X}}\left(\mathbf{X}\right) > 0$.

Лемма 2. Если выполняются условия леммы 1, то для $\Delta\mathbf{F}(\mathbf{X})$ справедлива оценка

$$\Delta\mathbf{F}^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{F} \le 2\eta\overline{\alpha}_{\mathbf{X}} + \delta_{\mathbf{F}},$$

где $\eta = 2\overline{\pi} + \pi^2$, $\overline{\pi} = \pi_1\pi_2$, $\pi = \pi_1 + \pi_2$, $\delta_{\mathbf{F}} > 0$.

Рассмотрим систему (6) и функцию Ляпунова (ФЛ) $V_i\left(\mathbf{E}_i\right) = 0.5\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\mathbf{E}_i$, где $\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_i^{\mathrm{T}} > 0$ – положительно определенная симметричная матрица. Обозначим норму матрицы $\Delta\mathbf{A}_i$: $\left\|\Delta\mathbf{A}_i\right\| = \sqrt{\mathrm{Sp}(\Delta\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{A}_i)}$, $\left\|\Delta\overline{\mathbf{A}}_{ij}\right\| = \sqrt{\mathrm{Sp}(\Delta\mathbf{A}_{ij}^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{A}_{ij})}$, $\mathrm{Sp}(\cdot)$ – след матрицы.

Теорема 1. Пусть: 1) матрица $\mathbf{A}_i \in \mathscr{H}$; 2) $\mathbf{X}_i(t) \in \mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_i},\overline{\alpha}_{\mathbf{X}_i}}, \mathbf{X}_j(t) \in \mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_j},\overline{\alpha}_{\mathbf{X}_j}} u_i(t) \in \mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{u_i},\overline{\alpha}_{u_i}}$; 3) для $\mathbf{F}_i(\mathbf{X}_i)$ выполняются условия лемм 1, 2. Тогда подсистема (1) является идентифицируемой на множестве $\mathbb{I}_{o,i}$, если

$$\begin{aligned}2\Bigg(\overline{\alpha}_{\mathbf{X}_i}\left\|\Delta\mathbf{A}_i\right\|^2 + \overline{\alpha}_{u_i}\left\|\Delta\mathbf{B}_i\right\|^2 + \\ + \sum_{j=1, j\ne i}^{m}\overline{\alpha}_{\mathbf{X}_j}\left\|\Delta\overline{\mathbf{A}}_{ij}\right\|^2 + 2\eta\overline{\alpha}_{\mathbf{X}_i} + \delta_{\mathbf{F}_i}\Bigg) \le \overline{\lambda}_i V_i,\end{aligned} \quad (9)$$

где $\overline{\lambda}_i = \lambda_i - k_i$, $\lambda_i > 0$ – минимальное собственное число матрицы $\mathbf{Q}_i$, $k_i > 0$, $\mathbf{K}_i\mathbf{R}_i + \mathbf{K}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i = -\mathbf{Q}_i$, $\mathbf{Q}_i$ – положительная симметричная матрица, $\eta = 2\overline{\pi} + \pi^2$, $\pi = \pi_1 + \pi_2$, $\overline{\pi} = \pi_1\pi_2$, $\delta_{\mathbf{F}_i} \ge 0$.

Если выполняются условия теоремы 1, то подсистему S_i будем называть идентифицируемой на множестве $\mathbb{I}_{\mathrm{o}}$ или $\mathscr{PI}_{\mathbf{X}_i}$-идентифицируемой.

Рассмотрим идентифицируемость подсистемы S_i на множестве «вход-выход»:

$$\mathbb{I}_{\mathrm{o},\mathbf{Y}_i} = \left\{\mathbf{Y}_i(t), u_i(t), \mathbf{Y}_j(t), t \in \mathbb{J} = \left[t_0, t_k\right]\right\}.$$

Для подсистемы S_i справедливо представление

$$\dot{\mathbf{Y}}_i = \mathbf{A}_{\#,i}\mathbf{Y}_i + \mathbf{B}_{\#,i}u_i + \sum_{j=1, j\ne i}^{m}\overline{\mathbf{A}}_{\#,ij}\mathbf{Y}_j + \tilde{\mathbf{C}}_i^{\#}\mathbf{F}_i\left(\tilde{\mathbf{C}}_i\mathbf{Y}_i\right), \quad (10)$$

где $\tilde{\mathbf{C}}_i = \left(\mathbf{C}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_i\right)^{\#}\mathbf{C}_i^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{A}_{\#,i} = \tilde{\mathbf{C}}_i^{\#}\mathbf{A}_i\tilde{\mathbf{C}}_i$, $\mathbf{B}_{\#,i} = \tilde{\mathbf{C}}_i^{\#}\mathbf{B}_i$, $\overline{\mathbf{A}}_{\#,ij} = \tilde{\mathbf{C}}_i^{\#}\overline{\mathbf{A}}_{ij}\tilde{\mathbf{C}}_j$, # – знак псевдообращения матрицы.

Модель для (10) имеет структуру, аналогичную (4) с учетом специфики уравнения (10). Введем ошибку $\mathbf{E}_{\#,i} = \hat{\mathbf{Y}}_i - \mathbf{Y}_i$ и ФЛ $V_{\#,i}\left(\mathbf{E}_{\#,i}\right) = 0.5\mathbf{E}_{\#,i}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\mathbf{E}_{\#,i}$.

Теорема 2. Пусть: 1) матрица $\mathbf{A}_{\#,i} \in \mathscr{H}$; 2) $\mathbf{Y}_i(t) \in \mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{Y}_i},\overline{\alpha}_{\mathbf{Y}_i}}, \mathbf{Y}_j(t) \in \mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{Y}_j},\overline{\alpha}_{\mathbf{Y}_j}} u_i(t) \in \mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{u_i},\overline{\alpha}_{u_i}}$; 3) для $\mathbf{F}_{\mathrm{i}}(\mathbf{X}_{\mathrm{i}})$ выполняются условия лемм 1, 2; 4) подсистема S_i является наблюдаемой. Тогда подсистема (1) является идентифицируемой на множестве $\mathbb{I}_{\mathrm{o},\mathbf{Y}_i}$, если

$$2\left(\bar{\alpha}_{\mathbf{Y_i}}\left\|\Delta\mathbf{A}_{\#,i}\right\|^2+\bar{\alpha}_{u_i}\left\|\Delta\mathbf{B}_{\#.i}\right\|^2+\right.$$

$$\left.+\sum_{j=1,j\neq i}^{m}\bar{\alpha}_{\mathbf{Y}_j}\left\|\Delta\bar{\mathbf{A}}_{\#,ij}\right\|^2+2\eta\bar{\alpha}_{\mathbf{Y}_i}+\delta_{\mathbf{F}_i}\right)\leq\bar{\lambda}_{\#,i}V_{\#,i},$$

где $\Delta\mathbf{A}_{\#,i}=\hat{\mathbf{A}}_{\#,i}-\mathbf{A}_{\#,i}$, $\Delta\mathbf{B}_{\#,i}=\hat{\mathbf{B}}_{\#,i}-\mathbf{B}_{\#,i}$, $\Delta\bar{\mathbf{A}}_{\#,ij}=\hat{\bar{\mathbf{A}}}_{\#,ij}-\bar{\mathbf{A}}_{\#,ij}$, $\Delta\mathbf{F}_i=\hat{\mathbf{F}}_i-F_i$, $\bar{\lambda}_{\#,i}>0$.

Доказательство теорем 1, 2 сводится к обеспечению условия неположительности производных ФЛ.

3. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ АДАПТАЦИИ

Рассмотрим ФЛ $V_i\left(\mathbf{E}_i\right)=0.5\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\mathbf{E}_i$, производная которой на движениях (6) имеет вид:

$$\dot{V}_i=-\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_i\mathbf{E}_i+\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\times$$

$$\times\left(\Delta\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i+\Delta\mathbf{B}_iu_i+\sum_{j=1,j\neq i}^{m}\Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j+\Delta\mathbf{F}_i\left(\mathbf{X}_i\right)\right).$$

Потребуем, чтобы в процессе адаптации выполнялось функциональное ограничение

$$\dot{V}_i\leq-\chi_i\left(\Delta\mathbf{A}_i,\Delta\bar{\mathbf{A}}_i,\Delta\mathbf{B}_i,\Delta\mathbf{F}_i\right),$$

где

$$\chi\left(\Delta\mathbf{A}_i,\Delta\bar{\mathbf{A}}_i,\Delta\mathbf{B}_i,\Delta\mathbf{F}_i\right)=0.5\left(\varphi_{\mathrm{A}_i}(t)\left\|\Delta\mathbf{A}_i(t)\right\|^2+\right.$$

$$\left.+\varphi_{\tilde{\mathbf{A}}_i}(t)\left\|\Delta\bar{\mathbf{A}}_i(t)\right\|^2+\varphi_{\mathbf{B}_i}(t)\left\|\Delta\mathbf{B}_i\right\|^2+\varphi_{\mathbf{F}_i}(t)\left\|\Delta\mathbf{F}_i(t)\right\|^2\right),$$

$\varphi_{\mathbf{A}_i}(t)$, $\varphi_{\tilde{\mathbf{A}}_i}(t)$, $\varphi_{\mathbf{B}_i}(t)$, $\varphi_{\mathbf{F}_i}(t)$ – ограниченные неотрицательные функции. Тогда

$$\eta_i=\dot{V}_i+\chi_i=-\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_i\mathbf{E}_i+\chi\left(\Delta\mathbf{A}_i,\Delta\bar{\mathbf{A}}_i,\Delta\mathbf{F}_i\right)+$$

$$+\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\left(\Delta\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i+\Delta\mathbf{B}_iu_i+\sum_{j=1,j\neq i}^{m}\Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j+\Delta\mathbf{F}_i\left(\mathbf{X}_i\right)\right).\quad(11)$$

Из условия $\eta\leq0$ получаем АА:

$$\Delta\dot{\mathbf{A}}_i=-\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{A}_i}\left(\varphi_{\mathbf{A}_i}\Delta\mathbf{A}_i+\mathbf{E}_i\mathbf{R}_i\mathbf{X}_i^{\mathrm{T}}\right),$$

$$\Delta\dot{\bar{\mathbf{A}}}_{ij}=-\boldsymbol{\Gamma}_{\bar{\mathbf{A}}_{ij}}\left(\varphi_{\tilde{\mathbf{A}}_{ij}}\Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}+\mathbf{E}_i\mathbf{R}_i\mathbf{X}_j^{\mathrm{T}}\right),\quad(12)$$

$$\Delta\dot{\mathbf{B}}_i=-\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{B}_i}\left(\varphi_{B_{ij}}\Delta\mathbf{B}_i+\mathbf{R}_i\mathbf{E}_iu_i\right),$$

где $\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{A}_i}$, $\boldsymbol{\Gamma}_{\tilde{\mathbf{A}}_{ij}}$, $\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{B}_i}$ – диагональные матрицы соответствующих размерностей с положительными диагональными элементами, гарантирующие устойчивость процессов адаптации.

3.1. Параметрический алгоритм для $\mathbf{F}_i$

Для оценки $\mathbf{F}_i$ можно применять параметрические и сигнальные алгоритмы. Рассмотрим параметрический подход [15].

Предположение 2. Функция $\mathbf{F}_i(\mathbf{X}_i)$ задана на множестве

$$\mathbf{F}_i\in\mathbb{F}_{\mathbf{F}_i}=\left\{\mathbf{F}_i\in\mathscr{U}_{\mathbf{F}}\left(\pi_1,\pi_2\right):\mathbf{F}_i(\mathbf{X}_i)=\right.$$

$$\left.=\tilde{\mathbf{F}}_i^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{X}_i,\mathbf{N}_{i,1}\right)\mathbf{N}_{i,2},\ \mathbf{N}_i=\left[\mathbf{N}_{i,1}^{\mathrm{T}},\mathbf{N}_{i,2}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}},\ \mathbf{N}_i\in\mathbb{N}_{i,\mathrm{a}}\right\},\quad(13)$$

где $\mathbb{N}_{i,\mathrm{a}}=\left\{\mathbf{N}_{\mathbf{i}}\in\mathbb{R}^n:\underline{\mathbf{N}}_i\leq\mathbf{N}_i\leq\overline{\mathbf{N}}_i\right\}$ – формируемая апостериори параметрическая область для $\mathbf{F}_i$; $\underline{\mathbf{N}},\overline{\mathbf{N}}$ – векторные границы для $\mathbf{N}$, понимаемые как $\underline{n}_i\in\underline{\mathbf{N}}_i$, $\overline{n}_i\in\overline{\mathbf{N}}_i$; $\mathbf{N}_{i,1}$ – априори известный вектор параметров нелинейности, $\mathbf{N}_{i,2}$ – априори неизвестное множество параметров, которое рассматривается далее как вектор, подлежащий оценке. Некоторые элементы $\underline{\mathbf{N}}_i,\overline{\mathbf{N}}_i$ могут быть неизвестны. Структура $\tilde{\mathbf{F}}_i\left(\mathbf{X}_i,\mathbf{N}_{i,1}\right)$ формируется априори с учетом известного вектора $\mathbf{N}_{i,1}$.

Из (13) следует, что оценка вектор-функции $\mathbf{F}_i(\mathbf{X}_i)$ на этапе идентификации ищется в виде:

$$\hat{\mathbf{F}}_i(X_i)=\tilde{\mathbf{F}}_i^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{X}_i,\hat{\mathbf{N}}_{i,1}\right)\hat{\mathbf{N}}_{i,2},\quad(14)$$

где $\hat{\mathbf{N}}_{i,1}\in\mathbb{R}^{n_{i,1}}$ – априорная оценка известных параметров, $\hat{\mathbf{N}}_{i,2}\in\mathbb{R}^{n_{i,2}}$ – вектор настраиваемых параметров.

Полагаем $\mathbb{N}_i=\mathbb{N}_{i,1}\cup\mathbb{N}_{i,2}$. Множество $\mathbb{N}_{i,1}\subset\mathbb{R}^{n_{i,1}}$ $\left(\mathbf{N}_{i,1}\in\mathbb{N}_{i,1}\right)$ содержит элементы, которые недоступны для настройки с помощью АА. Элементы $\mathbf{N}_{i,2}\in\mathbb{N}_{i,2}\subset\mathbb{R}^{n_{i,2}}$ оцениваются на этапе идентификации. Матрица $\tilde{\mathbf{F}}_i\left(y,\hat{\mathbf{N}}_{i,1}\right)$ формируется на этапе структурного синтеза (анализа) системы. Представление (14) является следствием предлагаемой параметрической концепции для $\mathbf{F}_i(\mathbf{X}_i)$.

Замечание 2. Вектор $\hat{\mathbf{N}}_{i,1}$ может настраиваться по итерационному принципу на основе алгоритма принуждения [15].

Так как $\Delta\mathbf{F}=\tilde{\mathbf{F}}_i^{\mathrm{T}}\left(y,\hat{\mathbf{N}}_{i,1}\right)\hat{\mathbf{N}}_{i,2}-\mathbf{F}_i(\mathbf{X}_i)$, то из условия $\dot{V}_i\leq0$ получаем АА для $\hat{\mathbf{N}}_{i,2}$:

$$\dot{\hat{\mathbf{N}}}_{i,2}=-\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{F}_i}\left(\varphi_{F_i}\hat{\mathbf{N}}_{i,2}+\tilde{\mathbf{F}}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\mathbf{E}_i\left(\mathbf{X}_i,\hat{\mathbf{N}}_{i,1}\right)\right),\quad(15)$$

где $\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{F}_i}$ – диагональная матрица с положительными диагональными элементами.

В дальнейшем для удобства ссылок систему (6), (11), (15) будем обозначать как AS_{AF_i}.

3.2. Сигнальный алгоритм

Рассмотрим модель

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_i = \mathbf{K}_i\left(\hat{\mathbf{X}}_i - \mathbf{X}_i\right) + \hat{\mathbf{A}}_i\mathbf{X}_i + \hat{\mathbf{B}}_i u_i + \\ + \sum_{j=1,j\neq i}^{m} \hat{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j + \mathbf{U}_i \quad (16)$$

и уравнение ошибки

$$\dot{\mathbf{E}}_i = \mathbf{K}_i\mathbf{E}_i + \Delta\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i + \Delta\mathbf{B}_i u_i + \\ + \sum_{j=1,j\neq i}^{m} \Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j + \mathbf{U}_i\left(\mathbf{X}_i\right) - \mathbf{F}_i\left(\mathbf{X}_i\right). \quad (17)$$

Производная ФЛ имеет вид:

$$\dot{V}_i = -\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_i\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i \times \\ \times\left(\Delta\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i + \Delta\mathbf{B}_i u_i + \sum_{j=1,j\neq i}^{m} \Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j + \mathbf{U}_i - \mathbf{F}_i\right), \quad (18)$$

а алгоритм для $\mathbf{U}_i$:

$$\mathbf{U}_i = -\mathbf{D}_i\mathbf{R}_i\mathbf{E}_i, \quad (19)$$

где $\mathbf{D}_i \in \mathbb{R}^{n_i\times n_i}$ – диагональная матрица с положительными элементами.

Так как $\mathbf{F}_i\left(\mathbf{X}_i\right) \in \mathscr{W}_{\mathbf{F}}\left(\pi_1,\pi_2\right)$, то для $\mathbf{F}_i(\mathbf{X}_i)$ справедлива лемма 1.

Воспользуемся подходом, описанным в [16]. Выберем элементы матрицы $\mathbf{D}_i$ из условия $\left\|\mathbf{D}_i\right\| \geq d_i \geq \eta\bar{\alpha}_{X_i}$. Тогда для (18) получаем:

$$\dot{V}_i = -\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_i\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i \times \\ \times\left(\Delta\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i + \Delta\mathbf{B}_i u_i + \sum_{j=1,j\neq i}^{m} \Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j - \mathbf{D}_i\mathbf{R}_i\mathbf{E}_i - \mathbf{F}_i\right). \quad (20)$$

Так как $\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\mathbf{D}_i\mathbf{R}_i\mathbf{E}_i \geq 2\eta\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_i}\underline{\lambda}_{\mathbf{R}_i}V_i$, где $\underline{\lambda}_{\mathbf{R}_i}$ – наименьшее собственное число матрицы $\mathbf{R}_i$, то

$$\dot{V}_i \leq -\sigma V_i + \mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\left(\Delta\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i + \Delta\mathbf{B}_i u_i + \sum_{j=1,j\neq i}^{m} \Delta\tilde{\mathbf{A}}_{ij}\mathbf{X}_j\right), \quad (21)$$

где $\sigma = \lambda_{\mathbf{Q}_i} + 2\eta\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_i}\underline{\lambda}_{\mathbf{R}_i}$.

После несложных преобразований получаем:

$$\dot{V}_i \leq -\sigma V_i + \\ + 2\left(\bar{\alpha}_{X_i}\left\|\Delta\mathbf{A}_i\right\|^2 + \bar{\alpha}_{u_i}\left\|\Delta\mathbf{B}_i\right\|^2 + \sum_{j=1,j\neq i}^{m} \bar{\alpha}_{X_j}\left\|\Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}\right\|^2\right).$$

Если выполняется условие

$$2\left(\bar{\alpha}_{\mathbf{X}_i}\left\|\Delta\mathbf{A}_i\right\|^2 + \bar{\alpha}_{u_i}\left\|\Delta\mathbf{B}_i\right\|^2 + \\ + \sum_{j=1,j\neq i}^{m} \bar{\alpha}_{\mathbf{X}_j}\left\|\Delta\tilde{\mathbf{A}}_{ij}\right\|^2 + \eta\bar{\alpha}_{i,\mathbf{X}_i}\right) \leq \sigma V_i,$$

то система (16) при $\left(u_i(t), \mathbf{X}_i(t), \mathbf{X}_j(t)\right) \in \mathscr{C}$ является параметрически идентифицируемой на множестве $\left\{u_i(t), \mathbf{X}_i(t), \mathbf{X}_j(t)\right\}$ на классе алгоритмов (12), (19).

В дальнейшем для удобства ссылок систему (6), (12), (19) будем обозначать как AS_{AS_i}.

4. АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ КАК ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Рассмотренный подход к синтезу АА основан на выполнении свойств устойчивости и является типичным в АСИ. Попытки получения более сложных АА связаны с наложением на систему ограничений. Такой подход требует определенных знаний и не всегда дает работоспособные алгоритмы. Ниже предлагается метод, который учитывает ряд требований, предъявляемых к АСИ.

Рассмотрим синтез АА на примере матрицы $\mathbf{A}_i$. Применим ФЛ:

$$V_i^{\Delta}\left(\mathbf{E}_i, \Delta\mathbf{A}_i, \Delta\dot{\mathbf{A}}_i\right) = 0.5\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\mathbf{E}_i + 0.5\mathrm{Sp}\left(\Delta\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}\Delta\dot{\mathbf{A}}_i\right).$$

Потребуем, чтобы выполнялось функциональное ограничение:

$$\dot{V}_i^{\Delta} \leq -\chi_{\Delta} = -\alpha_{\Delta}\mathrm{Sp}\left(\Delta\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{A}_i\right).$$

Тогда для $\eta_{\Delta} = \dot{V}_i^{\Delta} + \alpha_{\Delta}\mathrm{Sp}\left(\Delta A_i^{\mathrm{T}}\Delta A_i\right)$ на движениях (6) получаем:

$$\eta_{\Delta} = -\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_i\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\Delta\mathbf{A}_i\mathbf{X}_i + \\ + \mathrm{Sp}\left(\Delta\dot{\mathbf{A}}_i^{\mathrm{T}}\Delta\dot{\mathbf{A}}_i\right) + \mathrm{Sp}\left(\Delta\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}\Delta\ddot{\mathbf{A}}_i\right) + \alpha_{\Delta}\mathrm{Sp}\left(\Delta\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{A}_i\right).$$

Отсюда следует АА для $\Delta\mathbf{A}_i$:

$$\Delta\ddot{\mathbf{A}}_i = -\Delta\dot{\mathbf{A}}_i - \alpha_{\Delta}\Delta\mathbf{A}_i - \boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{A}_i}\mathbf{E}_i\mathbf{R}_i\mathbf{X}_i^{\mathrm{T}}.$$

Пусть $\Delta\mathbf{A}_i = \mathbf{Z}_1$. Тогда

$$S_{\mathrm{AA}}: \begin{cases} \dot{\mathbf{Z}}_1 = \mathbf{Z}_2, \\ \dot{\mathbf{Z}}_2 = -\alpha_{\Delta}\mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2 - \boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{A}_i}\mathbf{E}_i\mathbf{R}_i\mathbf{X}_i^{\mathrm{T}}. \end{cases}$$

Итак, если на АСИ наложить функциональное ограничение $\chi_{\Delta} \geq 0$, то получаем АА, состояние которого описывается системой S_{AA}.

Замечание 3. В теоретическом плане такой подход позволяет получить различные классы алгоритмов. Реализация их требует дальнейшей структуризации с учетом условий работы контурной системы.

5. СВОЙСТВА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ

5.1. Система AS_{AF_i}

Рассмотрим системы AS_{AF_i}, AS_{AF_j} и ФЛ $V_i\left(\mathbf{E}_i\right)=0.5\mathbf{E}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_i\mathbf{E}_i$,

$$V_{\Delta,i}=0.5\cdot\mathrm{Sp}\left(\Delta\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_i^{-1}\Delta\mathbf{A}_i\right)+0.5\sum_{j=1}^{m}\mathrm{Sp}\left(\Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_{ij}^{-1}\Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}\right)+ \\ +0.5\Delta\mathbf{B}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_i^{-1}\Delta\mathbf{B}_i+0.5\Delta\mathbf{N}_{i,2}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{N}_{i,2}}^{-1}\Delta\mathbf{N}_{\mathbf{N}_{i,2}}. \quad (22)$$

Теорема 3. Пусть: 1) существуют ФЛ $V_i(t)$, $V_{\Delta,i}(t)$, допускающие бесконечно малый высший предел; 2) $\mathbf{A}_i\in\mathscr{H}$; 3) $\bar{\mathbf{A}}_{ij}$ гарантируют устойчивость подсистемы S_i; 4) $\mathbf{X}_i(t)\in\mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_i},\bar{\alpha}_{\mathbf{X}_i}}$, $\mathbf{X}_j(t)\in\mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_j},\bar{\alpha}_{\mathbf{X}_j}}$, $u_i(t)\in\mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{u_i},\bar{\alpha}_{u_i}}$; 5) $\mathbf{F}_i\in\mathbb{F}_{\mathbf{F}_i}$, где $\mathbb{F}_{\mathbf{F}_i}$ – множество функций, принадлежащих $\mathscr{H}_{\mathbf{F}}$; 6) для векторной ФЛ $\mathbf{W}_i=\left[V_i,V_{\Delta,i}\right]^{\mathrm{T}}$ справедлива система неравенств:

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_i\\ \dot{V}_{\Delta,i}\end{bmatrix}\le\underbrace{\begin{bmatrix}-\mu_i & \frac{2}{\mu_i}\kappa_i\\ \vartheta_{\chi\alpha,i}\rho_i & -\beta_{\lambda\chi,i}\end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{\mathbf{W}_i}}\begin{bmatrix}V\\ V_{\Delta,i}\end{bmatrix}+\underbrace{\begin{bmatrix}\frac{2}{\mu_i}\bar{\upsilon}_{\tilde{\mathbf{F}}_i}\\ 0.5\delta_{\mathbf{N},i}\end{bmatrix}}_{\mathbf{L}_i}, \quad (23)$$

где $\mu_i,\kappa_i,\vartheta_{\chi\alpha,i},\rho_i,\beta_{\lambda\chi,i},\bar{\upsilon}_{\tilde{F}_i},\delta_{N,i}$ – положительные числа, зависящие от параметров подсистемы S_i и свойств информационного множества; 7) верхнее решение для $\mathbf{W}_i$ удовлетворяет системе уравнения $\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{W}_i}=A_{\mathbf{W}_i}\mathbf{S}_{\mathbf{W}_i}+\mathbf{L}_i$, если

$$w_{\rho}(t)\le s_{\rho}(t)\ \ \forall\left(t\ge t_0\right)\&\left(w_{\rho}\left(t_0\right)\le s_{\rho}\left(t_0\right)\right),$$

$\rho=e,i;\Delta,i$ для элементов $\mathbf{W}_i$, $w_{\rho}\in\mathbf{W}_i$, $s_{\rho}\in\mathbf{S}_{\mathbf{W}_i}$. Тогда система $AS_{F,i}$ является экспоненциально диссипативной с оценкой

$$\mathbf{W}_i(t)\le\mathrm{e}^{\mathbf{A}_{\mathbf{W}_i}\left(t-t_0\right)}\mathbf{S}_{\mathbf{W}_i}(t_0)+\int_{t_0}^{t}\mathrm{e}^{\mathbf{A}_{\mathbf{W}_i}\left(t-\tau\right)}\mathbf{L}_i d\tau, \quad (24)$$

если

$$\mu_i^2\beta_{\lambda\chi,i}\ge 2\kappa_i\vartheta_{\chi\alpha,i}\rho_i. \quad (25)$$

Предельные свойства $AS_{F,i}$ определяются элементами вектора $\mathbf{L}_i$. Если структура и параметры вектора $\hat{\mathbf{N}}_{i,1}$ известны, то подсистема $AS_{F,i}$ является экспоненциально устойчивой при условии, что $\tilde{\mathbf{F}}_i\in\mathscr{EC}$.

Рассмотрим систему $AS_{F,i,j}$, состоящую из подсистем $AS_{F,i}$ и $AS_{F,j}$. Для $AS_{F,i,j}$ справедлива система неравенств:

$$\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{W}}_i\\ \dot{\mathbf{W}}_j\end{bmatrix}\le\begin{bmatrix}\mathbf{A}_{\mathbf{W}_i} & 0\\ 0 & \mathbf{A}_{\mathbf{W}_j}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{W}_i\\ \mathbf{W}_j\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{L}_i\\ \mathbf{L}_j\end{bmatrix}, \quad (26)$$

где $\mathbf{A}_{\mathbf{W}_i}$ и $\mathbf{L}_i$ имеют вид (23).

Условия экспоненциальной устойчивости:

$$\mu_i^2\beta_{\lambda\chi,i}\ge 2\kappa_i\vartheta_{\chi\alpha,i}\rho_i,\ \ \mu_i^2\beta_{\lambda\chi,j}\ge 2\kappa_j\vartheta_{\chi\alpha,j}\rho_j.$$

5.2. Система AS_{AS_i}

Рассмотрим ФЛ $V_i(t)$ и

$$V_{\Delta_S,i}=0.5\cdot\mathrm{Sp}\left(\Delta\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_i^{-1}\Delta\mathbf{A}_i\right)+ \\ +0.5\sum_{j=1}^{m}\mathrm{Sp}\left(\Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_{ij}^{-1}\Delta\bar{\mathbf{A}}_{ij}\right)+0.5\Delta\mathbf{B}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_i^{-1}\Delta\mathbf{B}_i+ \\ +0.5\int_{t_0}^{t}\Delta_{\mathbf{U}_i}\mathbf{F}_i^{\mathrm{T}}(\tau)\Delta_{\mathbf{U}_i}\mathbf{F}_i(\tau)d\tau,$$

где $\Delta_{\mathbf{U}_i}\mathbf{F}_i=\mathbf{U}_i-\mathbf{F}_i$.

Теорема 4. Пусть выполняются условия: 1) существуют ФЛ $V_i(t)$, $V_{\Delta_S,i}(t)$, допускающие бесконечно малый высший предел; 2) $\mathbf{A}_i\in\mathscr{H}$; 3) $\bar{\mathbf{A}}_{ij}$ гарантируют устойчивость подсистемы S_i; 4) $\mathbf{F}_i\left(\mathbf{X}_i\right)\in\mathscr{H}_{\mathbf{F}}\left(\pi_1,\pi_2\right)$; 5) $u_i(t)\in\mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{u_i},\bar{\alpha}_{u_i}}$, $\mathbf{X}_i(t)\in\mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_i},\bar{\alpha}_{\mathbf{X}_i}}$, $\mathbf{X}_j(t)\in\mathscr{EC}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_j},\bar{\alpha}_{\mathbf{X}_j}}$; 6) в некоторой области начала координат существует такое $\nu_i>0$, что при $t>>t_0$ справедливо $\mathbf{F}_i^{\mathrm{T}}\Delta_{\mathbf{U}_i}\mathbf{F}_i=\nu_i\left(\left\|\mathbf{F}_i\right\|^2+\left\|\Delta_{\mathbf{U}_i}\mathbf{F}_i\right\|^2\right)$; 7) для векторной ФЛ $\mathbf{W}_{S,i}=\left[V_i,V_{\Delta_S,i}\right]^{\mathrm{T}}$ выполняется система неравенств:

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\dot{V}_i\\ \dot{V}_{\Delta_{S,i}}\end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{W}}_{S_i}}\le\underbrace{\begin{bmatrix}-\mu_i & \frac{2}{\mu_i}\kappa_{\Delta_{S,i}}\\ \vartheta_{\Delta_{S,i}}\rho_i & -\beta_{\Delta_{S,i}}\end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{\mathbf{W}_{S_i}}}\underbrace{\begin{bmatrix}V_i\\ V_{\Delta_{S,i}}\end{bmatrix}}_{\mathbf{W}_{S_i}}+\underbrace{\begin{bmatrix}0\\ \sqrt{0.125}\nu_i\eta_i\bar{\alpha}_{\mathbf{X}_i}\end{bmatrix}}_{\mathbf{L}_{S,i}}, \quad (27)$$

где $\mu_i,\kappa_{\Delta_S,i},\vartheta_{\Delta.i},\rho_i,\beta_{\Delta,i},\nu_i,\eta_i$ – положительные числа, зависящие от параметров AS_{AS_i}-подсистемы

и свойств информационного множества $\mathbb{I}_{o,i}$; 8) для верхнего решения $\mathbf{W}_{S,i}$ справедлива система уравнения $\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{W}_{Si}} = \mathbf{A}_{\mathbf{W}_{S,i}}\mathbf{S}_{\mathbf{W}_{S,i}} + \mathbf{L}_{S,i}$, если

$$w_\rho(t) \le s_\rho(t) \quad \forall\left(t \ge t_0\right) \& \left(w_\rho\left(t_0\right) \le s_\rho\left(t_0\right)\right),$$

$\rho = e,i$; $\Delta_{S,i}$ для элементов $\mathbf{W}_{S_i}$, $w_\rho \in \mathbf{W}_{S_i}$, $s_\rho \in \mathbf{S}_{\mathbf{W}_{S,i}}$. Тогда система AS_{AS_i} является экспоненциально диссипативной с оценкой

$$\mathbf{W}_{S_i}(t) \le \mathrm{e}^{\mathbf{A}_{\mathbf{W}_{S_i}}(t-t_0)}\mathbf{S}_{\mathbf{W}_{S_i}}(t_0) + \int_{t_0}^{t} \mathrm{e}^{\mathbf{A}_{\mathbf{W}_{S_i}}(t-\sigma)}\mathbf{L}_{S,i}d\sigma, \quad (28)$$

если $\mu_i^2\beta_{\Delta,i} \ge 2\vartheta_{\Delta.i}\rho_i\kappa_{\Delta_S,i}$.

Из полученных результатов следует, что применение системы AS_{AS_i} дает смещенные оценки параметров подсистемы S_i.

Схема доказательства теорем 3, 4 представлена в [17].

Замечание 4. Следует отметить, что сигнальные алгоритмы широко применяются в адаптивных системах управления. Обоснование их применения дается на основе обеспечения неположительности производной ФЛ. Это связано с применением квадратичных ФЛ, которые неполностью отражают специфику процессов в AS_{AS_i} -системах. Предложенная в работе ФЛ $V_{\Delta_{S,i}}$ позволяет обосновать свойства системы AS_{AS_i} и получить оценки качества ее работы.

Замечание 5. Алгоритм (19) представляет собой компенсирующее управление. Поэтому термин «сигнальная адаптация» связан только с выбором матрицы коэффициента усиления в (19). В задачах идентификации применение сигнальной адаптации (СА) во многом зависит от требований, предъявляемых к качеству системы идентификации.

Замечание 6. Для анализа свойств алгоритма (12) с $\varphi_i = 0$ можно применить результаты, полученные в [15].

6. ПРИМЕР

Рассматривается система:

$$S_1: \begin{cases} \begin{bmatrix}\dot{x}_{11}\\ \dot{x}_{12}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -a_{21} & -a_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{11}\\ x_{12}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \bar{a}_1\end{bmatrix}x_2 + \begin{bmatrix}0\\ b_1\end{bmatrix}u_1 + \begin{bmatrix}0\\ c_1\end{bmatrix}f_1(x_{11}),\\ y_1 = x_{11}, \end{cases}$$

$$S_2: \begin{cases} \dot{x}_2 = -a_2x_2 + \bar{a}_2x_{11} + b_2u_2 + c_2f_1(x_{11}),\\ y_2 = x_2, \end{cases} \quad (29)$$

где $\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix}x_{11} & x_{12}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$; y_1 – вектор состояния и выход подсистемы S_1; u_1 – вход (управление); $f_1(x_{11}) = \mathrm{sat}(x_{11})$ – функция насыщения; $f_2(x_2) = \mathrm{sign}(x_2)$ – знаковая функция; y_2 – выход подсистемы S_2. Параметры системы (29): $b_1 = 1$, $a_{21} = 2$, $a_{22} = 3$, $\bar{a}_1 = 1.5$, $c_1 = 1$, $a_2 = 1.25$, $\bar{a}_2 = 0.2$, $b_2 = 1$, $c_2 = 0.25$. Входы $u_i(t)$ являлись синусоидальными.

Так как переменная x_{12} не измеряется, то подсистема S_1 преобразуется к виду, где используются только доступные для наблюдения переменные. Применяя подход [15], получаем для S_1 представление в пространстве «вход-выход»:

$$\dot{y}_1 = -\alpha_1 y_1 + \alpha_2 p_{y_1} + \beta_{12} p_{x_2} + b_1 p_{u_1} + c_1 p_{f_1}, \quad (30)$$

где α_1, α_2, β_{12}, b_1, c_1 – коэффициенты, подлежащие оценке; $\mu > 0$,

$$\begin{aligned} \dot{p}_{y_1} &= -\mu p_{y_1} + y_1, \ \dot{p}_{x_2} = -\mu p_{x_2} + x_2,\\ \dot{p}_{u_1} &= -\mu p_{u_1} + u_1, \ \dot{p}_{f_1} = -\mu p_{f_1} + f_1. \end{aligned} \quad (31)$$

Фазовый портрет для S_1 показан на рис. 1. Процессы в подсистеме являются нелинейными. Кроме этого, между y_1 и y_2 существует взаимосвязь $y_2 = y_2(y_1)$ (коэффициент детерминации равен 75%), что отражается на свойствах подсистемы S_1 (см. рис. 1). В частности, y_2 влияет на S-синхронизируемость S_1 и оценивание параметров. Применяя подход [15], можно сделать вывод, что подсистема S_1 структурно идентифицируема.

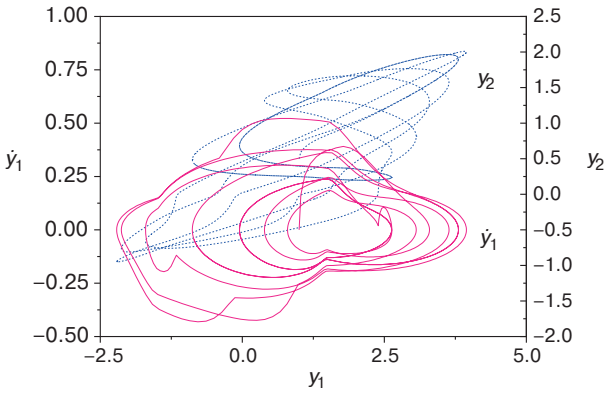


Рис. 1. Фазовый портрет подсистемы S_1

Модели для подсистем S_1 и S_2

$$\hat{\dot{y}}_1 = -k_1e_1 + \hat{a}_{11}y_1 + \hat{a}_{12}p_{y_1} + \hat{\beta}_{12}p_{x_2} + \hat{b}_1p_{u_1} + \hat{c}_1p_{f_1}, \quad (32)$$

$$\hat{\dot{y}}_2 = -k_2e_2 + \hat{a}_2y_2 + \hat{\bar{a}}_2y_1 + \hat{b}_2u_2 + \hat{c}_1f_2, \quad (33)$$

где k_1, k_2 – априори задаваемые положительные числа; $e_1 = \hat{y}_1 - y_1$, $e_2 = \hat{y}_2 - y_2$ – ошибки идентификации; $\hat{a}_i, \hat{\bar{a}}_i, \hat{b}_i, \hat{c}_i$ – настраиваемые параметры.

Для настройки параметров моделей применялись алгоритмы (12) с $\varphi_i = 0$:

$$\dot{\hat{a}}_{11} = -\gamma_{a_{11}} e_1 y_1,\ \dot{\hat{a}}_{12} = -\gamma_{a_{12}} e_1 p_{y_1},\ \dot{\hat{\beta}}_{12} = -\gamma_{\beta_{12}} e_1 p_{x_2},$$
$$\dot{\hat{b}}_1 = -\gamma_{b_1} e_1 p_{u_1},\ \dot{\hat{c}}_1 = -\gamma_{c_1} e_1 p_{f_1}, \quad (34)$$

$$\dot{\hat{a}}_2 = -\gamma_{a_2} e_2 y_2,\ \dot{\bar{\hat{a}}}_2 = -\gamma_{\bar{a}_2} e_2 y_1,$$
$$\dot{\hat{b}}_2 = -\gamma_{b_2} e_2 u_1,\ \dot{\hat{c}}_2 = -\gamma_{c_2} e_2 f_2, \quad (35)$$

где $\gamma_{a_{ij}} > 0, \gamma_{\bar{a}_{ij}} > 0, \gamma_{\beta_{ij}} > 0, \gamma_{b_i} > 0, \gamma_{c_i} > 0$ – коэффициенты усиления контура адаптации.

На рис. 2 показан процесс настройки параметров модели (32) для S_1.

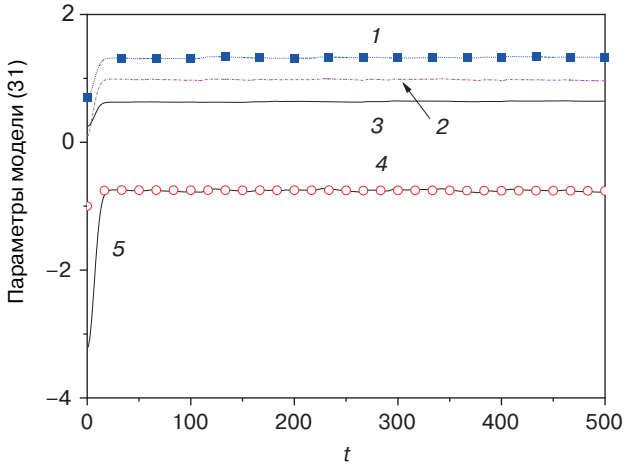


Рис. 2. Настройка параметров модели (32):
1 – $\hat{\beta}_{11}$, *2* – $\hat{c}_{11}$, *3* – $\hat{a}_{11}$, *4* – $\hat{a}_{12}$, *5* – $\hat{b}_1$

Результаты оценки адекватности моделей (32), (33) в выходном пространстве показаны на рис. 3.

Рис. 4 отражает динамику процессов настройки параметров модели (33) в зависимости от e_2. Видно, что процессы в АСИ для подсистемы S_2 являются нелинейными, а в АСИ для подсистемы S_1 процесс настройки является более регулярным. Процессы настройки параметров моделей (32), (33) являются разнотемповыми (рис. 5).

Рассмотрим АСИ с СА для S_2. Применим модель:

$$\dot{\hat{y}}_2 = -k_2 e_2 + \hat{a}_2 y_2 + \hat{\bar{a}}_2 y_1 + \hat{b}_2 u_2 + u_{s,2}, \quad (32a)$$

где $u_{s,2} = -d_2 e_2 x_2$.

Результаты работы АСИ с СА представлены на рис. 6–9. На рис. 6, 7 показаны процессы настройки параметров модели (32) и адекватность моделей в выходном пространстве. Рисунок 8 отражает динамику процессов в АСИ и изменение сигнала СА как функции ошибки идентификации для подсистемы S_2.

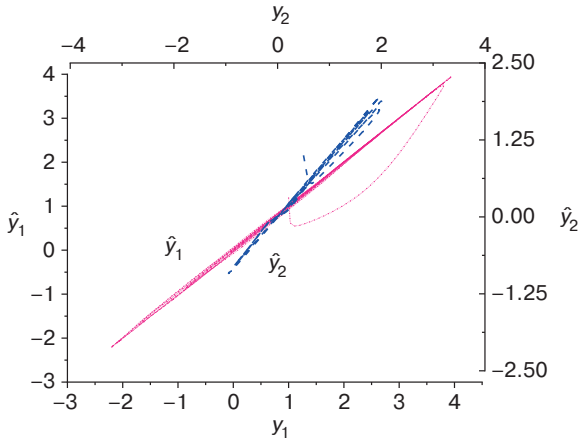


Рис. 3. Адекватность моделей (32), (33)

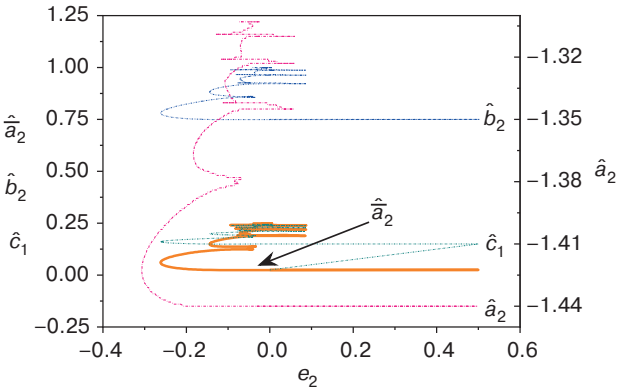


Рис. 4. Настройка параметров модели (32)

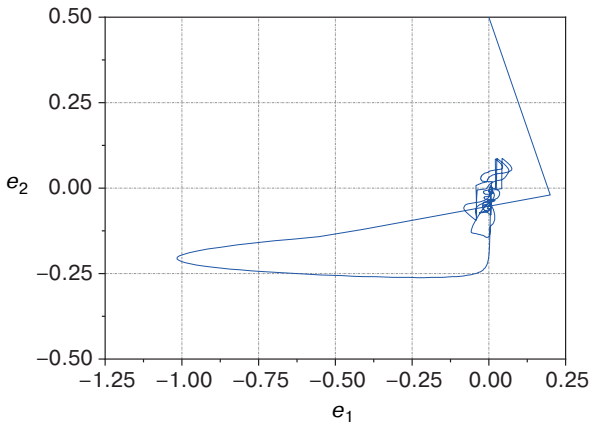


Рис. 5. Фазовый портрет АСИ в пространстве ошибок

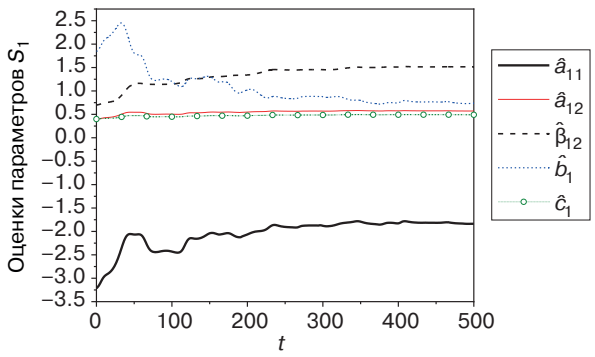


Рис. 6. Настройка параметров модели (32)

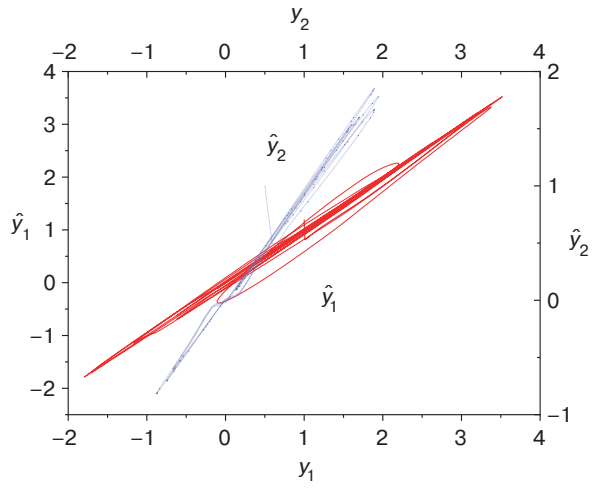


Рис. 7. Адекватность моделей (32), (32а)

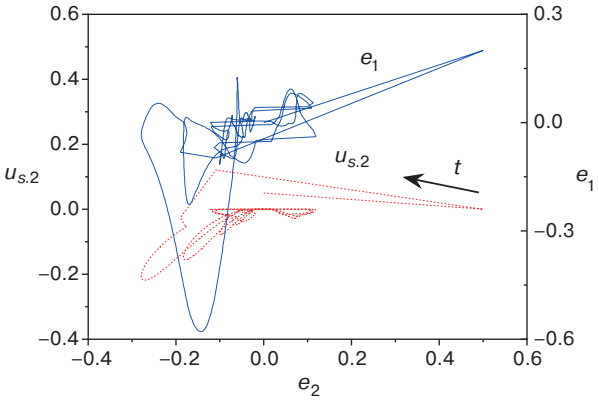


Рис. 8. Фазовые портреты АСИ и выход СА в пространстве ошибок

Результаты моделирования АСИ с СА показывают, что выход подсистемы S_2 оказывает влияние на настройку параметров АСИ подсистемы S_1. Поэтому системы идентификации с СА следует применять при соблюдении предъявляемых требований к качеству процесса адаптации. Несмотря на компенсирующие свойства, СА может приводить к усложнению процессов в АСИ.

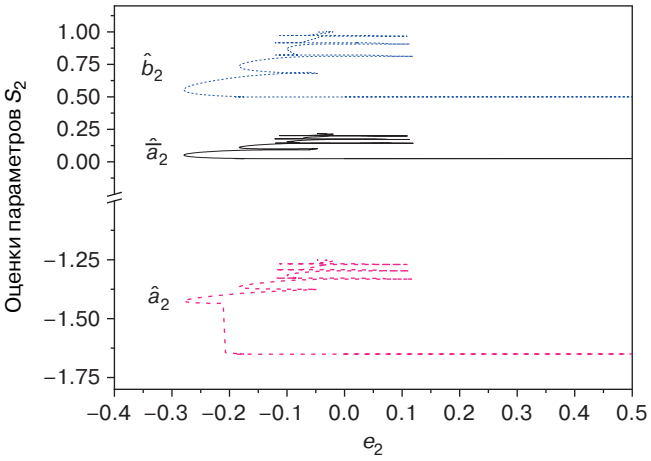


Рис. 9. Настройка параметров модели (32а)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается подход к идентификации НДС в условиях неопределенности. Рассматривается класс НДС, нелинейность в которых удовлетворяет секторному условию (квадратичной связи). Получены оценки для нелинейности. Наличие внутренних взаимосвязей существенно усложняет задачу параметрического оценивания. Здесь немаловажную роль играет проблема идентифицируемости НДС. В работе получены условия ПИ ДС как по выходу, так и в пространстве состояний. Они основаны на проверке условия постоянства возбуждения. Показано, что на ПИ влияют взаимосвязи между подсистемами. Получены алгоритмы параметрической и сигнальной адаптивной идентификации ДС. Исследованы свойства адаптивной ДС с СА. Впервые показано, как обосновать устойчивость АСИ с указанным классом алгоритмов. Для этого используется специальный класс функций ФЛ. Предложен подход к синтезу АА с учетом требований, предъявляемых к системе идентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hua C., Guan X., Shi P. Decentralized robust model reference adaptive control for interconnected time-delay systems. In: *Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 – July 2, 2004*. 2004. P. 4285–4289. https://doi.org/10.23919/ACC.2004.1383981
2. Yang Q., Zhu M., Jiang T., He J., Yuan J., Han J. Decentralized Robust Adaptive output feedback stabilization for interconnected nonlinear systems with uncertainties. *J. Control Sci. Eng*. 2016;2016:article ID 3656578. https://doi.org/10.1155/2016/3656578
3. Wu H. Decentralized adaptive robust control of uncertain large-scale non-linear dynamical systems with time-varying delays. *IET Control Theory & Applications*. 2012;6(5):629–640. https://doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0015
4. Fan H., Han L., Wen C., Xu L. Decentralized adaptive output-feedback controller design for stochastic nonlinear interconnected systems. *Automatica.* 2012;48(11):2866–2873. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.08.022
5. Бронников А.М., Буков В.Н. Децентрализованное адаптивное управление с идентификацией и модельной координацией в многосвязных системах. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010;1:22–30.

6. Benitez V.H., Sanchez E.N., Loukianov A.G. Decentralized adaptive recurrent neural control structure. *Eng. Appl. Artif. Intell*. 2007;20(8):1125–1132. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.02.006
7. Lamara A., Colin G., Lanusse P., Chamaillard Y., Charlet A. Decentralized robust control-system for a non-square MIMO system, the air-path of a turbocharged Diesel engine. *IFAC Proceedings Volumes.* 2012;45(30):130–137. https://doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00002
8. Nguyen T., Mukhopadhyay S. Identification and optimal control of large-scale systems using selective decentralization. In: *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (*SMC*). IEEE; 2016. P. 000503–000508. https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844289
9. Gudi R.D., Rawlings J.B., Venkat A., Jabbar N. Identification for decentralized MPC. *IFAC Proceedings Volumes.* 2004;37(9):299–304. https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31827-X
10. Mao X., He J. Decentralized System Identification Method for Large-Scale Networks. In: *2022 American Control Conference* (*ACC*). IEEE; 2022. P. 5173–5178. https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867516
11. Ioannou P.A. Decentralized adaptive control of interconnected systems. *IEEE Trans. Automat. Control.* 1986;31(4):291–298. https://doi.org/10.1109/TAC.1986.1104282
12. Jiang Z.-P. Decentralized and adaptive nonlinear tracking of large-scale systems via output feedback. *IEEE Trans. Automat. Control*. 2000;45(11):2122–2128. https://doi.org/10.1109/9.887638
13. Li X.-J., Yan G.-H. Adaptive decentralized control for a class of interconnected nonlinear systems via backstepping approach and graph theory. *Automatica*. 2017;76:87–95. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.10.019
14. Карабутов Н.Н. *Введение в структурную идентифицируемость нелинейных систем*. М.: URSS/ЛЕНАНД; 2021. 144 с. ISBN 978-5-9710-9022-9
15. 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
16. Громыко В.Д., Санковский Е.А. *Самонастраивающиеся системы с моделью*. М.: Энергия; 1974. 80 с.
17. Карабутов Н.Н. Об адаптивной идентификации систем с несколькими нелинейностями. *Russian Technological Journal*. 2023;11(5):94–05. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-94-10

REFERENCES

1. Hua C., Guan X., Shi P. Decentralized robust model reference adaptive control for interconnected time-delay systems. In: *Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 – July 2, 2004*. 2004. P. 4285–4289. https://doi.org/10.23919/ACC.2004.1383981
2. Yang Q., Zhu M., Jiang T., He J., Yuan J., Han J. Decentralized Robust Adaptive output feedback stabilization for interconnected nonlinear systems with uncertainties. *J. Control Sci. Eng*. 2016;2016:article ID 3656578. https://doi.org/10.1155/2016/3656578
3. Wu H. Decentralized adaptive robust control of uncertain large-scale non-linear dynamical systems with time-varying delays. *IET Control Theory & Applications*. 2012;6(5):629–640. https://doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0015
4. Fan H., Han L., Wen C., Xu L. Decentralized adaptive output-feedback controller design for stochastic nonlinear interconnected systems. *Automatica.* 2012;48(11):2866–2873. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.08.022
5. Bronnikov A.M., Bukov V.N. Decentralized adaptive control in multivariate system with identification and model coordination. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie.* 2010;1:22–30 (in Russ.).
6. Benitez V.H., Sanchez E.N., Loukianov A.G. Decentralized adaptive recurrent neural control structure. *Eng. Appl. Artif. Intell*. 2007;20(8):1125–1132. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.02.006
7. Lamara A., Colin G., Lanusse P., Chamaillard Y., Charlet A. Decentralized robust control-system for a non-square MIMO system, the air-path of a turbocharged Diesel engine. *IFAC Proceedings Volumes.* 2012;45(30):130–137. https://doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00002
8. Nguyen T., Mukhopadhyay S. Identification and optimal control of large-scale systems using selective decentralization. In: *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (*SMC*). IEEE; 2016. P. 000503–000508. https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844289
9. Gudi R.D., Rawlings J.B., Venkat A., Jabbar N. Identification for decentralized MPC. *IFAC Proceedings Volumes.* 2004;37(9):299–304. https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31827-X
10. Mao X., He J. Decentralized System Identification Method for Large-Scale Networks. In: *2022 American Control Conference* (*ACC*). IEEE; 2022. P. 5173–5178. https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867516
11. Ioannou P.A. Decentralized adaptive control of interconnected systems. *IEEE Trans. Automat. Control.* 1986;31(4):291–298. https://doi.org/10.1109/TAC.1986.1104282
12. Jiang Z.-P. Decentralized and adaptive nonlinear tracking of large-scale systems via output feedback. *IEEE Trans. Automat. Control*. 2000;45(11):2122–2128. https://doi.org/10.1109/9.887638
13. Li X.-J., Yan G.-H. Adaptive decentralized control for a class of interconnected nonlinear systems via backstepping approach and graph theory. *Automatica*. 2017;76:87–95. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.10.019
14. Karabutov N.N. *Vvedenie v strukturnuju identificiruemost' nelinejnyh system* (*Introduction to Structural Identifiability of Nonlinear Systems*). Moscow: URSS/LENAND; 2021. 144 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-9022-9
15. 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

16. Gromyko V.D., Sankovskii E.A. *Samonastraivayushchiesya sistemy s model'yu* (*Self-Adjusting Systems with a Model*). Moscow: Energiya; 1974. 80 p. (in Russ.).
17. Karabutov N.N. On adaptive identification of systems having multiple nonlinearities. *Russian Technological Journal.* 2023;11(5):94–105. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-94-10

Об авторе

Карабутов Николай Николаевич, д.т.н., профессор, кафедра проблем управления, Институт 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 State Prize of the Russian Federation in the field of Science and Technology. E-mail: karabutov@mirea.ru. Scopus Author ID 6603372930, ResearcherID P-5683-2015, RSCI SPIN-code 9646-9721, https://orcid.org/0000-0002-3706-7431

Russian Technological Journal.
2025;13(4):107–122

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

Математическое моделирование

Mathematical modeling

УДК 536.715
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-107-122
EDN FXQFZG

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование детонационного режима, возбуждаемого турбулизацией процесса горения

Е.В. Радкевич [1], М.Е. Ставровский [2, @], О.А. Васильева [3], Н.Н. Яковлев [4], М.И. Сидоров [5]

[1] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия*
[2] *МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия*
[3] *Московский государственный строительный университет, Москва, 129337 Россия*
[4] *Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, Москва, 119991 Россия*
[5] *МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия*
[@] *Автор для переписки, e-mail: stavrovskiyme@bmstu.ru*

• **Поступила:** 12.12.2024 • **Доработана:** 14.03.2025 • **Принята к опубликованию:** 30.05.2025

Резюме

Цели. Объектом исследования являются критические процессы с избыточной энергией, к которым относятся процессы горения и взрыва, разрушения материалов, кристаллизации, спекания материалов и др. Предметом исследования являются результаты численного моделирования турбулизации процесса горения (ламинарно-турбулентного перехода) и закономерностей явлений, связанных с ламинарно-турбулентным переходом в критических процессах.

Методы. Использован термодинамический анализ, обозначивший траектории эволюции системы и показавший, что в процессе горения существуют области устойчивости ламинарного горения, а также метастабильные и лабильные области, где ламинарное горение неустойчиво. Применен энергетический подход к решению задач исследования, при котором основное внимание уделяется вопросам изучения перераспределения избыточной энергии и формирования отличительных признаков структуры и параметров объекта и процессов.

Результаты. Представлены результаты численного эксперимента вибрационного режима турбулизации процесса горения, как взаимодействие резонанса Раушенбаха и ламинарно-турбулентного перехода. На многообразии локального равновесия смоделирован резонанс при накачке кинетической энергии, реализующий сброс избыточной энергии. Для пояснения возникающих при этом новых понятий описан резонанс адиабатического гидродинамического процесса и показана возможность избежать резонанс через механизм сброса избыточной энергии турбулизацией ламинарного процесса, что подтверждается результатами натурных экспериментов.

Выводы. Показано, что в вибрационном горении можно избежать резонанс за счет срыва с многообразия локального равновесия турбулизацией ламинарного процесса (приближения локального равновесия) при накачке кинетической энергии. В процессе горения существуют области устойчивости ламинарного горения, а также метастабильные и лабильные области, где ламинарное горение неустойчиво. Это не означает,

© Е.В. Радкевич, М.Е. Ставровский, О.А. Васильева, Н.Н. Яковлев, М.И. Сидоров, 2025

что в области устойчивости не будут наблюдаться признаки турбулентности при ее развитом состоянии и в этих областях диффузия возмущений будет их размывать, тогда как в областях неустойчивости процесс «отрицательной» (кановской) диффузии будет их концентрировать. Сделано предположение, что области неустойчивости гомогенной системы являются источниками возмущений, а области устойчивости – «стоками».

Ключевые слова: ламинарно-турбулентный переход, детонация, горение, энергия, диффузия

Для цитирования: Радкевич Е.В., Ставровский М.Е., Васильева О.А., Яковлев Н.Н., Сидоров М.И. Моделирование детонационного режима, возбуждаемого турбулизацией процесса горения. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):107–122. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-107-122, https://www.elibrary.ru/FXQFZG

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Simulation of the detonation regime excited by combustion process turbulence

Evgeny V. Radkevich [1], Mikhail E. Stavrovsky [2, @], Olga A. Vasilyeva [3], Nikolay N. Yakovlev [4], Mikhail I. Sidorov [5]

[1] *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*
[2] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*
[3] *Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, 129337 Russia*
[4] *N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*
[5] *MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*
[@] *Corresponding author, e-mail: stavrovskiyme@bmstu.ru*

• **Submitted:** 12.12.2024 • **Revised:** 14.03.2025 • **Accepted:** 30.05.2025

Abstract

Objectives. The work considers critical processes involving excess energy, which include combustion and explosion, destruction of materials, crystallization, sintering of materials, etc. The results of numerical modeling of the turbulence of the combustion process (laminar–turbulent transition) and the patterns of phenomena associated with the laminar–turbulent transition in critical processes are studied.

Methods. Thermodynamic analysis was used to outline the trajectories of a system's evolution and identify areas of laminar combustion stability during combustion, as well as metastable and labile regions where laminar combustion is unstable. An energy analysis approach was used to solve research problems involving the study of the redistribution of excess energy and the formation of distinctive structural features and parameters of the object and processes.

Results. The results of a numerical experiment of the vibrational turbulence regime of the combustion process are presented as an interaction of the Rauschenbach resonance and laminar–turbulent transition. The resonance occurring during kinetic energy pumping, which implements the discharge of excess energy, is modeled on a variety of local equilibrium. In order to explain the new concepts that arise in this case, the resonance of the adiabatic hydrodynamic process is described. The possibility of avoiding resonance through the mechanism of dumping excess energy by turbulence of the laminar process is confirmed by the results of field experiments.

Conclusions. The possibility of avoiding resonance in vibrational combustion due to disruption of the local equilibrium from the manifold by turbulence of the laminar process (approximation of local equilibrium) during pumping kinetic energy is demonstrated. During the combustion process, areas of laminar combustion stability are identified, along with metastable and labile areas where laminar combustion is unstable. However, this does not mean that signs of turbulence will not be observed in the stability region in its developed state: in these regions the diffusion of perturbations will blur them, whereas in the instability regions the process of negative (Cahn) diffusion will result in their concentration. It can be assumed that the instability regions of a homogeneous system are sources of perturbations, while the stability regions are sinks.

Keywords: laminar-turbulent transition, detonation, combustion, energy, diffusion

For citation: Radkevich E.V., Stavrovsky M.E., Vasilyeva O.A., Yakovlev N.N., Sidorov M.I. Simulation of the detonation regime excited by combustion process turbulence. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):107–122. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-107-122, https://www.elibrary.ru/FXQFZG

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В формулировках Кана и Хилларда теории неравновесных фазовых переходов [1, 2] и в теории критической опалесценции Дебая [3] при описании критических явлений детали химии опущены, а логика оперирует только понятием энергии. Все критические процессы – процессы с избыточной энергией. Деградация ламинарного процесса через процесс турбулизации приводит к сбросу энергии [4–8]. Гипотеза, которой придерживаются авторы – «турбулизация является одним из механизмов зарождения устойчивой зоны детонации» [4]. Экспериментально эта гипотеза подтверждена А.Н. Шиплюком[1] и др. [9–11] применением регулируемой неоднородности на обтекаемой поверхности. Интересует место и момент срыва с многообразия локального равновесия при сбрасывании избытка энергии через турбулизацию процесса.

Будем оперировать понятием энергии в нескольких формах:

а) химическая энергия будет представлена в виде концентраций;

б) неравновесная часть свободной энергии у Кана – градиент концентрации;

в) механическая составляющая в «градиентной» форме напряжений (структура как пружина), дающая когерентную спинодаль [11];

г) по аналогии может быть добавлена кинетическая энергия вихрей (как квазичастиц – жидких частиц механики сплошной среды).

Энергетический метод решения ряда задач в большинстве случаев отличается наглядностью и простотой. Механизмы обратной связи необходимы для того, чтобы наметить наиболее простые практические методы воздействия на колебательную систему и для того, чтобы дать ее полное теоретическое описание. Хорошо известным, но недостаточно изученным переходным процессом является смена режимов с ламинарного на турбулентный.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛИЗАЦИИ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

Предложено решение следующих задач:

- вывод модели ламинарного горения в поле силы тяжести с энергетическим учетом гидродинамики;
- энергия завихренности, мера деградации ламинарного горения, энтропия и свободная энергия процесса турбулизации ламинарного горения;
- знакопеременная диффузия, аналог оператора Кана – Хилларда в уравнении для внутренней энергии (замыкания срыва с многообразия ламинарного процесса горения);
- численный эксперимент вибрационного режима турбулизации процесса горения, как взаимодействие резонанса Раушенбаха [5] и ламинарно-турбулентного перехода.

МЕХАНИЗМ ТУРБУЛИЗАЦИИ ВИБРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

На многообразии локального равновесия (в рамках ламинарного процесса приближения локального равновесия) в [6–8] смоделирован вибрационный взрыв (резонанс при накачке кинетической энергии), реализующий сброс избыточной энергии. Для пояснения возникающих при этом новых понятий в [8] описан резонанс адиабатического гидродинамического процесса и показана возможность избежать резонанс через механизм сброса избыточной энергии

[1] Шиплюк А.Н. *Развитие возмущений и управление пограничными слоями при гиперзвуковых скоростях*: дис. … д. ф.-м. н. Новосибирск, 2005. 320 с. [Shiplyuk A.N. *Growth of perturbations and control of boundary layers at hypersonic speeds*. Dr. Sci. Thesis (Phys.-Math.). Novosibirsk, 2005. 320 p. (in Russ.).]

турбулизацией ламинарного процесса [12], что подтверждается реальным экспериментом.

При вибрационном горении, в терминах И.Г. Баренблата, возникает превращенное состояние, в котором механизмом сброса избыточной энергии является либо резонанс, либо турбулизация процесса. В случае одной активной компоненты глобальную неоднородность системы можно характеризовать как неоднородное распределение энтальпии по потоку (смеси). При накачке кинетической энергии, в процессе горения в поле силы тяжести в фазовом пространстве переменных (объем V, давление P, температура T, приведенное количество активной компоненты n, энтропия S, внутренняя энергия E, скорость активной компоненты u_1, скорость пассивной компоненты u_2) приращение энтальпии есть полный дифференциал на многообразии локального равновесия [5], на котором ламинарный процесс (в приближении локального равновесия) описывается уравнениями (1)–(4) классической двухкомпонентной модели процесса горения в поле силы тяжести:

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho U) = \varepsilon_R \Delta\rho, \tag{1}$$

$$\partial_t((1-c_0 n)\rho u_2) + \partial_x((1-c_0 n)\rho u_2^2) + \partial_x P = \\ = \varepsilon_R \Delta u_2 + \varepsilon_g (1-c_0 n),$$

$$\partial_t(c_0 n \rho u_1) + \partial_x(c_0 n \rho u_1^2) + \partial_x P = \\ = \varepsilon_R \Delta u_1 + \varepsilon_g c_0 n \rho,$$

$$\rho \frac{d}{dt} E + P \mathrm{div} U = \varepsilon_R \Delta E,$$

где ρ – плотность; x – пространственная переменная; t – время; c_0 – концентрация активной компоненты; ε_g – ускорение свободного падения; ε_R = 1/Re, Re – число Рейнольдса, $\varepsilon_R = \varepsilon / (\rho_* U_* L_*)$, где ρ_* – характерная плотность однородной смеси; U_* – характерная скорость однородной смеси; L_* – характерный размер среды; ε – кинетическая вязкость; средняя скорость смеси – $U = c_0 n u_1 + (1-c_0 n)u_2$, $\frac{d}{dt} = \partial_t + U\partial_x$ и кинетические уравнения [13, 14]:

$$\rho c \frac{d}{dt} T = \partial_x(\lambda \partial_x T) + QW(n,T), \tag{2}$$

где c – молярная концентрация, Q – теплота;

$$\rho \frac{d}{dt} n = \partial_x(\rho D \partial_x NNn) - W(n,T),$$

где D – коэффициент подвижности, NNn – приведенное количество активной компоненты двухкомпонентной смеси.

$$W = k_0 \rho n^\beta \mathrm{e}^{-\frac{E_*}{RT}}, \tag{3}$$

где k_0 – константа скорости реакции при температуре, β – порядок реакции, R – универсальная газовая постоянная, E_* – энергия активации.

Замыкающие уравнения в этом случае – уравнения состояния:

$$P = (\gamma-1)\rho E + \frac{P_{\mathrm{ad}}^0}{\rho_0}\rho - \rho g(x, e_1) + \\ + TS\rho + n\rho\mu + RnT\rho, \tag{4}$$

где γ – показатель адиабаты, P_{ad}^0 – начальное давление по адиабате, ρ_0 – плотность, g – гравитационная постоянная, e_1 = 1, 0, 0, μ – химический потенциал;

$$S + nS + n\left(\frac{d\mu_0(T)}{dT} + R\ln\left(\frac{nT\rho^2}{n_0 T_0 \rho_0^2}\right)\right) = 0, \tag{5}$$

где μ_0 – химический потенциал на входе, T_0 – температура, n_0 – приведенное количество активной компоненты.

Основная гипотеза – механизмом ламинарно-турбулентного перехода в процессе горения при накачке кинетической энергии является диффузионное расслоение, которое реализуется в одномерном случае полосчатой структурой перемежения слоев с большими (турбулизированные слои) и малыми градиентами (ламинарные слои) переменных. Увеличение энтропии системы при переходе от ламинарного состояния к турбулентному представим в форме энтропии смешения удельных объемов (слоев идеальной смеси), имеющих разные значения гидродинамической составляющей энтальпии, работы против силы тяжести, энергетической составляющей процесса горения и составляющей, обусловленной сжимаемостью.

ТУРБУЛИЗАЦИЯ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ. НАКАЧКА

Для вибрационного горения за меру деградации процесса ламинарно-турбулентным переходом естественно взять отношение плотности энергии завихренности H_{M} к плотности кинетической энергии (меры деградации ламинарного процесса горения):

$$h = \frac{\rho H_{\mathrm{M}}}{\frac{1}{2}\rho U^2},$$

где индекс M означает многообразие локального равновесия. При этом учитываем энергетическое влияние

гравитации на ламинарно-турбулентный переход в процессе горения. Для конструирования фазового перехода 2-го рода прежде всего необходимо построить аналог потенциала Ландау – Гинзбурга (удельную свободную энергию Гиббса). Исследуем возможность распространения теории неравновесных фазовых переходов в форме теории спинодального распада Кана – Хилларда на ламинарно-турбулентный переход процесса горения при накачке кинетической энергии. Условие срыва с многообразия локального равновесия формулируется в терминах меры деградации ламинарного процесса горения. Перейдем к новым переменным. По аналогии с лазерной терминологией Хакена [15] введем накачку:

$$\xi = \frac{(\gamma-1)\rho E}{\rho \tilde{U}^2}, \qquad (6)$$

где $\tilde{U}$ – внутренняя энергия.

Переменную ламинарно-турбулентного перехода, обозначим как

$$h = \frac{H_{\text{M}}}{\rho U^2} = \xi + \nu,$$

где число вибрационной турбулизации:

$$\nu = \frac{-\rho_0 E_0 - \rho^3 g(x,e_1) + \frac{P_{\text{ad}}^0}{\rho_0}(\rho-\rho_0)}{\rho \tilde{U}^2} + \frac{\left[-T\frac{d\mu_0(T)}{dT} + \mu_0(T) - RT\right]n\rho}{\rho \tilde{U}^2},$$

где E_0 – начальная внутренняя энергия.

Энергия завихренности:

$$H_{\text{M}} = (\gamma-1)(\rho E - \rho_0 E_0) - \rho g(x,e_1) + \frac{P_{\text{ad}}^0}{\rho_0}(\rho-\rho_0) + \left[-T\frac{d\mu_0(T)}{dT} + \mu_0(T) - RT\right]n\rho =$$
$$= P_{\text{ad,g}} - P_{\text{comb}} + \left[-T\frac{d\mu_0(T)}{dT} + \mu_0(T)\right]n\rho - (\gamma-1)\rho_0 E_0 - P_{\text{ad}}^0,$$

где $P_{\text{ad,g}} = (\gamma-1)\rho E + \frac{P_{\text{ad}}^0}{\rho_0}\rho - \rho^3 \varepsilon_{\text{g}}(x,e_1)$ – давление адиабатического гидродинамического процесса в поле тяжести; $P_{\text{comb}} = RTn\rho$ – уравнение Менделеева – Клайперона.

Начальное парциальное давление $P_{\text{ad}}^0 = \text{const}$, а также $\rho_0 = \text{const}$, и начальная внутренняя энергия $E_0 = \text{const}$.

Как показано ниже, условие возбуждения турбулентности имеет вид $\nu \ll 1$. Следует заметить, что при $\nu \to 0$, чем больше U^2, тем более развитой является турбулентность (ν – аналог числа Рейнольдса).

Условие зарождения ламинарно-турбулентного перехода при вибрационном горении (обратная связь) – достаточная малость числа вибрационной турбулизации ($\nu \to 0$), если $U^2 \to \infty$. Последнее справедливо, если

$$\frac{Tn}{U^2} \to 0, \qquad (7)$$

что проверяем численным экспериментом.

ПОТЕНЦИАЛ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ $\tilde{F}(\xi, \nu)$

Ламинарно-турбулентный переход при вибрационном горении наступает при увеличении скорости пассивной компоненты на входе. Этому соответствуют фазовые переходы в системах ограниченно растворимых жидкостей с нижней критической точкой расслоения (в таких системах расслоение наступает при повышении температуры, что соответствует повышению энтальпии; в гидродинамических системах – увеличению гидродинамической составляющей полной энтальпии). Из эксперимента известно, что смесь турбулизированных и ламинарных слоев (губки в терминологии Ландау) можно считать совершенной смесью, для которой энтропия процесса ламинарно-турбулентного перехода равна:

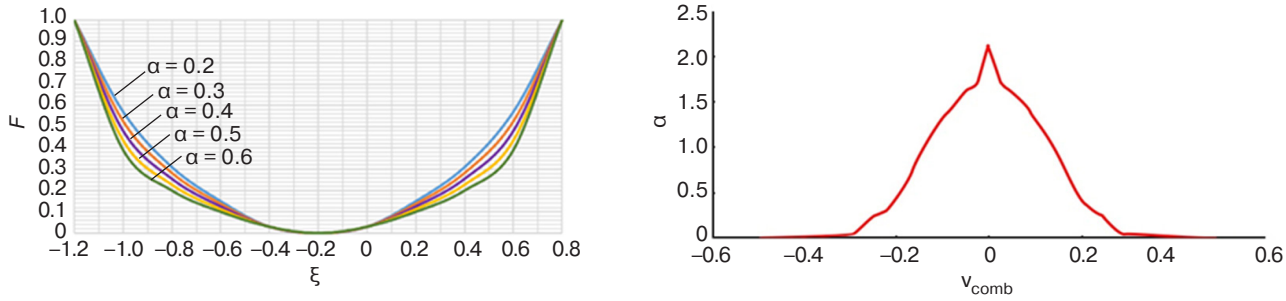
$$s = (h) = -(h^2\ln(h^2) + (1-h^2)\ln(1-h^2)), \qquad (8)$$

$$h = \xi + \nu,\ \nu \to 0, \text{ если } |U| \to \infty. \qquad (9)$$

Распределение h представляет избыточную энтальпию неоднородной термодинамической системы по отношению к однородной. Назовем h^2 и s – безразмерными энтальпией и энтропией процесса ламинарно-турбулентного перехода соответственно. Безразмерную свободную энергию Гиббса G процесса ламинарно-турбулентного перехода зададим в форме

$$F(\xi;\alpha,\nu_{\text{comb}}) = h_{\text{comb}}^2 - \alpha(\nu_{\text{comb}})h_{\text{comb}}^2 s(h_{\text{comb}}^2), \qquad (10)$$

представляющей собой аналог уравнения Гиббса – Гельмгольца $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, где роль интенсивной переменной T (температуры) играет параметр $\alpha(\nu_{\text{comb}})h_{\text{comb}}^2$, отражающий связь между температурой и энтальпией H, обусловленную энергоемкостью среды (аналог теплоемкости); α – параметр на расчетном интервале; ν_{comb} – число турболизации при накачке тепла; h_{comb} – расчетная



(а) (б)

Рис. 1. (а) Графики потенциала $F(\xi; \alpha; v_{comb})$ при $v = 0.2$ и разных значениях $\alpha = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0{,}6$, (б) зависимость $\alpha(v_{comb})$

энтальпия. Здесь функция $\alpha(v_{comb})$ определяется графиком, показанным на рис. 1б. На рис. 1а приведены графики потенциала $F(\xi;\alpha,v_{comb})$ при $v = 0.2$ и разных значениях α.

Проведем по [13] коррекцию потенциала $F(\xi;\alpha,v_{comb})$:

1) для $-1 < v_{comb} \le 0$, $-1 + |v| < \xi < 1 + |v|$ положим:

$$\tilde{F}(\xi, v_{comb}) = \begin{cases} F(\xi, v_{comb}), & 0 \le \xi < 1 + |v_{comb}|, \\ \gamma_-(h^2(\xi) - h^2(0) + F(0, v_{comb})), & \xi < 0. \end{cases} \quad (11)$$

Константу γ_- находим из условия

$$2\gamma_- v = \frac{d}{d\xi} F(0, v) = 2v(1 + 2\alpha v^2 \ln(v^2) + \alpha(1 - 2\alpha v^2)\ln(1 - v^2))$$

или

$$\gamma_- = (1 + 2\alpha v^2 \ln(v^2) + \alpha(1 - 2v^2)\ln(1 - v^2)).$$

2) для $0 < v < 0.5$, $-1 - v < \xi < 1 - v$

$$\tilde{F}(\xi, v_{comb}) = \begin{cases} F(\xi, v_{comb}), & -v_{comb} \le \xi < 1 - v_{comb}, \\ \gamma_+ g_1(\xi), & \xi < 1 - v. \end{cases}$$

Константу γ_+ находим из условия

$$\gamma_+ g''_1(-v_{comb}) = F''(-v_{comb}, -v_{comb}).$$

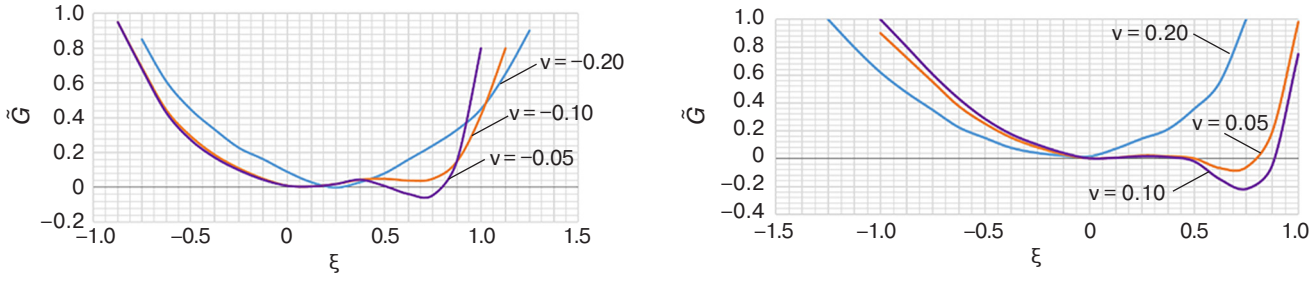
Здесь

$$g_1(\xi, v) = h^2(1 + \alpha(1 - h^2)^6 \ln(1 - h^2)).$$

Графики потенциала ламинарно-турбулентного перехода показаны на рис. 2а и 2б.

УРАВНЕНИЕ СРЫВА С МНОГООБРАЗИЯ ЛОКАЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ (НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЛАМИНАРНОГО ПРОЦЕССА ПРИБЛИЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ)

Будет показано, что накачка кинетической энергией приводит к избыточной энергии ламинарного процесса приближения локального равновесия и вызывает его неустойчивость. Последнее выражается либо резонансом, либо срывом с многообразия локального равновесия, которое имеет характер турбулизации процесса. Через турбулизацию процесса «сбрасывается» избыток энергии, порожденный накачкой кинетической энергией. Опишем математическую модель турбулизации процесса.



(а) (б)

Рис. 2. Графики потенциала $\tilde{F}(\xi; v)$ для значений v: (а) −0.20, −0.10, −0.05, (б) 0.05, 0.10, 0.20

Для моделирования срыва с многообразия локального равновесия, деградации ламинарного процесса горения при нагреве смеси в фазовом пространстве безразмерных переменных $(\tilde{E},\tilde{u}_1,\tilde{u}_2,\tilde{\rho},\tilde{T},\tilde{n})$ надо перейти к новым переменным $(\xi,\tilde{u}_1,\tilde{u}_2,\tilde{\rho},\tilde{T},\tilde{n})$, а именно, перейти к накачке ξ, как переменной ламинарно-турбулентного перехода. Уравнения

$$\rho\frac{d}{d\tilde{t}}\tilde{E}+\tilde{P}\widetilde{\operatorname{div}}\tilde{U}=0;\ (\gamma-1)\tilde{E}=\xi\tilde{U}^2 \qquad (12)$$

позволяют получить для накачки:

$$\tilde{\rho}\tilde{U}^2\frac{d}{d\tilde{t}}\tilde{E}+2\tilde{\rho}\tilde{U}\xi\frac{d}{d\tilde{t}}\tilde{U}=\tilde{\rho}\frac{d}{d\tilde{t}}(\tilde{U}^2\xi)=-(\gamma-1)\tilde{P}\widetilde{\operatorname{div}}\tilde{U},$$

где $\tilde{P}$ – давление, $d\tilde{t}$ – дифференциал по температуре.

Отсюда: $\tilde{\rho}\frac{d}{d\tilde{t}}\xi+\frac{2\tilde{\rho}\xi}{\tilde{U}}\frac{d}{d\tilde{t}}\tilde{U}+\frac{(\gamma-1)\tilde{P}}{\tilde{U}^2}\widetilde{\operatorname{div}}\tilde{U}=0.$

Здесь

$$\frac{d}{d\tilde{t}}\tilde{U}=\frac{1}{\tilde{\rho}}\frac{d}{d\tilde{t}}(\tilde{\rho}\tilde{U})-\frac{1}{\tilde{\rho}}\tilde{U}\frac{d}{d\tilde{t}}\tilde{\rho}=$$
$$=\frac{1}{\tilde{\rho}}[-\partial_{\tilde{x}}((1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}\tilde{u}_2^2)-\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}+\tilde{\varepsilon}_g(1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}-$$
$$-\partial_{\tilde{x}}(c_0\tilde{n}\tilde{\rho}\tilde{u}_1^2)-\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}+\tilde{\varepsilon}_g c_0\tilde{n}\tilde{\rho}]+\frac{1}{\tilde{\rho}}\tilde{U}\partial_{\tilde{x}}(\tilde{\rho}\tilde{U}).$$

Окончательно:

$$\tilde{\rho}\frac{d}{dt}\xi-\frac{2\xi}{\tilde{U}}[\partial_{\tilde{x}}((1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}\tilde{u}_2^2)+$$
$$+\partial_{\tilde{x}}(c_0\tilde{n}\tilde{\rho}\tilde{u}_1^2)+2\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}-\tilde{\varepsilon}_g\tilde{\rho}]+$$
$$+2\xi\partial_{\tilde{x}}(\tilde{\rho}\tilde{U})+\frac{(\gamma-1)\tilde{P}}{\tilde{U}^2}\widetilde{\operatorname{div}}\tilde{U}=0.$$

Теперь регуляризуем вязкостью уравнения для импульсов и уравнение неразрывности (гидродинамики) вязкостью:

$$\partial_{\tilde{t}}\tilde{\rho}+\partial_{\tilde{x}}(\tilde{\rho}\tilde{U})=\tilde{\varepsilon}_R\tilde{\Delta}\tilde{\rho}, \qquad (13)$$

$$\partial_{\tilde{t}}((1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}\tilde{u}_2)+\partial_{\tilde{x}}((1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}\tilde{u}_2^2)+\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}=$$
$$=\tilde{\varepsilon}_g(1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}+\tilde{\varepsilon}_R\tilde{\Delta}\tilde{u}_2,$$

$$\partial_{\tilde{t}}(c_0\tilde{n}\tilde{\rho}\tilde{u}_1)+\partial_{\tilde{x}}(c_0\tilde{n}\tilde{\rho}\tilde{u}_1^2)+\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}=$$
$$=\tilde{\varepsilon}_g c_0\tilde{n}\tilde{\rho}+\tilde{\varepsilon}_R\tilde{\Delta}\tilde{u}_1,$$

где $\tilde{U}=c_0\tilde{n}\tilde{U}_1+(1-c_0\tilde{n})\tilde{U}_2$ – средняя скорость смеси, $\mathrm{Re}=1/\tilde{\varepsilon}_R$, $\mathrm{Re}=\eta_D/(U_*L_*)=\eta_D/(\rho_*U_*L_*)$ – число Рейнольдса однородного состояния $\rho_*,n_*,T_*,u_1^*,u_2^*$, η_D – динамическая вязкость в числе Рейнольдса, $U_*=c_*n_*u_1^*+(1-c_*n_*)U_*$ – характерная скорость однородной смеси, L_* – характерный размер среды, $\tilde{\varepsilon}_R$ – динамическая вязкость.

От уравнения для внутренней энергии перейдем к уравнению для накачки, в котором введем знакопеременную диффузию Кана (оператор Кана переменной диффузии):

$$\tilde{\rho}\frac{d}{d\tilde{t}}\xi-\frac{2\xi}{\tilde{U}}[\partial_{\tilde{x}}((1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}\tilde{u}_2^2)+$$
$$+\partial_{\tilde{x}}(c_0\tilde{n}\tilde{\rho}\tilde{u}_1^2)+2\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}+\tilde{\varepsilon}_g\tilde{\rho}]+2\xi\partial_{\tilde{x}}(\tilde{\rho}\tilde{U})+ \qquad (14)$$
$$+\frac{(\gamma-1)\tilde{P}}{\tilde{U}^2}\widetilde{\operatorname{div}}\tilde{U}=\partial_{\tilde{x}}\left(\frac{\tilde{D}}{\tilde{T}}\partial_{\tilde{x}}\left(F(\xi,\nu)-\tilde{\varepsilon}_K^2\partial_{\tilde{x}}^2\xi\right)\right),$$

где ε_K – знакопеременная диффузия Кана, $\tilde{D}=D/(\rho_*U_*L_*T_*)$, D – коэффициент подвижности, а потенциал F в этом случае

$$F(\xi,\nu)=\partial_\xi\tilde{G}(\xi,\nu).$$

Добавим уравнения кинетики для температуры и приведенного количества вещества $\tilde{n}$. Окончательно получаем модель турбулизации вибрационного горения в переменных гидродинамики, кинетики и накачки:

$$\partial_{\tilde{t}}\tilde{\rho}+\partial_{\tilde{x}}(\tilde{\rho}\tilde{U})=\tilde{\varepsilon}_R\tilde{\Delta}\tilde{\rho}, \qquad (15)$$

$$\partial_{\tilde{t}}((1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}\tilde{u}_2)+\partial_{\tilde{x}}((1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}\tilde{u}_2^2)+\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}=$$
$$=\tilde{\varepsilon}_g(1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}+\tilde{\varepsilon}_R\tilde{\Delta}\tilde{u}_2,$$

$$\partial_{\tilde{t}}(c_0\tilde{n}\tilde{\rho}\tilde{u}_1)+\partial_{\tilde{x}}(c_0\tilde{n}\tilde{\rho}\tilde{u}_1^2)+\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}=$$
$$=\tilde{\varepsilon}_g c_0\tilde{n}\tilde{\rho}+\tilde{\varepsilon}_R\tilde{\Delta}\tilde{u}_1,$$

$$\tilde{\rho}\tilde{c}\frac{d}{d\tilde{t}}\tilde{T}=\partial_{\tilde{x}}(\tilde{\lambda}\partial_{\tilde{x}}\tilde{T})+\tilde{T}\tilde{S}\tilde{W}(\tilde{n},\tilde{T}), \qquad (16)$$

$$\tilde{\rho}\frac{d}{d\tilde{t}}\tilde{n}=\partial_{\tilde{x}}(\tilde{\rho}\tilde{D}\partial_{\tilde{x}}\tilde{n})-\tilde{W}(\tilde{n},\tilde{T}),$$

$$\tilde{W}=\tilde{k}_0\tilde{\rho}\tilde{n}^\beta e^{-\frac{\tilde{E}_*}{RT}}, \qquad (17)$$

$$\tilde{\rho}\frac{d}{d\tilde{t}}\xi-\frac{2\xi}{\tilde{U}}[\partial_{\tilde{x}}((1-c_0\tilde{n})\tilde{\rho}\tilde{u}_2^2)+$$
$$+\partial_{\tilde{x}}(c_0\tilde{n}\tilde{\rho}\tilde{u}_1^2)+2\partial_{\tilde{x}}\tilde{P}+\tilde{\varepsilon}_g\tilde{\rho}]+2\xi\partial_{\tilde{x}}(\tilde{\rho}\tilde{U})+ \qquad (18)$$
$$+\frac{(\gamma-1)\tilde{P}}{\tilde{U}^2}\widetilde{\operatorname{div}}\tilde{U}=\partial_{\tilde{x}}\left(\frac{\tilde{D}}{\tilde{T}}\partial_{\tilde{x}}[\hat{F}(\xi,\nu)-\hat{\varepsilon}_K^2\partial_{\tilde{x}}^2\xi]\right),$$

$$\tilde{P} = \tilde{P}_{\text{ad,g}} + \tilde{P}_{\text{comb}} + \left(-\tilde{T}\frac{d\tilde{\mu}_0(\tilde{T})}{d\tilde{T}} + \tilde{\mu}_0(\tilde{T}) \right)\tilde{n}\tilde{\rho}, \quad (19)$$

$$\tilde{S} = -\left(\frac{d}{d\tilde{T}}\tilde{\mu}_0(\tilde{T}) + \ln\left(\frac{\tilde{\rho}^2\tilde{T}\tilde{n}}{\tilde{\rho}_0^2\tilde{T}_0\tilde{n}_0} \right) \right)\tilde{n}.$$

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ МОДЕЛИ (15)–(19)

Для установления возможности турбулизации процесса горения проведем численные эксперименты модели (15)–(19) на отрезке $\tilde{x} \in [0,1]$ с краевыми условиями управления скоростью накачки кинетической энергии:

$$\tilde{u}_2|_{\tilde{x}=0} = \tilde{u}_2^0(1+V\tilde{t})\partial_{\tilde{x}}\tilde{\rho}|_{\tilde{x}=0} = \partial_{\tilde{x}}\tilde{\rho}|_{\tilde{x}=1} =$$
$$= \partial_{\tilde{x}}\tilde{u}_1|_{\tilde{x}=0} = \partial_{\tilde{x}}\tilde{u}_1|_{\tilde{x}=1} = \partial_{\tilde{x}}\tilde{T}|_{\tilde{x}=0} = \partial_{\tilde{x}}\tilde{T}|_{\tilde{x}=1} = 0,$$
$$\partial_{\tilde{x}}\tilde{u}_2|_{\tilde{x}=1} = \partial_{\tilde{x}}\tilde{n}|_{\tilde{x}=0} = \partial_{\tilde{x}}\tilde{n}|_{\tilde{x}=1} = 0,$$
$$\partial_x\xi|_{x=0} = \partial_x\xi|_{x=1} = \partial_x\mu|_{x=0} = \partial_x\mu|_{x=1},$$

(где $\mu = \hat{F}_{\text{comb}}(\xi,\nu) - \hat{\varepsilon}_{\text{K}}^2\partial_{\tilde{x}}^2\xi$, $\hat{F}_{\text{comb}}$ – свободная энергия, полученная в результате расчета) и начальными условиями, моделирующими в одномерном случае впрыскивание из форсунки горючей компоненты двухкомпонентной смеси:

$$\tilde{\rho}|_{\tilde{t}=0} = \tilde{\rho}_0 = 1,\ \tilde{u}_1|_{\tilde{t}=0} = \tilde{u}_1^0 = 0.2,$$
$$\tilde{u}_2|_{\tilde{t}=0} = \tilde{u}_2^0 = 0.2,\ \tilde{T}|_{\tilde{t}=0} = \tilde{T}_0 = 10,$$

$\tilde{E}_* = 100$. Начальные данные для накачки $\xi_0 = \text{const}$ из зоны лабильности потенциала $\hat{F}_{\text{comb}}(\xi,\nu_\upsilon)$ (индекс υ – турбулизация по скорости):

$$\tilde{\varepsilon}_{\text{K}} = 0.04,\ \tilde{\varepsilon}_{\text{g}} = 0.01.$$

Пример 1 (рис. 3а–3з). Снятие резонанса турбулизацией (далеко от резонанса), для $j = 1$ в формуле для стандартного химического потенциала:

$$\tilde{\mu}_0(\tilde{T}) = \tilde{T}_0\left[B_* - (R + A_*)\frac{\tilde{T}^j}{\tilde{T}_0^j} \right], \quad (20)$$

где $\tilde{\mu}_0(\tilde{T})$ – химический потенциал; $\tilde{T}_0$ – начальная температура; $\tilde{T}, B_*, A_*$ – постоянные; R – универсальная газовая постоянная.

Базовые параметры турбулизации вибрационного горения: $u_1(0) = u_2(0) = 10$, $\xi(0) = 0.2$, $\rho(0) = 1$, сечения на всех представленных ниже графиках $t = 0.005, 0.010, 0.025, 0.035, 0.050, 0.065, 0.125$; $T(0) = 10$.

Как видно на рис. 3а, б, давление растет, энтропия падает, т.е. дефлаграция переходит в детонацию при подключении турбулизации. Растут температура и плотность.

Пример 2 (рис. 4а–4к). Снятие резонанса турбулизацией (для критических значений $A_* + R = 3$), для $j = 4$ в (20). Рассматриваем счет для базовых параметров турбулизации вибрационного горения: $u_1(0) = u_2(0) = 10$, $\xi(0) = 0.2$, $\rho(0) = 1.5$. Для всех графиков ниже сечения $t = 0, 0.005, 0.010, 0.025, 0.035, 0.050, 0.065, 0.125$. Первый вариант (базовый): $T(0) = 5$. Существенно растут давление и энтропия. Имеется обширная зона детонационного режима вибрационного горения (без турбулизации была узкая зона детонационного горения вблизи резонанса [3]). Растет внутренняя энергия, но относительно накачиваемой кинетической энергии она уменьшается ($\xi \to 0$). Часть накачиваемой кинетической энергии переходит в теплоту.

Пример 3 (рис. 5а–5к). Снятие резонанса для $j = 4$ (20) (вдали от критических параметров резонанса), при низких температурах, при базовых параметрах турбулизации $u_1(0) = u_2(0) = 12$; $\xi(0) = 0.2$, $\rho(0) = 1.5$; сечения $\tilde{t} = 0, 0.005, 0.010, 0.025, 0.035, 0.050, 0.065, 0.125$. Здесь $T(0) = 0.8$. Давление и энтропия падают. Растет внутренняя энергия, но относительно накачиваемой кинетической энергии она уменьшается ($\xi \to 0$). Часть кинетической энергии уходит в теплоту (растут $\tilde{T}$ и $\tilde{T}\tilde{S}$).

Пример 4 (рис. 6а–6к). Снятие резонанса турбулизацией (вблизи критических параметров резонанса) для $j = 4$ в (20), при низких температурах, $u_1(0) = u_2(0) = 8$, $\xi(0) = 0.2$, $\rho(0) = 1.5$, сечения $\tilde{t} = 0, 0.005, 0.010, 0.025, 0.035, 0.050, 0.065, 0.125$; $T(0) = 0.8$.

Энтропия падает, а давление растет (так же, как и до турбулизации, но значительно шире зона детонации). Растет внутренняя энергия, но относительно накачиваемой кинетической энергии она уменьшается ($\xi \to 0$). Часть накачиваемой кинетической энергии переходит в теплоту (растут внутренняя энергия $\tilde{E}$ и $\tilde{T}$).

Пример 5 (рис. 7а–7к). Перемешивание. Численный эксперимент (20) для $j = 4$, $A_* + R = 0.5$ (базовые параметры), $\tilde{\rho}|_{\tilde{t}=0} = \tilde{\rho}_0 = 1$, $\tilde{u}_1|_{\tilde{t}=0} = \tilde{u}_1^0 = 0.2$; $\tilde{u}_2|_{\tilde{t}=0} = \tilde{u}_2^0 = 0.2$; $\tilde{T}|_{\tilde{t}=0} = T_0 = 10$ – константы; $\tilde{n}|_{\tilde{t}=0} = \tilde{n}_1 = 0.5$, $\tilde{x} \in (0;0.3) \cup (0.4;0.5)$, $\tilde{n}|_{\tilde{t}=0} = 0.66$, $\tilde{x} \in (0.3;0.4)$; $E_* = 100$; $\tilde{t} = 0, 0.005, 0.010, 0.025, 0.035, 0.050, 0.065, 0.125$. начальные данные для внутренней энергии $\tilde{E}_0 = \text{const}$, $\tilde{T}_0 = 8$, $\tilde{u}_2 = 8$.

Снятие резонанса для перемешивания. С начальными условиями, моделирующими в одномерном случае впрыскивание из трех форсунок горючей компоненты двухкомпонентной смеси.

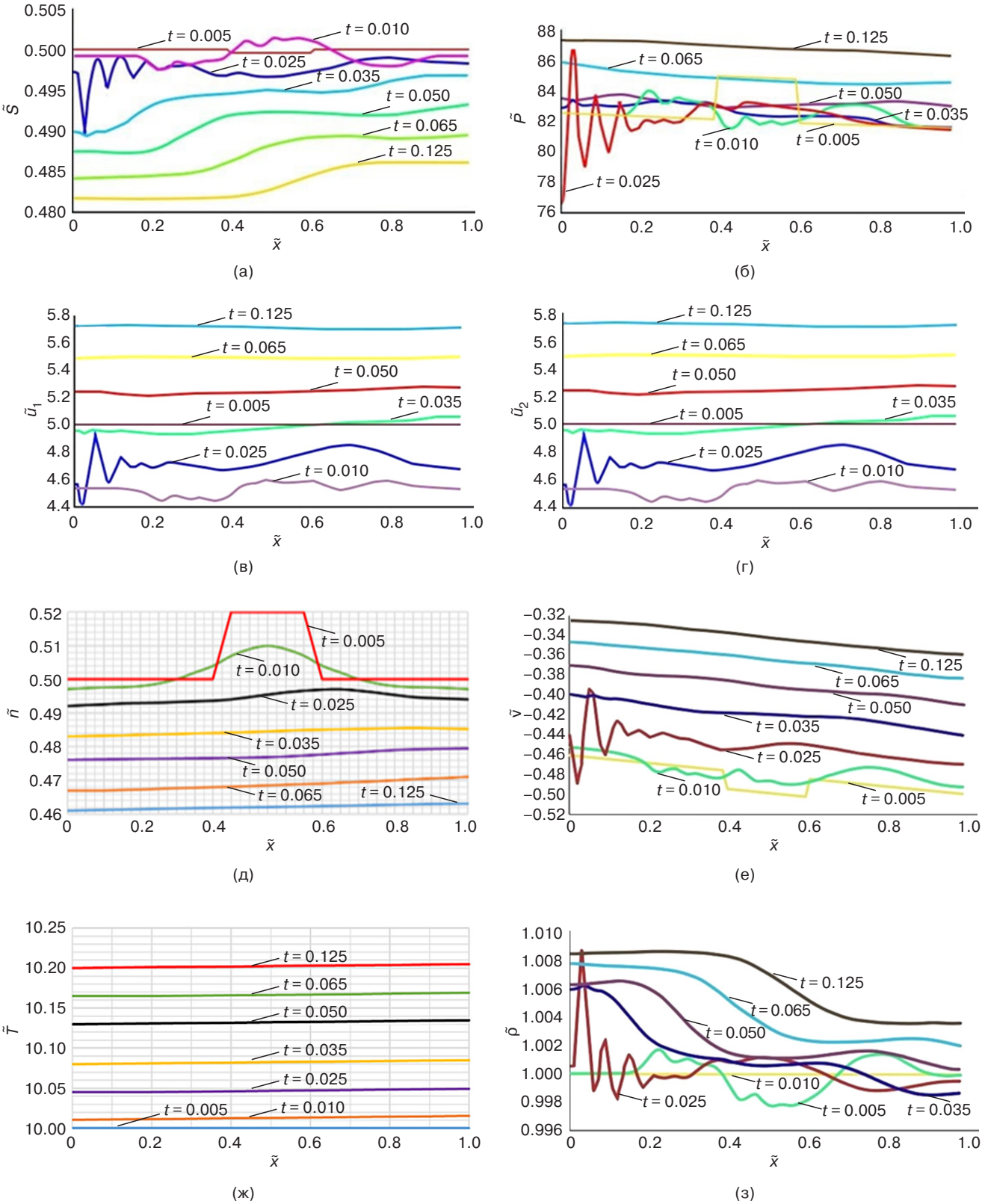


Рис. 3. Результаты численного эксперимента модели (15)–(19) на отрезке $\tilde{x} \in [0,1]$ для разных значений t: (а) $\tilde{S}$, (б) $\tilde{P}$, (в) $\tilde{u}_1$, (г) $\tilde{u}_2$, (д) приведенное количество вещества $\tilde{n}$, (е) $\tilde{v}$, (ж) $\tilde{T}$, (з) $\tilde{\rho}$

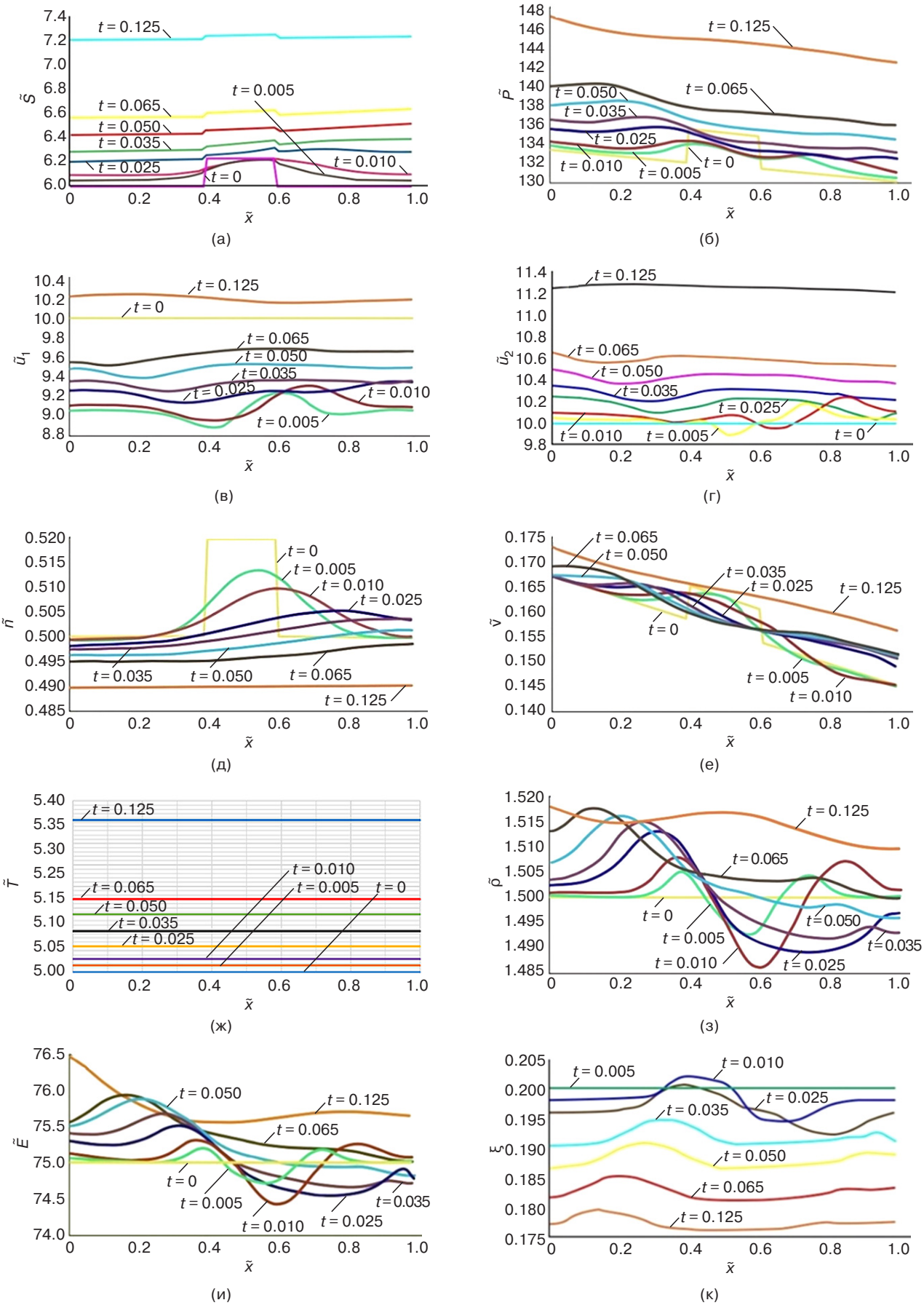
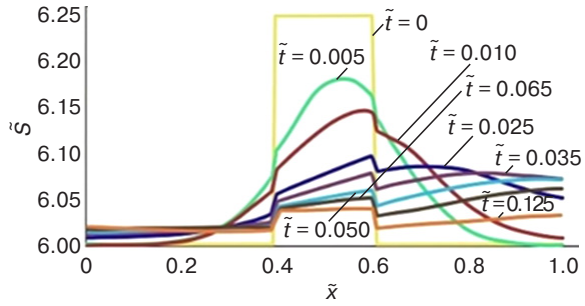
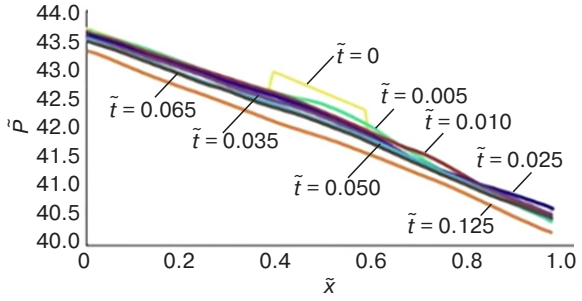


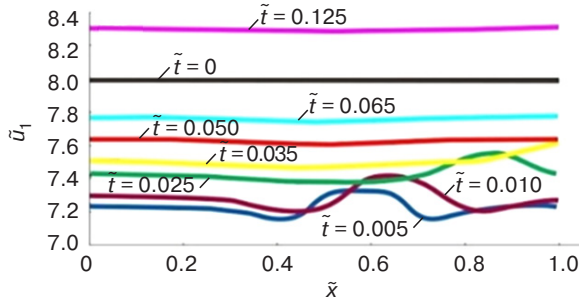
Рис. 4. Результаты расчетов для базовых параметров турбулизации вибрационного горения для разных значений t: (а) $\tilde{S}$; (б) $\tilde{P}$; (в) $\tilde{u}_1$; (г) $\tilde{u}_2$; (д) $\tilde{n}$; (е) $\tilde{v}$; (ж) $\tilde{T}$; (з) $\tilde{\rho}$; (ж) $\tilde{E}$; (к) ξ



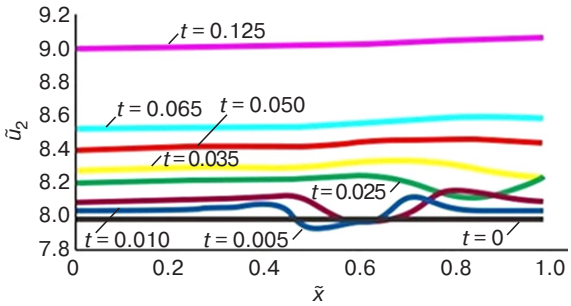
(а)



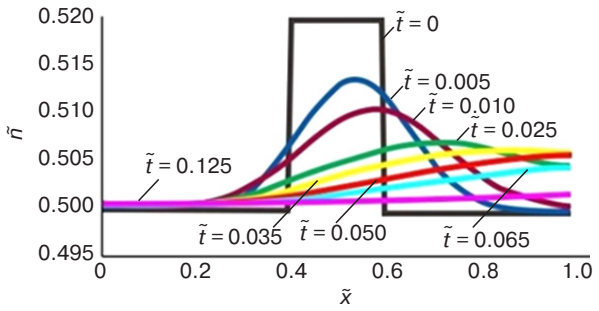
(б)



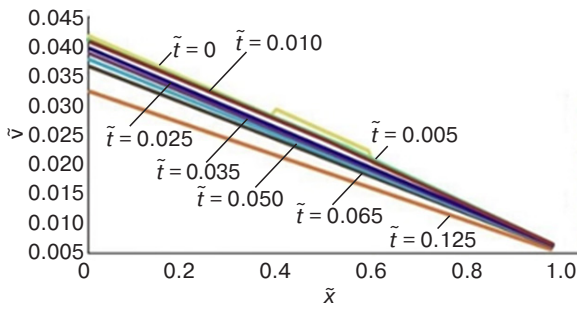
(в)



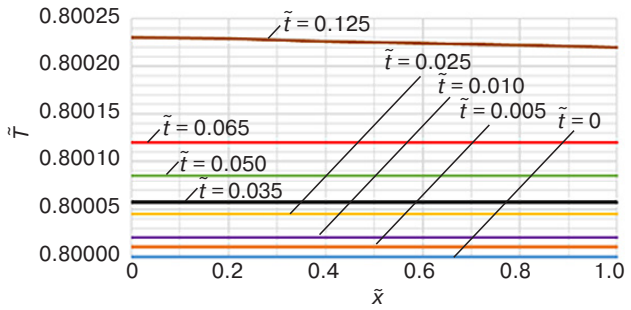
(г)



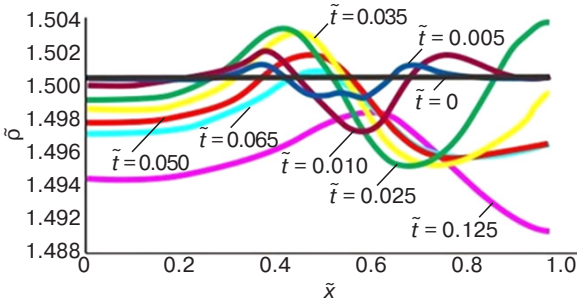
(д)



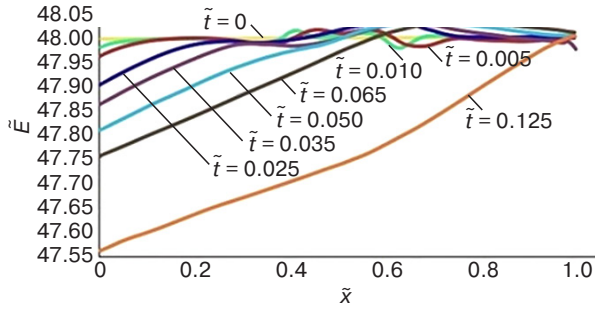
(е)



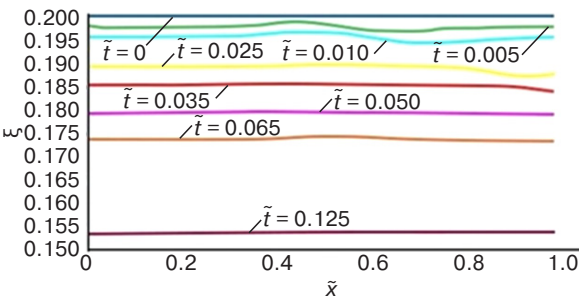
(ж)



(з)



(и)



(к)

Рис. 5. Результаты расчета по снятию резонанса для j = 4 (20) (вдали от критических параметров резонанса) при низких температурах для разных значений $\tilde{t}$: (а) $\tilde{S}$, (б) $\tilde{P}$, (в) $\tilde{u}_1$, (г) $\tilde{u}_2$, (д) $\tilde{n}$, (е) $\tilde{v}$, (ж) $\tilde{T}$, (з) $\tilde{\rho}$, (ж) $\tilde{E}$, (к) ξ

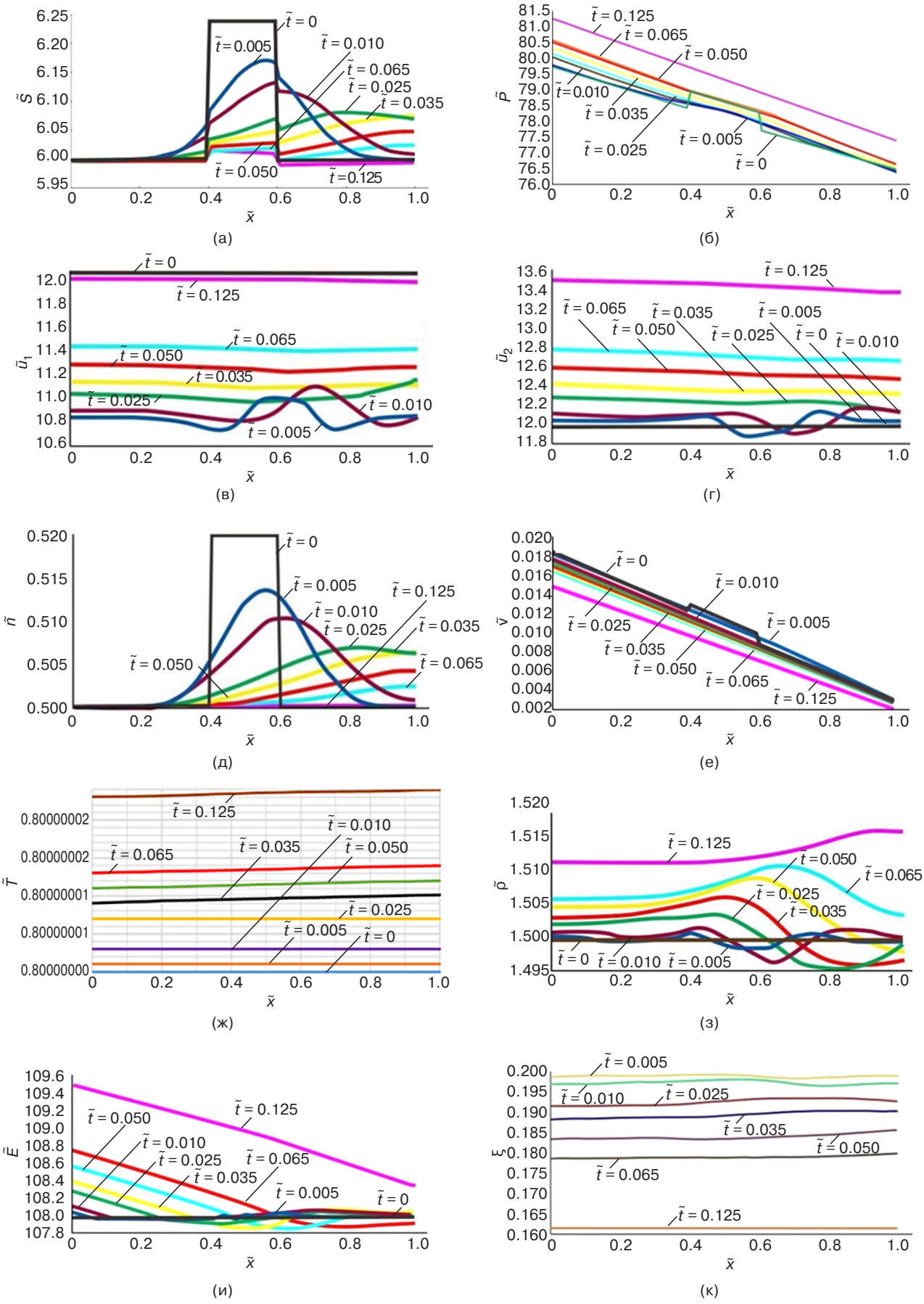


Рис. 6. Результаты расчета снятия резонанса турбулизацией (вблизи критических параметров резонанса) для $j = 4$ в (20) при низких температурах для разных значений $\tilde{t}$: (а) $\tilde{S}$, (б) $\tilde{P}$, (в) $\tilde{u}_1$, (г) $\tilde{u}_2$, (д) $\tilde{n}$, (е) $\tilde{v}$, (ж) $\tilde{T}$, (з) $\tilde{\rho}$, (ж) $\tilde{E}$, (к) ξ

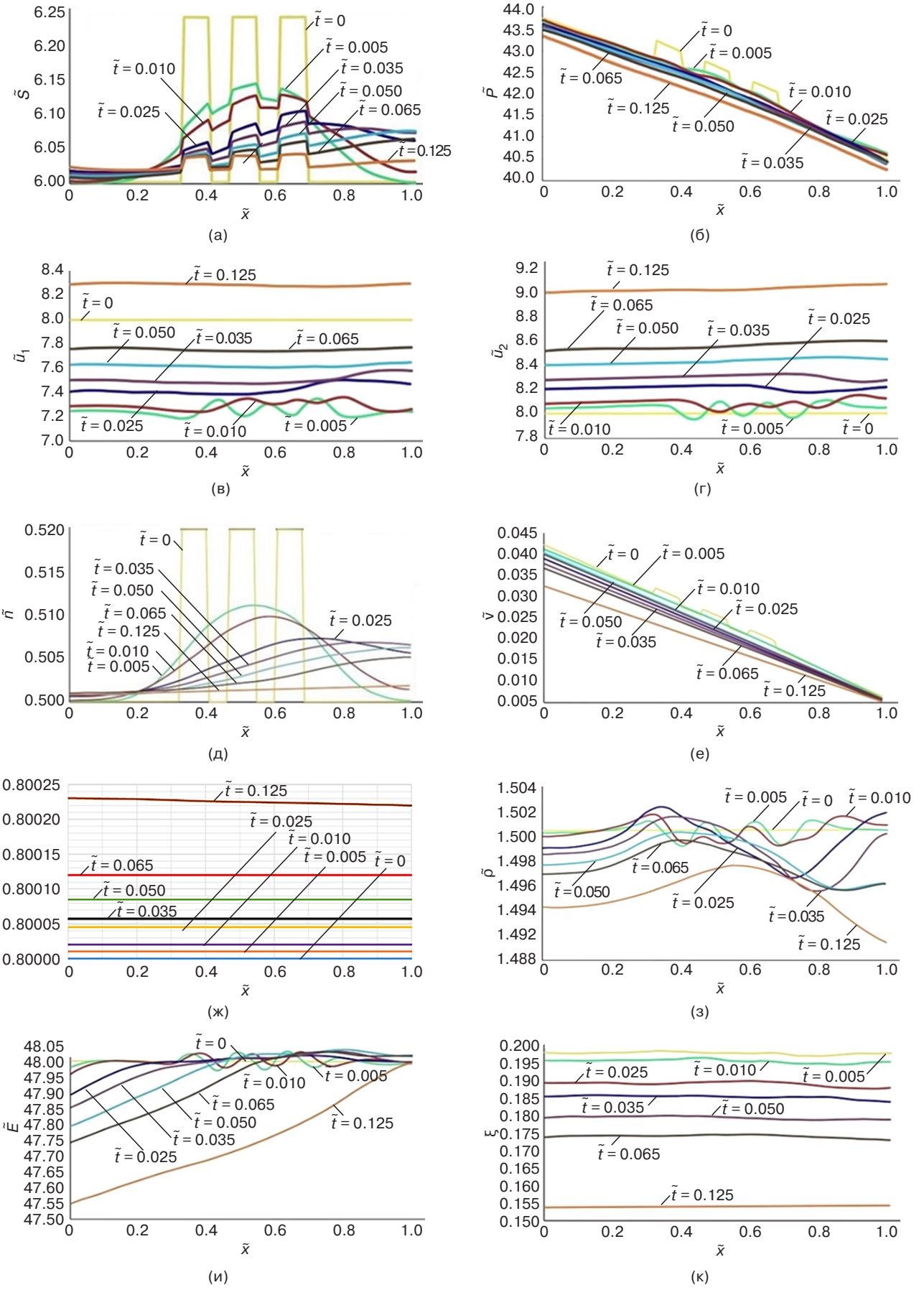


Рис. 7. Результаты численного эксперимента (20) для $j = 4$, $A_* + R = 0.5$ для разных значений $\tilde{t}$: (а) $\tilde{S}$, (б) $\tilde{P}$, (в) $\tilde{u}_1$, (г) $\tilde{u}_2$, (д) $\tilde{n}$, (е) $\tilde{v}$, (ж) $\tilde{T}$, (з) $\tilde{\rho}$, (ж) $\tilde{E}$, (к) ξ

Энтропия и давление падают (так же, как и до турбулизации). С увеличением скорости $\tilde{u}^2$ нейтральной компоненты на входе появляется режим детонационного горения. В этом численном эксперименте также возникает режим детонационного горения. Растут температура, плотность и внутренняя энергия. На характере графиков отражено влияние силы тяжести. Аналогичные результаты численного эксперимента получены для снятия резонанса турбулизацией $j = 4$ в (20) при перемешивании, с увеличением начальной скорости пассивной переменной $\tilde{u}_2^0 = 10$. С увеличением скорости нейтральной компоненты $\tilde{u}_2$ на входе при перемешивании появляется режим детонационного горения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные исследования позволяют утверждать, что термодинамический метод обеспечивает принципиальные возможности исследования эволюции системы (в данном случае стремление к расслоению на «турбулентное» и «не турбулентное» горение). Следует отметить, что использованный термодинамический анализ может только обозначить тенденции развития процесса (принципиальную возможность реализации), выбор траектории эволюции системы, но не скорость этого процесса. В тоже время этот анализ позволяет заключить, что в процессе горения существуют области устойчивости ламинарного горения, а также метастабильные и лабильные области, где ламинарное горение неустойчиво. Это не означает, что в области устойчивости не будут наблюдаться признаки турбулентности при ее развитом состоянии. Просто в этих областях диффузия возмущений будет их размывать, тогда как в областях неустойчивости процесс «отрицательной» (кановской) диффузии будет их концентрировать. Можно предположить, что области неустойчивости гомогенной системы являются источниками возмущений, а области устойчивости – стоками. Все эти предположения проверены путем численного эксперимента с использованием математической модели, приведенной выше. Математическая модель ламинарно-турбулентного перехода в процессе горения, как аналога неравновесного фазового перехода, может усложняться, начиная с исходной термодинамической модели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проведено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от 23 апреля 2024 г.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out within the framework of the Agreement on Federal Support for Major Scientific Projects in Priority Areas of Scientific and Technological Development No. 075-15-2024-527 dated April 23, 2024.

Вклад авторов

Е.В. Радкевич – разработка и математическая интерпретация модели горения.

М.Е. Ставровский – описание моделей критических явлений.

О.А. Васильева – численный эксперимент моделей.

Н.Н. Яковлев – натурный эксперимент, получение данных для моделей.

М.И. Сидоров – проверка адекватности моделей и описания процессов.

Authors' contributions

E.V. Radkevich – development and mathematical interpretation of the combustion model.

M.E. Stavrovsky – description of models of critical phenomena.

O.A. Vasilyeva – numerical experiment of models.

N.N. Yakovlev – full-scale experiment, obtaining data for models.

M.I. Sidorov – verification of the adequacy of models and description of processes.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cahn J.W., Hillard J.E. Free energy of a nonuniform system. 1. Interfacial free energy *J. Chem. Phys*. 1958;28(2):258–271. https://doi.org/10.1063/1.1744102
2. Cahn J.W. Spinodal decomposition. *Acta Metall*. 1961;9(9):795–811. https://doi.org/10.1016/0001-6160(61)90182-1
3. Дебай П. *Избранные труды*. Л.: Наука; 1987. 559 с.
4. Радкевич Е.В., Лукашев Е.А., Яковлев Н.Н., Васильева О.А., Сидоров М.И. *Введение в обобщенную теорию неравновесных фазовых переходов и термодинамический анализ задач механики сплошной сред*ы. М.: Изд-во МГУ; 2019. 342 с.
5. Раушенбах Б.В. *Вибрационное горение*. М.: Физматгиз; 1961. 500 с.
6. Радкевич Е.В., Васильева О.А., Сидоров М.И., Ставровский М.Е. О резонансе Раушенбаха. *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика, Механика*. 2021;3:54–65.

7. Радкевич Е.В., Яковлев Н.Н., Васильева О.А. Вопросы математического моделирования вибрационного горения. *Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления*. 2020;495:69–73. https://doi.org/10.31857/S2686954320060144
8. Radkevich E.V., Yakovlev N.N., Vasil'eva O.A. Questions and problems of mathematical modeling qua nonequilibrium of combustion processes. *Eurasian J. Math. Computer Appl*. 2020;8(4):31–68. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2020-8-4-31-68
9. Шиплюк А.Н., Бунтин Д.А., Маслов А.А., Чокани Н. Нелинейные механизмы начальной стадии ламинарно-турбулентного перехода при гиперзвуковых скоростях. *Прикладная механика и техническая физика.* 2003;44(5):64–71.
10. Лукашевич С.В., Морозов С.О., Шиплюк А.Н. Исследование стабилизации высокоскоростного пограничного слоя с помощью пористых покрытий (обзор). *Прикладная механика и техническая физика.* 2023;64(4):27–45. https://doi.org/10.15372/PMTF202215169
11. Morozov S.O., Lukashevich S.V., Shiplyuk A.N. Hypersonic Boundary Layer Instability and Control by Passive Porous Coatings. In book: Sherwin S., Schmid P., Wu X. (Eds.). *IUTAM Laminar-Turbulent Transition. IUTAM Bookseries*. Springer; 2023. V. 38. P. 613–619. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67902-6_53
12. Радкевич Е.В., Васильева О.А., Яковлев Н.Н., Сидоров М.И., Ставровский М.Е. *Математическое моделирование детонационного горения*. М.: Типография «Эко-Пресс»; 2024. 200 с.
13. Зельдович Я.Б., Баренблат Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. *Математическая теория горения и взрыва*. М.: Наука; 1980. 472 с.
14. Скрипов В.П., Скрипов А.В. Спинодальный распад (фазовый переход с учетом неустойчивых состояний). *Успехи физических наук.* 1979;128(2):193–231. https://doi.org/10.3367/UFNr.0128.197906a.0193
15. Хакен Дж. *Синергетика*: пер. с англ. М.: Мир; 1980. 405 с.

REFERENCES

1. Cahn J.W., Hillard J.E. Free energy of a nonuniform system. 1. Interfacial free energy *J. Chem. Phys*. 1958;28(2):258–271. https://doi.org/10.1063/1.1744102
2. Cahn J.W. Spinodal decomposition. *Acta Metall*. 1961;9(9):795–811. https://doi.org/10.1016/0001-6160(61)90182-1
3. Debye P. *Izbrannye trudy* (*Collected Papers*). Leningrad: Nauka; 1987. 559 p. (in Russ.).
4. Radkevich E.V., Lukashev E.A., Yakovlev N.N., Vasil'eva O.A., Sidorov M.I. *Vvedenie v obobshchennuyu teoriyu neravnovesnykh fazovykh perekhodov i termodinamicheskii analiz zadach mekhaniki sploshnoi sredy* (*Introduction to the Generalized Theory of Nonequilibrium Phase Transitions and Thermodynamic Analysis of Continuum Mechanics Problems*). Moscow: Moscow University Press; 2019. 342 p. (in Russ.).
5. Raushenbakh B.V. *Vibratsionnoe gorenie* (*Vibrational Combustion*). Moscow: Fizmatgiz; 1961. 500 p. (in Russ.).
6. Radkevich E.V., Vasil'eva O.A., Sidorov M.I., et al. On the Raushenbakh Resonance. *Moscow Univ. Mech. Bull*. 2021;76(3):65–77. https://doi.org/10.3103/S0027133021030055
[Original Russian Text: Radkevich E.V., Vasil'eva O.A., Sidorov M.I., Stavrovskii M.E. On the Raushenbakh Resonance. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika, Mekhanika*. 2021;3:54–65 (in Russ.).]
7. Radkevich E.V., Yakovlev N.N., Vasil'eva O.A. Mathematical Modeling of Vibrational-Combustion. *Dokl. Math.* 2020;102(3):505–509. https://doi.org/10.1134/S1064562420060162
[Original Russian Text: Radkevich E.V., Yakovlev N.N., Vasil'eva O.A. Mathematical Modeling of Vibrational-Combustion. *Doklady Rossiiskoi Akademii Nauk. Matematika, Informatika, Protsessy Upravleniya*. 2020;495:69–73 (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S2686954320060144]
8. Radkevich E.V., Yakovlev N.N., Vasil'eva O.A. Questions and problems of mathematical modeling qua nonequilibrium of combustion processes. *Eurasian J. Math. Computer Appl*. 2020;8(4):31–68. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2020-8-4-31-68
9. Shiplyuk A.N., Buntin D.A., Maslov A.A., et al. Nonlinear Mechanisms of the Initial Stage of the Laminar–Turbulent Transition at Hypersonic Velocities. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2003;44(5):654–659. https://doi.org/10.1023/A:1025500219183
[Original Russian Text: Shiplyuk A.N., Buntin D.A., Maslov A.A., Chokani N. Nonlinear Mechanisms of the Initial Stage of the Laminar–Turbulent Transition at Hypersonic Velocities. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika.* 2003;44(5):64–71 (in Russ.).]
10. Lukashevich S.V., Morozov S.O., Shiplyuk A.N. Investigations of high-speed boundary layer stabilization by using porous coatings (review). *J. Appl. Mech. Tech. Phys*. 2023;64(4):575–590. https://doi.org/10.1134/S002189442304003X
[Original Russian Text: Lukashevich S.V., Morozov S.O., Shiplyuk A.N. Investigations of high-speed boundary layer stabilization by using porous coatings (review). *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika.* 2023;64(4):27–45. https://doi.org/10.15372/PMTF202215169]
11. Morozov S.O., Lukashevich S.V., Shiplyuk A.N. Hypersonic Boundary Layer Instability and Control by Passive Porous Coatings. In: Sherwin S., Schmid P., Wu X. (Eds.). *IUTAM Laminar-Turbulent Transition. IUTAM Bookseries*. Springer; 2023. V. 38. P. 613–619. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67902-6_53
12. Radkevich E.V., Vasil'eva O.A., Yakovlev N.N., Sidorov M.I., Stavrovskii M.E. *Matematicheskoe modelirovanie detonatsionnogo goreniya* (*Mathematical Modeling of Detonation Combustion).* Moscow: Eco-Press; 2024. 200 p. (in Russ.).
13. Zel'dovich Ya.B., Barenblat G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* (*Mathematical Theory of Combustion and Explosion*). M.: Nauka; 1980. 472 p. (in Russ.).

14. Skripov V.P., Skripov A.V. Spinodal decomposition (phase transition via unstable states). *Phys. Usp.* 1979;22(6):389–410. https://doi.org/10.1070/PU1979v022n06ABEH005571
[Original Russian Text: Skripov V.P., Skripov A.V. Spinodal decomposition (phase transition via unstable states). *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1979;128(2):193–231 (in Russ.). https://doi.org/10.3367/UFNr.0128.197906a.0193]
15. Haken H. *Sinergetika* (*Synergetics*): transl. from Engl. Moscow: Mir; 1980. 405 p. (in Russ.).
[Haken H. *Synergetics.* Springer; 1978. 355 p.]

Об авторах

Радкевич Евгений Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, кафедра дифференциальных уравнений, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (119991, Россия, Москва, Ленинские Горы, д. 1). E-mail: evrad07@gmail.com. Scopus Author ID 6603609635, https://orcid.org/0000-0001-7904-4476

Ставровский Михаил Евгеньевич, д.т.н., профессор, кафедра промышленной логистики, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5). E-mail: stavrov@list.ru. Scopus Author ID 56766192700, ResearcherID H-6399-2017, SPIN-код РИНЦ 6166-2296, https://orcid.org/0000-0001-7144-2461

Васильева Ольга Александровна, к.ф.-м.н., доцент, кафедра прикладной математики, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) (129337, Россия, Москва, Ярославское шоссе, д. 26). E-mail: vasiljeva.ovas@ya.ru. Scopus Author ID 56966381200, SPIN-код РИНЦ 2411-9316, https://orcid.org/0000-0001-6426-2067

Яковлев Николай Николаевич, к.т.н., научный консультант, лаборатория детонации, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук» (ФИЦ ХФ РАН) (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: amntksoyuz@mail.ru. Scopus Author ID 7004647760, SPIN-код РИНЦ 2067-7668, https://orcid.org/0009-0002-8058-3586

Сидоров Михаил Игоревич, д.т.н., заместитель начальника отдела, Инжиниринговый центр мобильных решений, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: m.sidorov60@mail.ru. Scopus Author ID 57194154324, ResearcherID U-5720-2019, SPIN-код РИНЦ 6774-8834, https://orcid.org/0009-0005-5607-7589

About the Authors

Evgeny V. Radkevich, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Differential Equations, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia). E-mail: evrad07@gmail.com. Scopus Author ID 6603609635, https://orcid.org/0000-0001-7904-4476

Mikhail E. Stavrovsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University (5, 2-ya Baumanskaya ul., Moscow, 105005 Russia). E-mail: stavrov@list.ru. Scopus Author ID 56766192700, ResearcherID H-6399-2017, RSCI SPIN-code 6166-2296, https://orcid.org/0000-0001-7144-2461

Olga A. Vasilyeva, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (26, Yaroslavskoe sh., Moscow, 129337 Russia). E-mail: vasiljeva.ovas@ya.ru. Scopus Author ID 56966381200, RSCI SPIN-code 2411-9316, https://orcid.org/0000-0001-6426-2067

Nikolay N. Yakovlev, Cand. Sci. (Eng.), Scientific Consultant, Detonation Laboratory, N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences (4, Kosygina ul., Moscow, 119991 Russia). E-mail: amntksoyuz@mail.ru. Scopus Author ID 7004647760, RSCI SPIN-code 2067-7668, https://orcid.org/0009-0002-8058-3586

Mikhail I. Sidorov, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: m.sidorov60@mail.ru. Scopus Author ID 57194154324, ResearcherID U-5720-2019, RSCI SPIN-code 6774-8834, https://orcid.org/0009-0005-5607-7589

Russian Technological Journal.
2025;13(4):123–134

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

УДК 330.342.24
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-123-134
EDN XXKOTU

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Промышленные революции: от Индустрии 3.0 к Индустрии 5.0 в контексте российской экономики

Н.Н. Карпухина [@], **Е.С. Митяков**, **А.Ю. Пронин**

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

• **Поступила:** 31.07.2024 • **Доработана:** 27.01.2025 • **Принята к опубликованию:** 24.04.2025

Резюме

Цели. Цель статьи – доказать, что принципы Индустрии 5.0 являются необходимым развитием для классической модели экономического роста, предложенной Солоу. В статье модель Солоу адаптирована и расширена новыми факторами, которые учитывают технологический прогресс, социальные и экологические аспекты и в контексте российской экономики оказывают влияние на долгосрочное развитие и экономический рост.

Методы. Основные результаты работы получены с помощью сравнительного анализа отличительных особенностей Индустрии 3.0, Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0, расширенной модели Солоу и экспертного опроса для оценки факторов, влияющих на экономический рост.

Результаты. Для обоснования необходимости перехода к более перспективным моделям производства и развития выделены основные отличительные особенности Индустрии 3.0, Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0, определяемые уникальной ориентацией, технологиями, целями, подходами к работе с данными и типами интерфейсов. Установлено, что российская экономика пока недостаточно готова к вызовам Индустрии 5.0. Доказано, что принципы Индустрии 5.0 расширяют такие факторы модели экономического роста Солоу, как труд, капитал и технологический прогресс, добавляя человеческий капитал, природные ресурсы и уровень технологий. Для оценки вклада факторов в производственные процессы проведен опрос экспертов. Расширенная модель Солоу является инструментом для разработки конкретных стратегий в области экономической политики на основе анализа взаимосвязанных факторов.

Выводы. Переход к технологиям Индустрии 4.0 и последующее планирование внедрения технологий Индустрии 5.0 являются необходимыми шагами для создания инновационной и конкурентоспособной экономики. Проведенный опрос экспертов доказал разный вклад факторов в производственные процессы: уменьшение роли капитала и труда, рост значимости человеческого капитала, технологического развития и природных ресурсов в Индустрии 5.0. Такие приоритеты Индустрии 5.0 не только не противоречат экономическому росту, но и могут его усилить в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: Индустрия 3.0, Индустрия 4.0, Индустрия 5.0, технологии, сравнительный анализ, модель Солоу, человеческий капитал, цифровизация, инновационная экономика

© Н.Н. Карпухина, Е.С. Митяков, А.Ю. Пронин, 2025

Для цитирования: Карпухина Н.Н., Митяков Е.С., Пронин А.Ю. Промышленные революции: от Индустрии 3.0 к Индустрии 5.0 в контексте российской экономики. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):123–134. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-123-134, https://www.elibrary.ru/XXKOTU

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Industrial revolutions: From Industry 3.0 to Industry 5.0 in the context of the Russian economy

Natalia N. Karpukhina [@], **Evgeny S. Mityakov**, **Aleksey Yu. Pronin**

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

• **Submitted:** 31.07.2024 • **Revised:** 27.01.2025 • **Accepted:** 24.04.2025

Abstract

Objectives. The study set out to substantiate the principles of Industry 5.0 as a necessary development for the classical model of economic growth proposed by Solow. An adapted and expanded Solow model is presented that takes into account technological progress, as well as social and environmental aspects, which influence long-term development and economic growth in the context of the Russian economy.

Methods. The main results of the work are obtained through a comparative analysis of the distinctive features of Industry 3.0, Industry 4.0, and Industry 5.0 in the context of an extended Solow model and an expert survey to assess the factors influencing economic growth.

Results. In order to substantiate the necessity of transition to more promising models of production and development, the main distinguishing features of Industry 3.0, Industry 4.0, and Industry 5.0, are shown to be determined by unique orientations, technologies, objectives, approaches to working with data, and types of interfaces. The Russian economy is shown to be insufficiently prepared for the challenges of Industry 5.0. The principles of Industry 5.0 apply to such factors of the Solow economic growth model as labor, capital, and technological progress, as well as human capital, natural resources, and the current technological level. A survey of experts was conducted to assess the contribution of factors to production processes. The extended Solow model is a convenient tool for developing specific economic policy strategies based on the analysis of the interrelated factors.

Conclusions. The transition to Industry 4.0 technologies and subsequent planning for the implementation of Industry 5.0 technologies are necessary steps prior to the creation of an innovative and competitive economy. The conducted expert survey exemplified the different contributions of various factors to Industry 5.0 production processes, including a decrease in the role of capital and labor, along with a concomitant increase in the importance of human capital, technological development, and natural resources. This transition is evidenced by the presented numerical values for the Solow model coefficients for Industry 3.0, Industry 4.0, and Industry 5.0. Such Industry 5.0 priorities not only do not contradict economic growth, but can be expected to enhance it in the long term.

Keywords: Industry 3.0, Industry 4.0, Industry 5.0, technologies, comparative analysis, Solow model, human capital, digitalization, innovative economy

For citation: Karpukhina N.N., Mityakov E.S., Pronin A.Yu. Industrial revolutions: From Industry 3.0 to Industry 5.0 in the context of the Russian economy. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):123–134. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-123-134, https://www.elibrary.ru/XXKOTU

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В современной России наблюдаются два ярко выраженных направления экономического развития, которые делают ее уникальной. В период с 2000 по 2010 гг., произошло формирование «экономики знаний», ориентированной на новейшие знания, инновации и развитие информационного общества. Затем с 2010 г. активно развернулся процесс всеобщей цифровизации, который привел к развитию цифровых инноваций и усилению цифровой конкуренции [1].

Необходимо отметить, что цифровизация в России существенно отличается по отраслям. Так, по данным Министерства цифрового развития, на начало 2024 г. более 90% государственных услуг предоставлялись в электронном формате через портал Госуслуги[1]. Российский финансовый сектор всегда был лидером по внедрению цифровых технологий[2], ритейл-компании также постоянно увеличивают бюджет на информатизацию, внедряя комплексные решения[3]. В то же время уровень цифровизации промышленных предприятий существенно отличается хаотичным использованием отдельных цифровых решений. Согласно исследованию российской консалтинговой компании SBS Consulting, уровень цифровой зрелости крупных и средних компаний обрабатывающей промышленности в России составляет лишь 26.6%[4].

В настоящее время важным аспектом цифровой трансформации промышленности является использование цифровых решений: во-первых, для повышения эффективности производства и, во-вторых, для деятельности предприятия в целом, что позволяет оперативно реагировать на возникающие проблемы [2]. Поэтому многие российские предприятия промышленных отраслей критически зависимы от внедрения технологий Индустрии 4.0. А дефицит рабочей силы и необходимость повышения производительности труда еще больше обуславливают эту зависимость[4].

Хаотичное внедрение технологических решений на промышленных предприятиях, присущее Индустрии 3.0, выявило ряд ключевых проблем в контексте Индустрии 4.0: вероятное устранение фактора, связанного с человеческой деятельностью; опасность для окружающей среды; несоответствие между различными аспектами экономики, включая неэффективное производство и потребление, существенную социальную дифференциацию, социальную нестабильность и др. [3].

В настоящее время вектор развития мировой экономики и, соответственно, научных исследований меняет свое направление с роботизации и автоматизации, присущих Индустрии 4.0, на разработку социоцентрических и экологически устойчивых технологий. В центре внимания оказываются системы «человек-машина», в которых человек выступает в роли креативного участника и сотрудничает с роботами. Механистическая реальность Индустрии 4.0 с ее акцентом на роботизацию и автоматизацию постепенно меняет вектор, все больше обращаясь к гуманистическим тенденциям. Традиционные предприятия уступают место цифровой экосистеме, что открывает новые возможности для экономики, но также несет риски цифровой монополизации в виртуальных секторах [4]. В свете этих изменений становится очевидной необходимость перехода к Индустрии 5.0.

Индустрия 5.0, как новая промышленная модель, возникает за счет расширения Индустрии 4.0. Индустрия 5.0 предвещает кратное увеличение производственной эффективности и гибкости за счет автоматизации, оптимизации процессов и улучшения сотрудничества между человеком и техносферой. Вместе с угрозой потери рабочих мест в результате внедрения технологий Индустрии 4.0, Индустрия 5.0 открывает новые возможности для создания специализированных рабочих мест,

[1] Цифровизация в России: новые векторы развития в 2024 году. https://www.sostav.ru/blogs/277074/50927. Дата обращения 10.11.2024. [Digitalization in Russia: New Development Vectors in 2024. https://www.sostav.ru/blogs/277074/50927 (in Russ.). Accessed November 10, 2024.].

[2] Цифровизация финансового сектора 2024. https://generation-startup.ru/calendar/82432/. Дата обращения 10.11.2024. [Digitalization of the financial sector 2024. https://generation-startup.ru/calendar/82432/ (in Russ.). Accessed November 10, 2024.].

[3] Три тренда IT в eCommerce в 2024 году. https://www.retail.ru/rbc/pressreleases/tri-trenda-it-v-ecommerce-v-2024-godu/. Дата обращения 10.11.2024. [Three IT trends in eCommerce in 2024. https://www.retail.ru/rbc/pressreleases/tri-trenda-it-v-ecommerce-v-2024-godu/ (in Russ.). Accessed November 10, 2024.].

[4] Анализ уровня цифровизации российских предприятий обрабатывающей промышленности. https://www.tadviser.ru. Дата обращения 10.11.2024. [Analysis of the digitalization level of Russian manufacturing enterprises. https://www.tadviser.ru (in Russ.). Accessed November 10, 2024.].

связанных с управлением и обслуживанием новых технологий.

Целесообразность перехода от Индустрии 3.0 к Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 особенно актуальна для российской экономики, когда технологии становятся критическим фактором конкурентоспособности и необходимы для обеспечения технологического суверенитета страны. Индустрия 5.0 представляет собой качественно новый этап развития производственных процессов, характеризующийся акцентом на человекоцентричный подход и концепцию устойчивого развития. Внедрение инновационных технологий в этой парадигме значительно повышает производственную эффективность, что становится особенно важным в контексте демографических изменений, сокращения трудовых ресурсов и необходимости повышения уровня жизни населения. Адаптация российской экономики к данным вызовам требует комплексного анализа и разработки системных решений, что подчеркивает актуальность данного исследования.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время наблюдается значительный рост числа научных публикаций, посвященных различным аспектам Индустрии 5.0 [5]. Большинство современных работ фокусируется на глобальных проблемах устойчивого развития, здравоохранения, образования, промышленности, развития технологий и др. В современных исследованиях находят отражение различные взгляды на терминологию предметной области, вопросы о том, является ли Индустрия 5.0 новой парадигмой или очередным этапом развития Индустрии 4.0.

По мнению С. Нахаванди, Индустрия 5.0 – это видение будущего человечества. При этом производство в рамках Индустрии 5.0 сочетает в себе преимущества передовых технологий с творческими способностями и навыками решения проблем человеком, что позволяет сделать производственные процессы более эффективными и гибкими, а также снизить риск несчастных случаев и травм [6]. Автор утверждает, что пятая промышленная революция наступит, когда интеллектуальные устройства полностью интегрируются с человеческим разумом и физическим миром. Такое сотрудничество обеспечит высокую эффективность, гибкость производства и минимизацию отходов.

В работе [7] декларируется, что Индустрия 5.0 – это расширение опыта конечного потребителя за счет применения различных доступных инструментов, включая искусственный интеллект и робототехнику. В статье [8] изложен подход к проектированию, при котором люди-операторы и интеллектуальные машины образуют совместные команды.

В статье [9] авторы представляют Индустрию 5.0 как парадигму, предназначенную для преодоления глобальных социальных проблем, возникших в результате предшествующих промышленных революций. По мнению исследователей, данная парадигма базируется на идее интеллектуальной среды, ориентированной на человека, и его взаимодействии с роботизированными системами.

В работе [10] под Индустрией 5.0 понимается обновленный человекоцентричный промышленный архетип, который трансформирует процессы промышленного производства. В качестве технологий, способствующих этой трансформации, представлены искусственный интеллект, блокчейн и Интернет вещей.

В статье [11] дан обзор преимуществ взаимодействия человека и технологической среды при автоматизации производств. Авторы считают Индустрию 5.0 эволюцией Индустрии 4.0, в которой творческий человек сотрудничает с интеллектуальными системами с целью повышения эффективности, быстродействия и масштабируемости производственных систем. В работе [12] Индустрия 5.0 также рассматривается как продолжение Индустрии 4.0 с большим упором на человеко-ориентированное взаимодействие с компьютером.

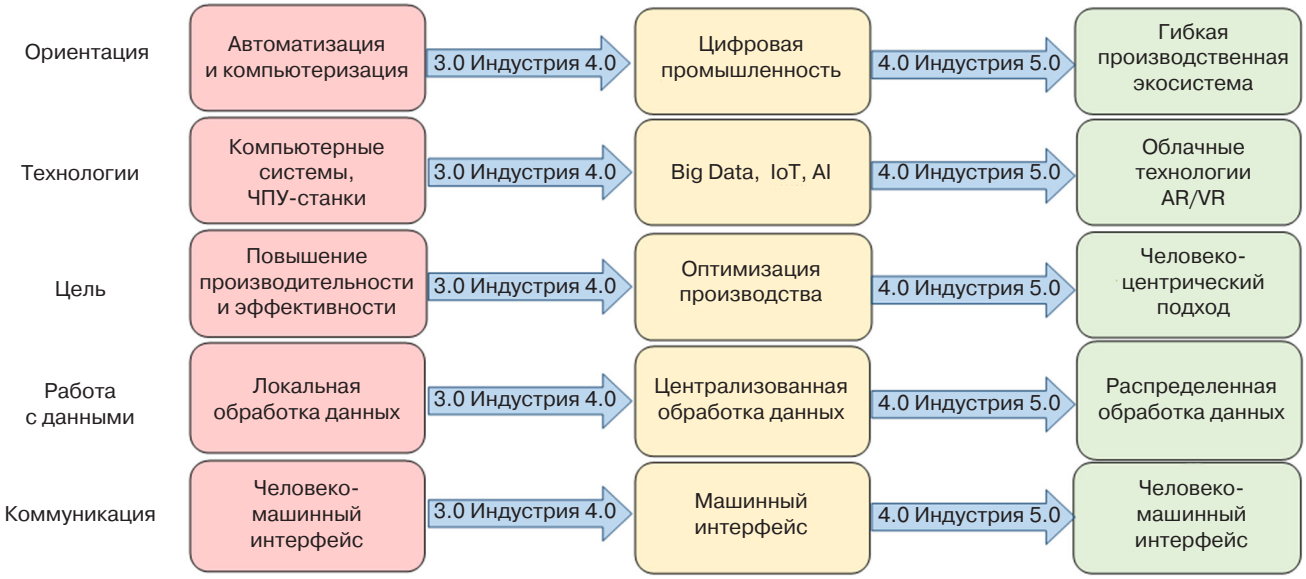
Работа [13] посвящена образованию и необходимым навыкам и компетенциям работников для адаптации к Индустрии 5.0 и изменениям в университетском ландшафте.

Ряд авторов исследуют общие аспекты Индустрии 5.0 и Индустрию 4.0 параллельно. Например, в работе [14] дано описание технологических элементов, общих для Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0.

Российские исследователи также рассматривают проблематику Индустрии 5.0. Так, обзорные исследования представлены в трудах [15] и [16]. В статье [17] декларируется, что Индустрия 5.0 представляет собой интеграцию виртуального и реального миров. Авторы работы [18] отмечают преимущества технологий Индустрии 5.0 для нефтегазовых компаний.

В работе [19] рассматривается проблема диагностики мезоэкономических систем, находящихся в процессе эволюции к Индустрии 5.0. Авторы выдвигают и обосновывают гипотезу о существовании базовых факторов, влияющих на развитие экономической системы в условиях этого перехода, и предлагают классификацию методов исследования таких систем.

В целом, анализ научной литературы показал, что готовность российской экономики к ответу на вызовы Индустрии 5.0 изучена недостаточно. В заключении приведенного обзора публикаций



Источники: разработано авторами на основе [21, 22]

Рисунок. Основные отличительные особенности Индустрии 3.0, Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0. ЧПУ – числовое программное управление, IoT – Internet of things (Интернет вещей), AI – Artificial Intelligence (искусственный интеллект)

по рассматриваемой тематике следует отметить, что Индустрия 5.0 является относительно новым понятием и несмотря на заметный рост числа работ в данном направлении, формирование стратегий перехода на технологии Индустрии 5.0, пока носит фрагментарный характер и представлено в национальных программах некоторых стран (можно выделить программу Евросоюза «Индустрия 5.0, «Сделано в Китае – 2025» и японское «Общество 5.0») [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ публикаций позволил выделить основные отличительные особенности Индустрии 3.0, Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 (рисунок), определяемых своей уникальной ориентацией, технологиями, целями, подходами к работе с данными и типами интерфейсов.

Каждая последующая промышленная революция представляет собой значительный шаг в развитии технологий и методов производства, направленный на повышение эффективности, гибкости и учета человеческого фактора в производственных процессах. Отметим, что в Индустрии 5.0 интерфейс между человеком и технологической средой значительно усовершенствован и включает продвинутые технологии, такие как виртуальная (virtual reality, VR) и дополненная (augmented reality, AR) реальности.

Ряд ученых-экономистов характеризуют Индустрию 5.0 как «революцию человеческого участия», где промышленный рост органично сочетается с решением социо-экономических вопросов через синергию кибернетического и физического пространств [23]. Одним из преимуществ такой синергии выступает объединение интеллектуальных систем с текущими рабочими процессами, в результате происходит рост операционной эффективности в целом.

Представленная на рисунке эволюция актуальна в контексте российской экономики. В настоящее время Россия активно стремится к ускоренному внедрению цифровых технологий. Так, в 2017 г. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации инициировало национальную программу «4.0 RU»[5], нацеленную на цифровую трансформацию всех этапов производственного процесса в соответствии с концепцией Индустрии 4.0. Однако с запуском национального проекта «Цифровая экономика»[6] в 2018 г. акцент сместился в сторону внедрения так называемых «сквозных технологий», направленных преимущественно на улучшение социальной сферы, включая системы идентификации и цифровые сервисы для населения. Это смещение приоритетов обусловило замедление процессов цифровизации в промышленном секторе, а также отсутствие интегрированной цифровой инфраструктуры на уровне предприятий,

[5] https://niieap.com/2017/07/24/minpromtorg-rossii-i-ryad-vysokotehnologichnyh-kompanij-predstavili-tsifrovoj-proekt-v-sfere-aviastroeniya-industriya-4-0/. Дата обращения 10.11.2024. / Accessed November 10, 2024.

[6] http://government.ru/info/35568/. Дата обращения 10.11.2024. / Accessed November 10, 2024.

что затрудняет реализацию единой цифровой среды в рамках национальной экономики.

Нормативные документы, включая национальную программу «Цифровая экономика» и девять федеральных проектов, входящих в ее состав, в т.ч. федеральный проект «Цифровые технологии», а также разрабатываемый национальный проект «Экономика данных»[7], находящийся в повестке органов государственной власти, свидетельствуют о продолжающейся цифровизации государственных структур и социальной сферы. Тем не менее, для полноценной цифровой трансформации российской промышленности необходимо восстановление приоритетов в области цифровизации производственных процессов и разработка специализированных программных документов, направленных на поддержку предприятий реального сектора экономики.

Кроме этого, в настоящих программных документах недостаточно учтен человеческий фактор, который играет центральную роль в Индустрии 5.0. Также следует учитывать вопросы доступности и инклюзивности новых цифровых решений для всех слоев общества, чтобы избежать углубления цифрового разрыва. Важно осознавать, что экономика данных не сводится только к простому использованию новых цифровых технологий в экономике, обществе и повседневной жизни. Она также включает в себя создание собственной научной, образовательной, технологической, промышленной, социально-экономической и культурной базы для обеспечения технологического суверенитета страны через импортозамещение, последующее импортоопережение и интеграцию в мировые цепочки добавленной стоимости.

Переход к Индустрии 5.0 в России сопровождается не только перспективами, но и вызовами. Поскольку внедрение инновационных технологий требует высококвалифицированных специалистов, одним из ключевых вызовов является необходимость подготовки и переквалификации трудовых ресурсов. Помимо этого, можно отметить следующие вызовы: экспоненциальный рост объема данных, повышение уязвимости к кибератакам, сокращение рабочих мест на предприятиях, отсутствие учета этических вопросов искусственного интеллекта и др. Вместе с тем, Индустрия 5.0 предполагает повышение эффективности производственных процессов за счет автоматизации и совершенствования взаимодействия между технологической средой и человеком. Индустрия 5.0 открывает новые перспективы для создания рабочих мест, связанных с обслуживанием новых технологий.

Важно отметить, что переход к Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 не подразумевает автоматический и немедленный переход для всех предприятий народного хозяйства. Внедрение новых технологий и методов управления на отдельных предприятиях может служить катализатором для других, создавая эффект снежного кома, когда количество вовлеченных предприятий увеличивается со временем. Осознание тенденций и проблем Индустрий 4.0 и 5.0 необходимо для того, чтобы российские предприятия могли максимально использовать свои ресурсы и возможности, а также успешно завершить переход к Индустрии 4.0.

Несмотря на значительные перспективы перехода к Индустрии 5.0, данный процесс в российской экономике сталкивается с рядом серьезных барьеров. Ключевыми среди них выступают недостаточная готовность технологической инфраструктуры и ограниченные инвестиции в исследовательскую и инновационную деятельность. Текущий уровень оснащенности предприятий, как правило, не соответствует требованиям Индустрии 5.0, что замедляет внедрение передовых технологий. Ограниченные инвестиции в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы также существенно сдерживают инновационное развитие [24]. Устранение названных барьеров требует комплексного подхода и государственной поддержки.

С учетом того, что Индустрия 5.0 «представляет собой следующий этап развития промышленности» [21], когда радикально меняются подходы «к управлению бизнесом, делая акцент на человеческом факторе»[8], для успешного преодоления перечисленных вызовов и барьеров важно руководствоваться следующими принципами Индустрии 5.0 [4, 21, 22]:

1. *Принцип человекоцентричности* предполагает, что в основу производственного процесса ставятся потребности человека.
2. *Принцип цифровизации* требует всестороннего использования передовых цифровых технологий в рамках производства товаров и оказания услуг.
3. *Принцип интеграции* предполагает не только внедрение технологий для автоматизации производства, но и формирование надлежащих условий для эффективного взаимодействия между человеком и технологической средой, использование лучших качеств обеих сторон.
4. *Принцип синергии* предусматривает задействование современных технологий (облачные

[7] https://национальныепроекты.рф/new-projects/ekonomika-dannykh/. Дата обращения 10.11.2024. / Accessed November 10, 2024.

[8] Индустрия 5.0: Человекоцентричное будущее бизнеса и новые стратегии роста. https://pakhotin.org/technologies/industry-5/. Дата обращения 10.11.2024. [Industry 5.0: The Human-Centered Future of Business and New Growth Strategies. https://pakhotin.org/technologies/industry-5/ (in Russ.). Accessed November 10, 2024.]

технологии, искусственный интеллект и т.д.) для автоматизации производственных процессов, сохраняя существенную человеческую роль в управлении.

5. *Принцип оптимизации* предполагает поиск моделей экономической деятельности, которые минимизируют использование ресурсов для достижения максимальной эффективности при взаимодействии между человеком и технологической средой.
6. *Принцип виртуализации* предполагает создание и внедрение цифровых двойников физических объектов и производственных и управленческих процессов для расширения аналитики и приложений искусственного интеллекта.
7. *Принцип платформизации* предполагает подключение к единому информационному пространству различных пользователей для взаимодействия, систем и оборудования по всей цепочке жизненного цикла производства.
8. *Принцип персонализации* предполагает создание систем, которые позволят массово производить персонализированные продукты и услуги с использованием цифровых технологий.
9. *Принцип экосистемности* предполагает объединение элементов, разрозненных во времени, пространстве и типах отраслей для создания технологических и бизнес-коллабораций.
10. *Принцип экологичности* заключается в имплементации энергоэффективных технологий с целью снижения отрицательного влияния на окружающую среду.

Отметим, что каждая промышленная революция формирует свои уникальные принципы. Например, на этапе развития Индустрии 3.0 основной акцент делался на автоматизацию и внедрение электроники, что снижало актуальность интеграции человека и технологий – ключевого принципа для Индустрии 5.0. На этапе развития Индустрии 4.0, где преобладают процессы цифровизации и распространения Интернета вещей, такие принципы, как экологичность и взаимодействие человека с технологической средой, также играют второстепенную роль. На этапе развития Индустрии 5.0 акцент смещается на интеграцию цифровых технологий и человеческого фактора, что требует создания комплексных программных документов, в т.ч. со стороны правительства и государства, направленных на стимулирование бизнеса и промышленности к внедрению новых цифровых технологий. Особое внимание должно быть уделено не только крупным государственным корпорациям, но и частным малым и средним промышленным предприятиям.

Внедрение принципа человекоцентричности в производственные процессы предоставляет возможности для повышения производительности и создания более устойчивых бизнес-моделей. Это предполагает не только модернизацию технологий, но и адаптацию их под реальные потребности общества. В России человекоцентричность может стать ключевым фактором успешного внедрения новых технологических решений, поскольку позволяет повысить удовлетворенность работников, стимулирует их к обучению и развитию, а также улучшает потребительский опыт.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ФУНКЦИИ

Сравнение различных промышленных революций можно осуществлять с помощью моделей экономического роста. Например, используя модель Солоу, возможно проследить, какие значительные изменения в производственные процессы вносит каждая последующая промышленная революция, а также проводить исследования процессов роста в условиях непрерывного технологического развития. При этом анализу подлежит так называемая производственная функция, которая определяет взаимосвязь между объемом производства Y, численностью работников L, объемом капитала K и технологическим прогрессом A:

$$Y = AK^{\alpha}L^{1-\alpha}. \quad (1)$$

В формуле (1) значение параметра α находится в интервале от 0 до 1, а сам параметр определяет, какую часть производства обеспечивает капитал.

Часто три основных фактора производства – труд, капитал и технологический прогресс – не дают полной картины производственного процесса. В таких случаях используют расширенные модели или добавляют дополнительные переменные для более глубокого анализа. Например, расширенная модель Солоу [25] может быть формализована следующим образом:

$$Y = AK^{\alpha}L^{\beta}H^{\gamma}N^{\delta}R^{\varepsilon}. \quad (2)$$

В расширенной модели, в отличие от исходной, введены новые факторы: человеческий капитал H, природные ресурсы N и уровень технологий R. Параметры модели (α, β, γ, δ и ε) определяют влияние этих факторов на процесс производства (эластичность выпуска по отношению к каждому производственному фактору). Сумма значений этих параметров должна быть равна 1, что обеспечивает полноту учета всех факторов. Например, α показывает, на сколько процентов изменится выпуск Y, если капитал K изменится на 1%, при условии, что остальные факторы остаются неизменными.

Для каждой промышленной революции коэффициенты модели должны принимать различные значения. Рассмотрим соображения по значениям параметров расширенной модели Солоу в контексте Индустрий 3.0, 4.0 и 5.0.

Индустрия 3.0. Капитал K играет ключевую роль в Индустрии 3.0, поскольку физические ресурсы (машины, оборудование) остаются основой производства. В Индустрии 3.0 трудовые ресурсы L также остаются важными, но возможно имеют меньшее влияние по сравнению с машинами и оборудованием. Человеческий капитал, образование и навыки H имеют меньшее значение в сравнении с физическими ресурсами и технологиями. Влияние природных ресурсов N во многом зависит от специфики отрасли, но все еще существенно, особенно в производстве сырья. Уровень развития технологий R достаточно важен, но не настолько, как в Индустриях 4.0 и 5.0.

Индустрия 4.0. Капитал K остается важным, однако основной вектор развития направлен на инновационные технологии и цифровизацию производства. В условиях автоматизации и использования робототехники человеческий фактор L менее значим по сравнению с Индустрией 3.0, а обучение и навыки H становятся более важными, т.к. требуются высококвалифицированные специалисты для работы с новыми технологиями. С учетом устойчивого развития и экологической эффективности влияние на природные ресурсы N может быть меньше, а воздействие технологий R на производство, а особенно цифровых технологий – значительно.

Индустрия 5.0. Капитал K в виде интеллектуального и цифрового капитала становится главным фактором производства. Человеческий ресурс L все еще важен, но большее внимание может уделяться креативности, инновациям и междисциплинарному сотрудничеству. В Индустрии 5.0 образование, креативность и гибкие навыки H – ключевые факторы. Приоритеты устойчивого развития и осознание экологических проблем определяют важность минимизации использования природных ресурсов N. Влияние передовых технологий R, таких как искусственный интеллект или нанотехнологии, является определяющим.

Отметим, что установка коэффициентов α, β, γ, δ, ε для каждой Индустрии зависит от конкретных условий и целей определенной промышленной отрасли. Для численного определения значений коэффициентов модели (2) был проведен экспертный опрос. Для обеспечения репрезентативности и достоверности исследования в опросе приняли участие 110 экспертов, представляющих различные секторы экономики, включая высшие учебные заведения (РТУ МИРЭА и Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева), академические исследовательские центры, промышленность и бизнес (Нижегородское региональное отделение Общероссийской общественной организации «Вольное экономическое общество России»), что в целом достаточно для подобных исследований [26]. Такой подход позволил охватить широкий спектр мнений и обеспечить разнообразие взглядов на значимость различных факторов производства. Экспертам было предложено оценить вклад пяти основных факторов в общий объем производства для трех промышленных революций. При этом каждый эксперт должен был распределить коэффициенты так, чтобы их сумма для каждой промышленной революции равнялась 1. Данные, полученные в результате опроса, были усреднены для получения общих коэффициентов (таблица).

Таблица. Распределение коэффициентов расширенной модели Солоу

Индустрия	α	β	γ	δ	ε	Пояснение
3.0	0.32	0.18	0.16	0.1	0.24	Капитал оказывает наибольшее влияние на объем производства, что указывает на капиталоемкость Индустрии 3.0. Вклад труда значителен, но меньше, чем вклад капитала. Человеческий капитал, важен, но уступает капиталу и труду. Вклад природных ресурсов небольшой. Высокий вклад уровня развития технологий подчеркивает важность технологического прогресса
4.0	0.26	0.16	0.19	0.09	0.3	Вклад капитала высок, но меньше, чем в Индустрии 3.0. Вклад труда уменьшен по сравнению с Индустрией 3.0. Человеческий капитал вносит более значительный вклад, чем в Индустрии 3.0. Вклад природных ресурсов остается таким же, как в Индустрии 3.0. Наивысший вклад среди всех факторов отведен уровню развития технологий, указывающему на высокую зависимость от технологических инноваций
5.0	0.21	0.11	0.24	0.14	0.3	Наименьший вклад капитала и труда среди всех индустрий. Наивысший вклад человеческого капитала подчеркивает важность знаний и навыков. Более значительный вклад природных ресурсов по сравнению с другими индустриями. Вклад технологий остается высоким

Приведем сравнительный анализ вклада каждого фактора в производство в контексте Индустрий 3.0, 4.0 и 5.0. Можно констатировать, что относительный вклад капитала уменьшается. Роль труда также снижается, что во многом свидетельствует о меньшей зависимости от количества рабочей силы. Напротив, вклад человеческого капитала увеличивается, подчеркивая его исключительную важность. Роль фактора, связанного с природными ресурсами, остается относительно стабильной, с небольшим увеличением в Индустрии 5.0, а значимость технологического развития остается стабильно высокой, что свидетельствует о важности инноваций для экономического роста.

Таким образом, каждая промышленная революция имеет свои особенности и различия относительно вклада каждого фактора, что следует учитывать при разработке экономической политики и инвестиционных стратегий. Хотя с теоретической точки зрения распределение коэффициентов α, β, γ, δ, ε видится весьма справедливым, для полного подтверждения справедливости и адекватности модели в практическом применении необходимо провести ее эмпирическую проверку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования представлены концептуальные различия Индустрий 3.0, 4.0 и 5.0, включая уникальную ориентацию, технологии, цели, подходы к работе с данными и коммуникации. Особое внимание уделено обоснованию необходимости ускоренного внедрения в России технологий Индустрии 5.0. Отмечено, что на данный момент российская экономика недостаточно подготовлена к вызовам Индустрии 5.0. Основными препятствиями являются отсутствие четкой государственной стратегии цифровой трансформации промышленности, низкий уровень цифровизации большинства промышленных предприятий, ограниченное финансирование и поддержка малых и средних промышленных компаний в вопросах внедрения передовых технологий, а также недостаток квалифицированных кадров. Однако внедрение технологий Индустрии 4.0 и планирование перехода на технологии Индустрии 5.0 рассматриваются как необходимые шаги для формирования инновационной и конкурентоспособной экономики.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы: хотя переход к технологиям Индустрии 5.0 в российской экономике находится на зачаточной стадии, очевидна необходимость ускорения данного процесса. Рекомендациями для ускорения перехода могут быть: разработка четкой стратегии внедрения принципов Индустрии 5.0 на уровне национальной экономики, усиление государственной поддержки для малых и средних промышленных предприятий, создание специализированных образовательных программ для подготовки кадров к работе с новыми технологиями.

Модель Солоу может служить основой для разработки экономических стратегий, направленных на ускорение внедрения принципов и технологий Индустрии 5.0. Модель Солоу позволяет анализировать влияние технологических изменений на долгосрочный экономический рост, учитывать важность инвестиций в исследования и разработки, а также влияние человеческого капитала и технологического прогресса на рост валового внутреннего продукта. Однако в статье эти выводы основываются на теоретических предположениях и экспертных оценках, которые требуют дальнейшего эмпирического подтверждения. Для полноценного обоснования предложенных стратегических шагов необходимо проведение дополнительных исследований и проверка модели на практических данных. Особенно следует подчеркнуть, что значимость финансового капитала и инвестиций в критическую инфраструктуру и развитие человеческого капитала заслуживает внимания, поскольку переход к новым технологиям требует значительных затрат и всестороннего анализа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-78-10009).

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation grant (project No. 23-78-10009).

Вклад авторов

Н.Н. Карпухина – идея исследования, анализ литературы, написание и редактирование текста статьи.

Е.С. Митяков – идея исследования, анализ литературы, обоснование математической модели, интерпретация и обобщение результатов исследования, написание и редактирование текста статьи.

А.Ю. Пронин – идея исследования, написание текста статьи.

Authors' contributions

N.N. Karpukhina – the idea of the study, literature analysis, writing and editing the text of the article.

E.S. Mityakov – the idea of the study, literature analysis, substantiation of the mathematical model, interpretation and generalization of the research results, writing and editing the text of the article.

A.Yu. Pronin – the idea of the study, writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ситникова С.Е. Цифровая форма коммерциализации инноваций в вузах и пути повышения ее эффективности: международный опыт и перспективы для России. *Инновационное развитие экономики*. 2020;6(60):61–70.
2. Старожук И.Н., Комиссаров В.Д. Цифровой двойник как механизм перехода от Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0. В сб.: *Цифровая трансформация экономических систем: проблемы и перспективы* (*ЭКОПРОМ-2022*): *Сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции с зарубежным участием*. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2022. С. 151–154.
3. Агеев А.И. Управление цифровым будущим. *Мир новой экономики*. 2018;12(3):6–23. https://doi.org/10.26794/2220-6469-2018-12-3-6-23
4. Розанова Н.М. Индустрия 5.0: золотой век или прыжок в темноту? *Вестник Института экономики Российской академии наук.* 2023;6:61–77.
5. Barata J., Kayser I. Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future. *Procedia Comput. Sci*. 2023;219(1):778–788. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.351
6. Nahavandi S. Industry 5.0 – A Human-Centric Solution. *Sustainability*. 2019;11(16):4371. https://doi.org/10.3390/su11164371
7. Orea-Giner A., Fuentes-Moraleda L., Villacé-Molinero T., et al. Does the Implementation of Robots in Hotels Influence the Overall TripAdvisor Rating? A Text Mining Analysis from the Industry 5.0 Approach. *Tour. Manag*. 2022;93(2):104586. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2022.104586
8. Kaasinen E., Anttila A.H., Heikkilä P., et al. Smooth and Resilient Human–Machine Teamwork as an Industry 5.0 Design Challenge. *Sustainability*. 2022;14(5):2773. https://doi.org/10.3390/su14052773
9. Coronado E., Kiyokawa T., Ricardez G.A.G., et al. Evaluating quality in human-robot interaction: A systematic search and classification of performance and human-centered factors, measures and metrics towards an industry 5.0. *J. Manufactur. Syst*. 2022;63:392–410. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.007
10. Carayannis E.G., Christodoulou K., Christodoulou P., et al. Known Unknowns in an Era of Technological and Viral Disruptions – Implications for Theory, Policy, and Practice. *J. Knowl. Econ.* 2022;13(1):587–610. https://doi.org/10.1007/s13132-020-00719-0
11. Fatima Z., Tanveer M.H., Waseemullah, et al. Production Plant and Warehouse Automation with IoT and Industry 5.0. *Appl. Sci.* 2022;12(4):2053. https://doi.org/10.3390/app12042053
12. Paul G., Abele N.D., Kluth K. A Review and Qualitative Meta-Analysis of Digital Human Modeling and Cyber-Physical-Systems in Ergonomics 4.0. *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors.* 2021;9(3–4):111–123. https://doi.org/10.1080/24725838.2021.1966130
13. Broo D.G., Kaynak O., Sait S.M. Rethinking engineering education at the age of industry 5.0. *J. Industr. Inform. Integrat*. 2021;25(8):100311. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100311
14. Alvarez-Aros E.L., Bernal-Torres C.A. Technological competitiveness and emerging technologies in industry 4.0 and industry 5.0. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2021;93(1). https://doi.org/10.1590/0001-3765202120191290
15. Гасанов Э.А. Новая форма соединения человека и машины в модели производства Индустрии 5.0. *Экономика и управление инновациями*. 2022;3(22):39–49. https://doi.org/10.26730/2587-5574-2022-3-39-49
16. Трофимова Н.Н. Индустрия 5.0 как новое направление промышленного развития. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2023;5(133):24–28. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2023.01.05.003
17. Евгенев Г.Б. Индустрия 5.0 как интеграция интернета знаний и интернета вещей. *Онтология проектирования*. 2019;9(1–31):7–23.
18. Азиева Р.Х., Таймасханов Х.Э. Модернизация нефтегазовой отрасли в стиле Индустрии 5.0. *Финансовый бизнес*. 2021;2(212):82–86.
19. Галимулина Ф.Ф., Шинкевич М.В. Диагностика мезоэкономических систем в России в условиях перехода к Индустрии 5.0. *Экономические и социально-гуманитарные исследования*. 2023;4(40):23–32.
20. Тинтин Ху. Обзор национальных стратегий перехода к Индустрии 5.0. *Экономика и управление инновациями*. 2022;3(22):28–38. https://doi.org/10.26730/2587-5574-2022-3-28-38
21. Маковецкий С.А. Продолжение эволюции: сравнение Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 в контексте современных требований. В сб.: *Бизнес. Образование. Экономика: Материалы Международной научно-практической конференции*. Минск; 2023. С. 81–85.
22. Пронин А.Ю. Тенденции цифровой трансформации высокотехнологичных предприятий в условиях перехода от Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0. *Cifra. Экономика*. 2024;3(6). https://doi.org/10.60797/ECNMS.2024.6.1
23. Черепанов Н.В. Принципы и подходы применения Индустрии 5.0 на предприятии. *Инновации и инвестиции*. 2019;9:144–147.
24. Лапаев Д.Н., Митякова О.И., Мурашова Н.А., Митяков Е.С. *Организация НИОКР*. Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева; 2017. 100 с.
25. Канаметова Д.А. Анализ моделей динамических экономических систем. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2023;4(114):88–97. https://doi.org/10.35330/1991-6639-2023-4-114-88-97
26. Memon M., Ting H., Hwa C., Ramayah T., Chuah F., Cham T.H. Sample Size for Survey Research: Review and Recommendations. *Journal of Applied Structural Equation Modeling* (*JASEM*). 2020;4(2):i-xx. http://doi.org/10.47263/JASEM.4(2)01

REFERENCES

1. Sitnikova S.E. Digital form of commercialization of innovations in universities and ways to improve its efficiency: international experience and prospects for Russia. *Innovatsionnoe razvitie ekonomiki = Innovative Development of Economy.* 2020;6(60):61–70 (in Russ.).
2. Starozhuk I.N., Komissarov V.D. Digital twin as a mechanism for transition from Industry 4.0 to Industry 5.0. In: *Digital Transformation of Economic Systems: Problems and Prospects: Proceedings of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conference with Foreign Participation.* St. Petersburg: POLITEKh-PRESS; 2022. P. 151–154 (in Russ.).
3. Ageev A.I. Managing the digital future. *Mir novoi ekonomiki = The World of New Economy*. 2018;12(3):6–23 (in Russ.). https://doi.org/10.26794/2220-6469-2018-12-3-6-23
4. Rozanova N.M. Industry 5.0: a golden age or a leap into the dark? *Vestnik Instituta ekonomiki Rossiiskoi akademii nauk = Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences.* 2023;6:61–77 (in Russ.).
5. Barata J., Kayser I. Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future. *Procedia Comput. Sci*. 2023;219(1):778–788. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.351
6. Nahavandi S. Industry 5.0 – A Human-Centric Solution. *Sustainability*. 2019;11(16):4371. https://doi.org/10.3390/su11164371
7. Orea-Giner A., Fuentes-Moraleda L., Villacé-Molinero T., et al. Does the Implementation of Robots in Hotels Influence the Overall TripAdvisor Rating? A Text Mining Analysis from the Industry 5.0 Approach. *Tour. Manag*. 2022;93(2):104586. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2022.104586
8. Kaasinen E., Anttila A.H., Heikkilä P., et al. Smooth and Resilient Human–Machine Teamwork as an Industry 5.0 Design Challenge. *Sustainability*. 2022;14(5):2773. https://doi.org/10.3390/su14052773
9. Coronado E., Kiyokawa T., Ricardez G.A.G., et al. Evaluating quality in human-robot interaction: A systematic search and classification of performance and human-centered factors, measures and metrics towards an industry 5.0. *J. Manufactur. Syst*. 2022;63:392–410. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.007
10. Carayannis E.G., Christodoulou K., Christodoulou P., et al. Known Unknowns in an Era of Technological and Viral Disruptions – Implications for Theory, Policy, and Practice. *J. Knowl. Econ.* 2022;13(1):587–610. https://doi.org/10.1007/s13132-020-00719-0
11. Fatima Z., Tanveer M.H., Waseemullah, et al. Production Plant and Warehouse Automation with IoT and Industry 5.0. *Appl. Sci.* 2022;12(4):2053. https://doi.org/10.3390/app12042053
12. Paul G., Abele N.D., Kluth K. A Review and Qualitative Meta-Analysis of Digital Human Modeling and Cyber-Physical-Systems in Ergonomics 4.0. *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors.* 2021;9(3–4):111–123. https://doi.org/10.1080/24725838.2021.1966130
13. Broo D.G., Kaynak O., Sait S.M. Rethinking engineering education at the age of industry 5.0. *J. Industr. Inform. Integrat*. 2021;25(8):100311. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100311
14. Alvarez-Aros E.L., Bernal-Torres C.A. Technological competitiveness and emerging technologies in industry 4.0 and industry 5.0. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2021;93(1). https://doi.org/10.1590/0001-3765202120191290
15. Gasanov E.A. New form of human-machine connection in the Industry 5.0 production model. *Ekonomika i upravlenie innovatsiyami = Economy and Innovation Management*. 2022;3(22):39–49 (in Russ.). https://doi.org/10.26730/2587-5574-2022-3-39-49
16. Trofimova N.N. Industry 5.0 as a new direction of industrial development. *Ekonomika i Upravlenie: Problemy, Resheniya*. 2023;5(133):24–28 (in Russ.). https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2023.01.05.003
17. Evgenev G.B. Industry 5.0 as an integration of the Internet of Knowledge and the Internet of Things. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing.* 2019;9(1–31):7–23 (in Russ.).
18. Azieva R.Kh., Taimaskhanov H.E. Modernization of the oil and gas industry in the style of Industry 5.0. *Finansovyi biznes*. 2021;2(212):82–86 (in Russ.).
19. Galimulina F.F., Shinkevich M.V. Diagnostics of mesoeconomic systems in Russia under condition of transition to Industry 5.0. *Ekonomicheskie i sotsial'no-gumanitarnye issledovaniya = Economic and Social Research*. 2023;4(40):23–32 (in Russ.).
20. Tingting Hu. Review of national strategies for transition to Industry 5.0. *Ekonomika i upravlenie innovatsiyami = Economics and Innovation Management.* 2022;3(22):28–38 (in Russ.). https://dx.doi.org/10.26730/2587-5574-2022-3-28-38
21. Makovetskii S.A. Continued evolution: comparison of Industry 4.0 and Industry 5.0 in the context of modern requirements. In: *Business. Education. Economy: Proceedings of the International Scientific and Practical conference*. Minsk; 2023. P. 81–85 (in Russ.).
22. Pronin A.Yu. Tendencies in digital transformation of high-tech enterprises in the transition from Industry 4.0 to Industry 5.0. *Cifra. Ekonomika = Cifra. Economy*. 2024;3(6) (in Russ.). https://doi.org/10.60797/ECNMS.2024.6.1
23. Cherepanov N.V. Principles and approaches of using Industry 5.0 at the enterprise. *Innovatsii i investitsii = Innovation & Investment*. 2019;9:144–147 (in Russ.).
24. Lapaev D.N., Mityakova O.I., Murashova N.A., Mityakov E.S. *Organizatsiya NIOKR* (*Organization R&D*). N. Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University; 2017. 100 p. (in Russ.).
25. Kanametova D.A. Analysis of Models of Dynamic Economic Systems. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN = News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2023;4(114):88–97 (in Russ.). https://doi.org/10.35330/1991-6639-2023-4-114-88-97

26. Memon M., Ting H., Hwa C., Ramayah T., Chuah F., Cham T.H. Sample Size for Survey Research: Review and Recommendations. *Journal of Applied Structural Equation Modeling* (*JASEM*). 2020;4(2):i-xx. http://doi.org/10.47263/JASEM.4(2)01

Об авторах

Карпухина Наталия Николаевна, д.э.н., доцент, заведующий кафедрой управления инновациями, Институт технологий управления, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: karpukhina@mirea.ru. Scopus Author ID 57190409353, SPIN-код РИНЦ 7442-9985, https://orcid.org/0000-0003-3378-5230

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

Пронин Алексей Юрьевич, к.т.н., доцент, кафедра управления инновациями, Институт технологий управления, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pronin@mirea.ru. Scopus Author ID 57190872536, SPIN-код РИНЦ 6833-7914, https://orcid.org/0000-0001-8947-3047

About the Authors

Natalia N. Karpukhina, Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Department of Innovation Management, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: karpukhina@mirea.ru. Scopus Author ID 57190409353, RSCI SPIN-code 7442-9985, https://orcid.org/0000-0003-3378-5230

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

Aleksey Yu. Pronin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Innovation Management, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pronin@mirea.ru. Scopus Author ID 57190872536, RSCI SPIN-code 6833-7914, https://orcid.org/0000-0001-8947-3047

Russian Technological Journal.
2025;13(4):135–148

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

УДК 332.025.13, 332.056.2, 332.055.2, 336.1, 336.13, 351.72
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-135-148
EDN YYMNZI

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Инвентаризация электроники – фундамент прорыва в лидеры

В.В. Шпак @

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
@ *Автор для переписки, e-mail: morser@yandex.ru*

• **Поступила:** 28.04.2025 • **Доработана:** 13.05.2025 • **Принята к опубликованию:** 13.06.2025

Резюме

Цели. Многоотраслевая структура российской экономики в условиях агрессивных санкций и недружественного поведения конкурентов приняла этот вызов и ускоренно реструктуризируется, повышая свою конкурентоспособность и импортонезависимость. Локомотивом этого процесса является электронная промышленность, продукция которой определяет и влияет практически на все стороны экономики и общества. Это свидетельствует об определяющей роли электронной промышленности в жизни россиян. Настоящая статья показывает первый шаг на пути к эффективному и оптимальному решению стоящих задач – инвентаризацию производительных сил электронной промышленности.

Методы. Использованы классические методы исследования социально-экономических отношений сложной системы, которой является электронная промышленность с входящими в нее подотраслями, предприятиями и организациями. Применен метод системного анализа проблем управления на макро-, мезо- и микроуровнях. Метод индукции, к которому относится инвентаризация, дополнен в исследовании методом дедукции, т.е. аналитическим движением от электронной промышленности как целостной системы к отдельным факторам воспроизводственного процесса.

Результаты. Выстроена реальная и практически осуществимая цепочка внедрения цифровых технологий в управление отраслью, первым шагом в которой должна стать инвентаризация всех факторов воспроизводства. Представлены обоснование и развернутая программа инвентаризации, которые выводят на реалистичную цель, скомпонованную в блок-схему управления в формате «цифровой двойник электронной промышленности – цифровые двойники предприятий электронной промышленности».

Выводы. Отставание российской электронной промышленности от иностранных конкурентов не является непреодолимым. Санкции и недружественные действия иностранных конкурентов позволили российской электронной промышленности их нивелировать, преодолеть и существенно ускорить как научно-технологическое, так и организационно-управленческое развитие отрасли. Руководство страны и отрасли наступательно реализуют программу развития электронной промышленности как локомотива всей экономики, а проведение инвентаризации позволит направить отрасль в обгон иностранных конкурентов.

Ключевые слова: инвентаризация, электроника, микроэлектроника, электронная промышленности, генеральная схема, ГИСП, мультиагентная модель

© В.В. Шпак, 2025

Для цитирования: Шпак В.В. Инвентаризация электроники – фундамент прорыва в лидеры. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):135–148. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-135-148, https://www.elibrary.ru/YYMNZI

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Electronics inventory as the foundation of a breakthrough into global leadership

Vasily V. Shpak @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
@ *Corresponding author, e-mail: morser@yandex.ru*

• **Submitted:** 28.04.2025 • **Revised:** 13.05.2025 • **Accepted:** 13.06.2025

Abstract

Objectives. In the context of aggressive sanctions and unfriendly behavior of competitors, the multi-sectoral structure of the Russian economy is undergoing a process of rapidly restructuring to increase its competitiveness and import independence. The locomotive of this process is the electronic industry, whose products influence almost all aspects of the economy and society. This indicates the decisive role of the electronic industry in the lives of Russians. Thus, the inventorization of the productive forces of the electronic industry presented in this article constitutes a necessary step towards an effective and optimal solution to the problems at hand.

Methods. Classical methods of studying the socioeconomic relations of a complex system are used to consider the example of the electronic industry along with its sub-sectors, enterprises, and other organizational forms. The system analysis method is applied to management problems emerging at three levels: macro-, meso- and micro-level. The induction method of inventory management is supplemented by the deduction method representing an analytical movement from the electronic industry as an integral system to individual factors of the reproduction process.

Results. The first step of a practically feasible implementation chain of digital technologies in industry management should consist in an inventory of all reproduction factors. The presented rationale and detailed inventory program are compiled into a management block diagram in the format of digital twins of electronic industry enterprises.

Conclusions. The barriers facing the Russian electronic industry in the form of foreign competitors are not insurmountable. Sanctions and unfriendly actions of foreign competitors represent an opportunity the Russian electronics industry to overcome such barriers to significantly accelerate the scientific and technological, organizational, and managerial development of the industry. The country's leadership and industry actors are aggressively implementing a program for developing the electronic industry as the locomotive of the entire economy. The inventory presented in this article will serve to facilitate a resurgence of the Russian electronics industry with respect to foreign competitors.

Keywords: inventory, electronics, microelectronics, general scheme, GISP, multi-agent model

For citation: Shpak V.V. Electronics inventory as the foundation of a breakthrough into global leadership. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):135–148. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-135-148, https://www.elibrary.ru/YYMNZI

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

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие любой сложной хозяйственной системы тем эффективнее, чем яснее поставленная цель и полнее представление о реальных средствах ее достижения. Развитие электронной промышленности в последние годы демонстрирует стабильную положительную динамику в соответствии с определенными руководством страны целями. Однако для сохранения и наращивания темпов развития нужно работать над повышением эффективности взаимодействия всех участников отрасли на основании выстраивания генеральной схемы развития и размещения производительных сил электроники. Системное представление о доступных средствах для основы генеральной схемы может дать лишь масштабная и всеохватывающая инвентаризация всех производственных факторов, имеющихся в распоряжении государственных и частных предприятий.

1. РЕАЛИЗАЦИЯ ОСНОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОНИКИ

На протяжении нескольких последних лет, с момента утверждения в январе 2020 г. Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 г.[1], отрасль демонстрирует заметный рост по всем основным показателем (рис. 1).

Объемы российской электронной продукции, несмотря на внешние ограничения (пандемия COVID-19, усиливающиеся санкции и др.), с каждым годом росли. По итогам 2024 г. согласно предварительным данным на территории России произведено электронной продукции, включая компоненты и аппаратуру, на 3.36 трлн руб.

Численность сотрудников отрасли выросла за этот же период только на 10%. С одной стороны, этого недостаточно, и оценки показывают, что до 2030 г. отрасли понадобится еще не менее 50 тыс. чел. С другой стороны, более быстрый рост объема производства по сравнению с численностью персонала показывает, что производительность труда в отрасли растет опережающими темпами. Выработка на одного сотрудника в год достигла 6 млн руб.

Важным индикатором эффективности государственной политики в сфере электроники является ускоренный рост номенклатуры российской электронной продукции. По итогам 2024 г. в реестре российской радиоэлектронной продукции[2] было более 29 тыс. позиций, из них не менее 20% составляли электронные компоненты. Это касается не только промышленного сектора, но и товаров потребления. В частности, российские ноутбуки и планшеты уже не являются редкостью. Они продаются в рознице и многие бренды вполне конкурентоспособны по цене и качеству с иностранными аналогами.

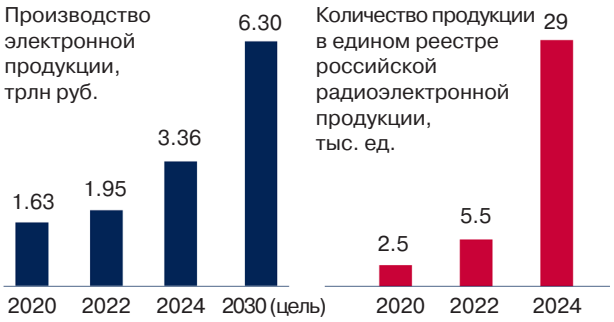


Рис. 1. Динамика показателей развития отрасли в 2020–2024 гг.

Такая динамика стала возможной во многом благодаря запуску системного комплекса инструментов поддержки и кратному росту финансирования отрасли (рис. 2). Важно отметить, что спектр мер поддержки рассчитан на все этапы жизненного цикла от разработки до производства и внедрения электронной продукции [1]. В основном это субсидиарные меры поддержки, где компенсируется часть затрат организаций на создание новых технологий и продуктов, взамен требуется выполнение показателей по коммерциализации разработок. Всего по состоянию на начало 2025 г. в контуре

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 года № 20-р «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности до 2030 года». http://government.ru/docs/38795/. Дата обращения 07.05.2025. [Order of the Government of the Russian Federation No. 20-r dated January 17, 2020 “On Approval of the Strategy for the Development of the Electronic Industry until 2030.” http://government.ru/docs/38795/ (in Russ.). Assessed May 07, 2025.]

[2] https://gisp.gov.ru/pp719v2/pub/prod/rep/. Дата обращения 07.05.2025. / Assessed May 07, 2025.

Минпромторга России[3] реализуется свыше 500 проектов, из которых более 100 находятся на стадии коммерциализации. Новой продукции уже реализовано примерно на 100 млрд руб. Бюджетное финансирование в период 2020–2024 гг. составило свыше 430 млрд руб., на следующий трехлетний период запланировано на уровне 250 млрд руб.

Кроме того, еще более 240 проектов в области электроники реализуется фондами и институтами развития: это Российский научный фонд[4], Фонд содействия инновациям[5], Фонд перспективных исследований[6], Фонд развития промышленности[7], Фонд «Сколково»[8], Агентство по технологическому развитию[9].

Кроме прямых финансовых мер стимулирования конкретных проектов одной из значимых мер поддержки предприятий и организаций отрасли является предоставление налоговых льгот в части страховых взносов и налога на прибыль[10, 11]. На сегодняшний день льготами пользуются более 600 предприятий отрасли. За 2022–2024 гг. предприятия и организации электроники сэкономили более 180 млрд руб. Это сопоставимо с объемами прямой государственной поддержки.

Отрасль демонстрирует неплохие темпы роста, но руководством страны ей определены еще более амбициозные цели. Новый импульс развитию отрасли придало решение Президента Российской Федерации В.В. Путина, утвердившего «Основы государственной политики Российской Федерации в области развития электронной и радиоэлектронной промышленности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу»[12] – основной стратегический документ развития электроники. Генеральной целью провозглашен технологический суверенитет российской электроники. В документах также утверждены индикаторы достижения этой цели (рис. 3), в т.ч.:

1) продолжение роста выручки отрасли до 6.3 трлн руб. в год (прирост в 2.4 раза к 2023 г.);
2) обеспечение внутренних потребностей в электронной продукции не менее, чем на 70%;
3) обеспечение суверенитета в области ресурсов и средств производства;
4) дальнейшее технологическое развитие и освоение в промышленном производстве 28 нанометровых топологических норм и ниже.

Также необходимо обеспечивать освоение новых материалов, что особенно актуально для сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники, силовой электроники и оптоэлектроники. На сегодняшний день, в частности, сверстаны конкретные планы освоения технологий использования арсенида и нитрида галлия, кремний-германия, карбида кремния [1].

Для сохранения динамики развития отрасли и для достижения целевых ориентиров необходимо повысить эффективность работы внутри отрасли, чтобы оптимизировать меры поддержки и получить синергетический результат. На микроуровне – на уровне экономики предприятий отрасли – конкретной целью является повышение эффективности производства и рост производительности труда. Все инструменты здесь известны: принципы бережливого производства [2], научной организации труда[13], а положительные эффекты от них уже неоднократно подтверждались[14].

Если подниматься на уровень выше, который можно назвать мезоуровнем управления [3], то это рост эффективности взаимодействия всех участников отрасли как между собой, так и с внешними поставщиками и потребителями продукции

[3] Минпромторг России. https://minpromtorg.gov.ru/ Дата обращения 07.05.2025. [Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. https://minpromtorg.gov.ru/ (in Russ.). Assessed May 07, 2025.]

[4] https://rscf.ru/. Дата обращения 07.05.2025. / Assessed May 07, 2025.

[5] https://fasie.ru/. Дата обращения 07.05.2025. / Assessed May 07, 2025.

[6] https://fpi.gov.ru/. Дата обращения 07.05.2025. / Assessed May 07, 2025.

[7] https://frprf.ru/. Дата обращения 07.05.2025. / Assessed May 07, 2025.

[8] https://sk.ru/. Дата обращения 07.05.2025. / Assessed May 07, 2025.

[9] https://atr.gov.ru/. Дата обращения 07.05.2025. / Assessed May 07, 2025.

[10] Постановление Правительства Российской Федерации от 22 июля 2022 г. № 1310 «Об утверждении перечня электронной (радиоэлектронной) продукции для целей применения пониженных налоговых ставок по налогу на прибыль организаций и тарифов страховых взносов». http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208010004. Дата обращения 07.05.2025. [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1310 dated July 22, 2022 “On Approval of the List of Electronic (Radioelectronic) Products for the Purposes of Application of Reduced Tax Rates for Corporate Profit Tax and Tariffs of Insurance Contributions.” http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208010004 (in Russ.). Accessed May 07, 2025.]

[11] Постановление Правительства Российской Федерации от 22 июля 2022 г. № 1311 «Об утверждении перечня материалов и технологий для производства электронной компонентной базы (электронных модулей) для целей применения пониженных налоговых ставок по налогу на прибыль организаций и тарифов страховых взносов». http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208010009. Дата обращения 07.05.2025. [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1311 dated July 22, 2022 “On Approval of the List of Materials and Technologies for the Production of Electronic Component Base (Electronic Modules) for the Purposes of Applying Reduced Tax Rates for Corporate Profit Tax and Insurance Contributions Tariffs.” http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208010009 (in Russ.). Accessed May 07, 2025.]

[12] Указ Президента Российской Федерации от 12 мая 2023 г. № 344. [Decree of the President of the Russian Federation No. 344 dated May 12, 2023 (in Russ.).]

[13] https://национальныепроекты.рф/news/umnaya-optimizatsiya-chto-takoe-berezhlivoe-proizvodstvo-i-zachem-ego-vnedryat/. Дата обращения 07.05.2025. / Accessed May 07, 2025.

[14] https://производительность.рф/. Дата обращения 07.05.2025. / Accessed May 07, 2025.

Рис. 2. Меры поддержки отрасли

Рис. 3. Обеспечение технологического суверенитета в электронике

электроники в целях достижения стратегических показателей, установленных на высшем макроуровне Президентом Российской Федерации и Правительством Российской Федерации (рис. 4). Фундаментом здесь являются достижения российской электроники в недалеком прошлом [4, 5], а действенным инструментом может быть возрождение успешной технологии отраслевого планирования и управления – Генеральной схемы развития и размещения производительных сил электронной промышленности на стратегическую глубину планирования [6, 7]. В основе качественного планирования должна быть достоверная и полная информация о реальном состоянии производительных сил электронной промышленности. Это может обеспечить только полная инвентаризация в отрасли вне зависимости от различных организационно-правовых форм юридических лиц и их форм собственности. Руководству отрасли это позволит представлять реальную картину экономики электронной промышленности и помочь

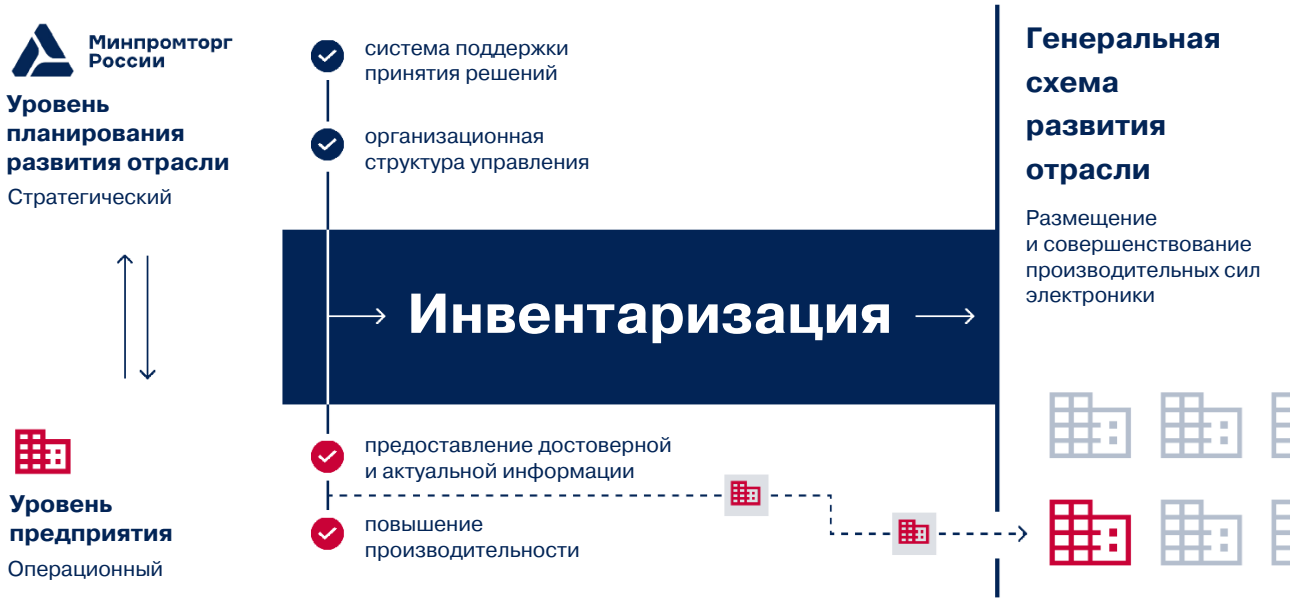


Рис. 4. Стратегическое планирование развития отрасли

каждой организации найти оптимальное применение своим компетенциям и квалификациям. Выигрыш от инвентаризации будет обоюдный.

2. НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ Д.Э.Н., ПРОФЕССОРА В.М. СИМЧЕРЫ

Всеобщую инвентаризацию электроники, да и всей экономики России, в своих научных трудах д.э.н., профессор Симчера Василий Михайлович определял как «единовременный учет (перепись, ценз, ревизию, переоценку) всех наличных материальных, трудовых, финансовых и интеллектуальных активов отрасли (страны), комплексно характеризующих ее общее состояние и достояние, ее совокупное национальное богатство по всем формам собственности и всем видам и направлениям деятельности в конкретных условиях пространства и времени»[15].

Результаты инвентаризации В.М. Симчера видел в качестве «самого полного источника первичных данных, самого надежного инструмента верификации существующих оценочных баз больших данных и баз знаний, их основу основ, своеобразную исходную точку отсчета, вне или в обход которой невозможно даже в самой грубой форме выверять и номинировать состояние страны»[16]. Развитие событий с февраля 2022 г. демонстрирует то, что вопрос о проведении инвентаризации явно перезрел. Экономика России стала получать неожиданные удары западных агрессоров по болевым точкам, которые до этой поры казались вполне надежными.

Без точного знания состояния производительных сил экономики как в любой конкретный момент, так и в динамике от прошлого до будущего невозможно видеть целое, измерять достижения и неудачи, объективно оценивать свое состояние и потенциал как в благоприятных, так и в критических ситуациях. Без глубокого знания всей системы производительных сил экономики страны во всем многообразии и целостности производственно-хозяйственных связей невозможно избежать грубых ошибок и развивать дееспособную систему управления.

До сих пор вызывает изумление тот факт, что российскую приватизацию ее исполнители провели, не имея на руках научно обоснованных данных о роли каждого предприятия в жизни страны, которые можно было получить лишь в результате тотальной инвентаризации. Только этот факт ставит под большой вопрос идеи обвальной приватизации имущества, принадлежавшего согласно Конституции[17] всем гражданам страны в равной, ненаследуемой и неотчуждаемой доле. В первую очередь эти необдуманные, поспешные и вредоносные действия сказались на самых передовых отраслях национальной экономики в целом и электроники в частности.

Очень трудно количественно оценить ущерб, который был нанесен России руководителями приватизации в 90-х гг. прошлого века, поэтому воспользуемся оценками В.М. Симчеры. Ущерб народному

[15] Рукописные архивы д.э.н., проф. В.М. Симчеры. [Manuscript archives of Dr. of Economics, Prof. V.M. Simchera (in Russ.).]

[16] Там же. [Ibidem.]

[17] Конституция СССР, глава 2 «Экономическая система», статья 10 (принята на внеочередной седьмой сессии Верховного Совета СССР девятого созыва 7 октября 1977 г.). [Constitution of the USSR, Chapter 2 “Economic System”, Article 10 (adopted at the Extraordinary Seventh Session of the Supreme Soviet of the USSR of the Ninth Convocation on October 7, 1977) (in Russ.).]

хозяйству и населению Советского Союза в годы Великой Отечественной войны он оценил в 1.0 трлн американских долларов середины XX века или в 17.9 трлн долларов, которые обращались в 90-е гг. Приватизацию и развал СССР В.М. Симчера оценил не менее, чем в 100 трлн современных американских долларов [8, 9]. Этот ущерб сейчас пытаются компенсировать Президент Российской Федерации и Правительство Российской Федерации.

Инвентаризация в форме классических цензовых обследований в развитых странах, как правило, с середины XIX века проводится на регулярной основе раз в 5–10 лет. В России всеобщих регулярных переписей никогда не было, а поэтому не могло быть достоверного кадастра данных и полноценной статистики экономики России.

3. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ

В России приняты к исполнению более 80 различных документов стратегического планирования и программ развития (например, «Стратегия развития электронной промышленности России до 2030 года»[18], «Стратегия производства струнных музыкальных инструментов»[19] и т.п.). Причем все они составлены на основе различных мировоззренческих платформ, методов целеполагания, размерности, объема и охвата решаемых задач. Каждый инициатор таких документов видит эту стратегию как главенствующую, поэтому предлагаются механизмы и технологии достижения поставленных целей без (даже самого общего) представления о реально имеющихся ресурсах, возможностях, т.к. целостного представления о структуре, мощности, размещении производительных сил на сегодняшний день нет ни у кого. Понятно, что разрозненные и не сводимые в единое целое документы стратегического планирования и программы развития могут быть реализованы лишь случайно и, как показывает предыдущий опыт, лишь фрагментарно. И, если срыв выпуска струнных музыкальных инструментов будет неприятным фактом, то отсутствие электронных компонент, аппаратуры и электронных изделий будет катастрофой для экономики всей страны.

Нельзя впадать и в другую крайность – все средства вкладывать в электронику, т.к. пропорционально должны расти потребители электронной продукции, иначе не будет спроса. Но метрически зафиксировать имеющиеся пропорции в экономике страны и динамически спрогнозировать максимально сбалансированное развитие отраслей и предприятий как производителей электроники, так и ее потребителей, без тотальной и ответственной инвентаризации просто невозможно. Следовательно, уже на этом шаге научного анализа понятно, что только многовекторное детальное и достоверное знание структуры производительных сил каждой отрасли и экономики страны в целом может обеспечить рост производства электронной продукции в меру пропорционального роста мощностей производителей и платежеспособного спроса потребителей электроники.

Тотальная инвентаризация необходима в кратчайшие сроки. Она должна опираться на унифицированные базы данных и знаний, на единое функциональное и инструментальное обеспечение, которое, к сожалению, пока лишь формируется в научной среде. По своей размерности, структуре, масштабу, охвату, множеству фиксируемых факторных показателей и схем их многомерного функционально-стоимостного анализа, техническим регламентам, стандартам, регистрам и другим основополагающим системным характеристикам электронная промышленность в частности и экономика страны в целом не имеют аналогов в мире, поэтому любые заимствования иностранного инструментария непригодны для практических целей.

Для успешного управления экономикой страны, отраслью, предприятием, городом, семьей необходима достоверная информация, представляющая неискаженный образ любого управляемого объекта или процесса, его адекватная виртуальная модель, которую сейчас можно формировать в цифровом виде. Такой образ не создать на основе аналитического «среднепотолочного» представления. Для этого необходимо из первых рук получить подлинные (онтологические) первичные данные, которые можно собрать и обработать лишь путем проведения тотальной инвентаризации экономических и хозяйствующих объектов и процессов, в которых они задействованы. Между двумя смежными инвентаризациями необходимо регулярно проводить уточняющие сплошные или выборочные, статистические и нестатистические замеры изменений и динамики производительных сил. Такой свод интеллектуальных, организационных, материально-технологических и финансовых ресурсов, выделяемых для развития электроники, в настоящее время формируется в Минпромторге России. Эта задача

[18] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 года № 20-р «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности до 2030 года». http://government.ru/docs/38795/. Дата обращения 07.05.2025. [Order of the Government of the Russian Federation No. 20-r dated January 17, 2020 “On Approval of the Strategy for the Development of the Electronic Industry until 2030.” http://government.ru/docs/38795/ (in Russ.). Accessed May 07, 2025.]

[19] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 июня 2021 года № 1582-р «Об утверждении Стратегии развития индустрии музыкальных инструментов и звукового оборудования на период до 2030 г.». http://government.ru/docs/42466/. Дата обращения 07.05.2025. [Order of the Government of the Russian Federation No. 1582-r dated June 11, 2021 “On Approval of the Strategy for the Development of the Musical Instruments and Sound Equipment Industry for the Period until 2030.” http://government.ru/docs/42466/ (in Russ.). Accessed May 07, 2025.]

вполне укладывается в рамки достижений российских разработчиков платформ больших данных [10] и легко покрывается возможностями российских суперкомпьютеров[20].

Наступивший в экономике страны процесс адаптации к западным санкциям и планирование развития российской экономики могут стать более эффективными в условиях получения достоверных данных обо всех элементах структуры производительных сил (производственных мощностей и квалифицированного персонала) и потенциале их эффективного использования в современных условиях внешней среды. Чтобы не брать на себя невыполнимые обязательства, необходимо провести полную инвентаризацию, а за эффективное использование производственных фондов установить конкретных ответственных исполнителей.

В результате отсутствия достоверной информации о производительных силах страны, включая и отсутствие строгого контроля за топ-менеджерами, российская экономика развивается темпами, недостаточными для обгона современных лидеров в электронике. Это касается и электроники, и золотовалютных резервов, и товаров длительного пользования, и продовольствия. Без научно обоснованной и выверенной практики, где первостепенную роль играет тотальная инвентаризация, перейти на ступень суверенитета будет крайне затруднительно. Как бы ни были неотложны дела по ответу на санкции и вызовы, нельзя пренебрегать важным и несрочным делом по инвентаризации, которое в долгосрочной перспективе даст стране и населению устойчивый положительный эффект в развитии.

Десятилетия вместо совместной и созидательной работы по инвентаризации экономики «эффективные менеджеры» боролись за некие западные рейтинги, наподобие Moody's[21], Fitch Ratings[22], и сообщали о повышении рейтинга страны, вуза, банка и т.д. Чем закончилась их борьба сейчас наглядно видно, хотя с экономикой России ничего катастрофического не произошло.

В новых условиях экономической войны запада против России очевидно, что требует разработки и общенародного обсуждения самостоятельная инвентаризационная стратегия-программа, которая должна перейти в разработку организационных структур управления отраслями и создание Генеральной схемы развития и размещения производительных сил страны в отраслевом, территориальном и обобщающем форматах [1]. Первый шаг в виде Генеральной схемы развития электроэнергетики Правительством Российской Федерации[23] уже сделан.

4. ОБЪЕКТ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ

Если встать на позиции системного подхода к инвентаризации, то ее объектами должны стать отраслевые и территориальные пропорции размещения производительных сил и вытекающие из этого параметры темпов развития социально-экономических процессов в России.

Многие «независимые» эксперты пытаются сравнивать состояние экономики России и западных стран. Однако они не учитывают, что Российская империя в 1917 г. и СССР в 1991 г. потеряли 5.3 млн кв. км или почти 1/4 часть своих территорий, более 140 млн чел. или половину общей численности населения, 2/3 производственного потенциала и накопленного национального богатства. Таких огромных потерь не знало ни одно государство за всю тысячелетнюю историю. Если в расчеты и рейтинги эти потери включить, то выводы будут совершенно противоположные.

Годы развития экономики страны после разрушительной приватизации продемонстрировали, что либерально-капиталистическая модель общества лишена единства взглядов на целостную систему социально-экономических отношений, и, соответственно, не способна реализовать эффект синергетического умножения производительных сил и производственных отношений. Либеральная глобализация приводит лишь к потере суверенитета и запредельной зависимости страны от мировых транснациональных корпораций. Президент Российской Федерации В.В. Путин в самом общем виде сформулировал тезис, что умирающий либерализм[24] и приватная собственность[25] [11]

[20] http://top50.supercomputers.ru/newsfeed. Дата обращения 07.05.2025. / Accessed May 07, 2025.

[21] https://ratings.moodys.com. Дата обращения 07.05.2025. / Accessed May 07, 2025.

[22] https://fitchratings.com/. Дата обращения 07.05.2025. / Accessed May 07, 2025.

[23] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2024 года № 4153-р «Об утверждении Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года». http://government.ru/docs/53923/. Дата обращения 07.05.2025. [Order of the Government of the Russian Federation No. 4153-r dated December 30, 2024 "On Approval of the General Scheme of Electric Power Industry Facilities Location until 2042." http://government.ru/docs/53923/ (in Russ.). Accessed May 07, 2025.]

[24] Интервью Президента Российской Федерации В.В. Путина в преддверии саммита G-20. http://www.kremlin.ru/events/president/news/60836. Дата обращения 07.05.2025. [Interview with the President of the Russian Federation V.V. Putin on the eve of the G-20 summit. http://www.kremlin.ru/events/president/news/60836 (in Russ.). Accessed May 07, 2025.]

[25] Приватная собственность (private) – это часть общенациональной собственности, попавшая в зависимость от капиталистов (например, закрытие предприятий в России). Частная собственность (partial) – это общенациональная собственность, которая передается частным управленцам, которые могут обеспечить ее наиболее эффективное применение. [Private property is a part of national property that has become dependent on capitalists (e.g., the closure of enterprises in Russia). Partial property is the national property that is transferred to private managers who can ensure its most efficient use.]

не созидают и, соответственно, не объединяют, а корыстно разъединяют людей, что неизбежно приведет к провалу экономической политики страны. Либералы в течение всего современного исторического периода пытались диктовать миру свою волю. Но т.к. их воля исходила из интересов и ценностей властителей искусственной среды обитания человека – капиталистической экономики, то она постоянно конфликтует с естественными интересами большинства людей.

Для следования курсом, намеченным Президентом Российской Федерации В.В. Путиным[26], приватную собственность, появившуюся в ходе необдуманной и поспешной приватизации, следует планомерно заменять частной собственностью, которую следует понимать как часть общегосударственной собственности, функционирующей как единый целостный ансамбль. Это корень и квинтэссенция экономического суверенитета страны.

Не нужно доказывать, что, несмотря на современную противоречивую российскую действительность и череду санкций против России и ее граждан, будущие перемены могут быть только конституционными, а реформы – оптимальными по скорости и глубине, учитывающими реальные инерционные процессы и национальные традиции.

Президент Российской Федерации В.В. Путин проводит следующую линию: все процессы в российском обществе и экономике должны вытекать из консенсуса общественного договора, стать программой общегражданского согласия, объединяющей на началах здравого смысла здоровые силы российского общества и союзников. Успех электронной промышленности как самой технологичной отрасли страны и общий прогресс дружественных стран будут характеризоваться скоростью и масштабами всеобщего перехода от нынешней приватной экономики к частной экономике прагматического альтруизма. Производство различных благ с условием обязательного воспроизводства ресурсов в окружающей природе с целью гарантированного обеспечения базы для устойчивого развития будущих поколений следует рассматривать в качестве нормы будущих социально-общественных отношений. Именно такой мировоззренческий критерий должен лечь в основу инвентаризации производительных сил страны и разработки Генеральной схемы развития экономики в целом и электроники в частности. Системный мировой экономический кризис мы можем и должны использовать как шанс для гармонического развития экономики и общества в России и в странах, разделяющих российскую систему ценностей.

Таким образом, объектом инвентаризации является вся система социально-экономических отношений в России, в которых возрастающую и незаменимую роль играет электроника. Сейчас уже ясно, что, ухватившись за данное решающее звено, можно вытащить на новую фазу прогресса всю цепь, а первым шагом должна стать общенациональная инвентаризация.

Инвентаризация должна метрически точно отразить реальные преимущества российской экономики, включая обширные природные и квалифицированные людские ресурсы, используемые приватными собственниками едва ли на одну треть от их полезной мощности. Костяк былого интеллектуального и военного потенциала страны удалось сохранить, а в последнее время даже приумножить, но статистически это преимущество пока не измерено, а значит, его трудно эффективно использовать. Поступательное совершенствование законодательного, информационного и административно-технического обеспечения экономики страны уже дает ощутимые результаты, особенно в условиях беспрецедентного санкционного давления на страну и экономику. Благодаря настойчивому осуществлению научных программ открыты новые «окна возможностей» для перехода российской экономики на шестой уклад [12, 13] будущего развития России и мира. Электроника в этом процессе занимает и будет занимать одно из первых мест.

Методы и инструменты управления экономикой страны и любой отраслью должны выбираться в зависимости от достоверности, полноты и целостности знаний о социально-экономическом положении и об объективных потребностях развития экономики и общества. Сейчас фактически ни один управленец, начиная с микроуровня предприятий и заканчивая мезо- и макроуровнями, не может быть уверенным в оценке текущего состояния управляемого им объекта и в формировании выигрышной цели дальнейшего развития в силу отсутствия целостной картины и невозможности оценить риски за предельно узкой границей сферы возможностей. Уинстон Черчилль говорил, что доверяет лишь той статистике, которую сам сфальсифицировал. Без инвентаризации нет понимания, сфальсифицированы ли сведения о состоянии дел в экономике, и кто именно и как их фальсифицировал. Сегодня уже и не наблюдаются сторонники размещения резервов страны в западных финансовых юрисдикциях, а не в производственном потенциале страны. Легко представить, что бы сейчас говорили в НАТО и Евросоюзе, если бы замороженные 300 млрд долларов[27] были вложены в производственный потенциал российской электроники и смежных отраслей.

[26] Путин В.В. Форум АСИ «Сильные идеи для нового времени», 2022. http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/69039. Дата обращения 07.05.2025. [Putin V.V. ASI Forum “Strong Ideas for New Times,” 2022. http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/69039 (in Russ.). Accessed May 07, 2025.]

[27] https://www.rbc.ru/economics/13/03/2022/622dd6ee9a7947081b63341c?ysclid=m3ujyuye2217113543. Дата обращения 07.05.2025. / Accessed May 07, 2025.

В своих последних статьях и выступлениях В.М. Симчера авторитетно утверждал, что ни одна из социально-экономических программ в России в XXI веке так и не была выполнена [14]. Можно, конечно, некоторых чиновников обвинить в некомпетентности, но в своем большинстве российские управленцы и ученые искренне желали исполнения намечаемых планов. Это лучшее доказательство того, что принимавшие плановые ориентиры специалисты просто не представляли, где они находятся.

Хотелось бы особо подчеркнуть, что специалисты органов управления экономикой в деталях представляют истинное положение дел в сфере их компетенций, но жизнь идет своим чередом. Люди переходят на другую работу, выходят на пенсию и т.п. Вместе со специалистами из кабинетов исчезают и знания, носителями которых они были. Новым назначенцам необходимо время для формирования целостного представления о порученном деле, что тормозит развитие. Вот почему инвентаризация, организационная структура управления и Генеральная схема развития производительных сил отраслей и экономики в целом должны быть оформлены в виде целостных, но постоянно обновляемых данных, утверждаемых на высоком государственном уровне. В таком случае люди могут меняться, но у новичков будет формализованная исходная база и материальные следы ее развития предыдущим руководителем. Это существенно повысит эффективность управления, особенно на отраслевом мезоуровне и значительно повысит ответственность чиновников за принимаемые ими решения, которые будут отражаться в качестве авторских новаций в организационной структуре и Генеральной схеме развития отрасли.

5. МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ

Разработанная группой специалистов под руководством В.М. Симчеры программа инвентаризации производительных сил страны включала 77 мероприятий, которые должны обеспечить органы управления достоверной информацией в разрезе 280 показателей. Здесь целесообразно рассмотреть наиболее значимые для электроники положения.

Электроника в период до 2020 г. серьезно недофинансировалась, а спрос на ее продукцию рос опережающими темпами. Как отмечено выше, к настоящему времени приняты верные решения о существенном увеличении капиталовложений в отрасль. В этих условиях особенно важно сбалансировать их по времени, территориальному размещению и технологическому уровню с параллельной подготовкой специалистов для будущих новых производственных мощностей. Санкции, к счастью, вынуждено развернули российских потребителей, заказывавших ранее электронику иностранного производства, лицом к российским производителям. Инвентаризация должна дать четкое представление о текущем и перспективном соотношении между первичными факторами производства – основными средствами и высококвалифицированным персоналом как во временном, так и в территориальном разрезах.

Одним из узких мест в электронике является быстрое моральное устаревание производственно-технологического потенциала предприятий, которое иногда значительно опережает темпы физического износа оборудования. Сплошная перепись и стоимостная оценка оборудования электронной промышленности позволят оптимизировать нормативы амортизационных отчислений, а также сформировать подход к определению типов оборудования, подлежащих ускоренной амортизации. Данный «бухгалтерский» вопрос для предприятий электронной промышленности является столь значимым, что откладывать его решение нельзя ни при каких обстоятельствах. Иначе технологическое отставание отрасли будет нарастать и может стать катастрофическим.

Одним из значимых факторов эффективности электроники и экономики в целом являются факторы специализации, кооперации и оптимального размера предприятий. Глобальные конкуренты представлены гигантскими транснациональными корпорациями с тысячами малых и средних сателлитов вокруг главного хозяйствующего субъекта. Приватизация, разрушившая отраслевые, межотраслевые связи кооперации и кластеры соисполнителей по всей цепочке от научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) до выпуска готовых изделий, пока еще не была оценена с позиции оптимальности и эффективности современного производства. Без сплошной инвентаризации сложившееся положение трудно измерить и практически невозможно усовершенствовать. В этой связи инвентаризации и глубокому научному аудиту должны подвергнуться все существующие в министерствах и ведомствах отчеты о выполненных НИОКР, а полученные результаты выставлены на аукцион для их коммерциализации на основе государственно-частного партнерства.

Кроме того, инвентаризация позволит метрически взвесить все факторы, влияющие на производительность труда, и сформировать ясную программу формирования необходимого количества высокопроизводительных рабочих мест.

Большой проблемой для развития является разрыв между результативностью работы предприятий, отраслей и экономики в целом, измеренных в натуральном

и стоимостном измерителях. Кроме решения задачи оценки производственно-технологического потенциала отраслей, инвентаризация позволит наладить и настроить учет производимой продукции, максимально приближенный к конечным физическим и натуральным результатам, отражающим реальные сдвиги в экономике и фактическое положение людей в обществе. Это не частная задача, а вопрос управляемости, т.к. искусственные конъюнктурные стоимостные показатели в условиях галопирующей инфляции и господства теневой экономики мало что отражают, кроме ошибок и погрешностей. Это также позволит измерять благосостояние населения в натуральных единицах.

Уже сегодня есть инструменты, которые позволят провести первую волну инвентаризации промышленности – в разрезе как производственных мощностей предприятий, так и выпускаемой ими продукции. Так, на платформе государственной информационной системы промышленности (ГИСП)[28] сформирован каталог промышленной продукции, производимой на территории России. Каталог содержит информацию о более чем 1.6 млн единиц продукции, в т.ч. более 360 000 единиц российской промышленной продукции с указанием на производителя, товарную номенклатуру Евразийского экономического союза, а также в отношении отдельных товаров российской радиоэлектронной продукции – на компонентный состав российского происхождения. В части российской радиоэлектронной продукции на базе каталога выстраивается вся система преференций и государственной поддержки отрасли. Актуальность и полнота информации о подтверждении российского происхождения реализуется автоматически в рамках интеграционного взаимодействия с сервисом реализации Постановления Правительства Российской Федерации от 17 июля 2015 г. № 719[29].

В ГИСП существует и инструментарий для описания производственных мощностей предприятий, внесения информации об объемах производства, отгрузки и продажи товаров, в т.ч. на экспорт, о самих промышленных предприятиях и характеристиках выпускаемой ими промышленной продукции с учетом отраслевой принадлежности и об уровне цифровой зрелости промышленных предприятий. Проверка и оперативный мониторинг финансово-экономического состояния системообразующих производителей промышленной продукции также позволяет в режиме реального времени оценивать экономическую стабильность производителей.

Будучи дополненной необходимой отраслевой достоверной статистикой, результатами анализа «больших данных» из открытых источников, формируемая база знаний создает задел для инвентаризации, а формируемые возможности бесшовной интеграции ГИСП с учетными системами предприятий упрощают механизм оперативного автоматизированного сбора и обработки необходимых сведений. Текущий уровень развития ГИСП позволяет уже сейчас начать инвентаризацию производимой на территории России промышленной продукции и выпускающих ее предприятий. Это составит основу для территориально-производственного планирования на стратегическую глубину.

Кроме того, на сегодня спроектирована базовая архитектура отраслевой системы поддержки принятия решений. Разрабатываемый комплекс «Мультиагентной сетецентрической модели управления ресурсами электроники» [15], «Организационной структуры управления бизнес процессами отрасли» и «Генеральной схемы развития и размещения производительных сил электроники на период до 2050 года» составит основу для стратегического планирования развития электронной промышленности, начиная с детализации целей и задач, стоящих перед национальной экономикой (отраслями, территориями), которые сформулированы руководством страны, и заканчивая оптимизацией отраслевой кооперации и логистическим сопряжением соисполнителей как госзаданий и госзаказов, так и предприятий, работающих на нерегулируемый рынок.

В целях наполнения качественными данными за последние годы были проведены отдельные системные аналитические исследования в области развития электронного машиностроения (включая материалы, химию), технологий фотоники, кадрового обеспечения. Это позволило утвердить комплексные программы развития электронного машиностроения и фотоники. Однако еще предстоит завершить такую работу в области технологий микроэлектроники, силовой и СВЧ-электроники, пассивной электроники и электротехники, а также продолжать расширять комплексные исследования состояния и перспектив развития всех технологий в электронике, настроить системы отраслевой и государственной статистики, определить подходы к территориально-производственному планированию и составлению межотраслевых балансов [16].

Инвентаризация должна стать отправной точкой для фундаментального внедрения цифровых технологий в управление электронной промышленностью, блок-схему которого можно представить в следующем виде (рис. 5).

[28] https://gisp.gov.ru/. Дата обращения 07.05.2025. / Accessed May 07, 2025.

[29] http://government.ru/docs/all/102816/. Дата обращения 07.05.2025. / Accessed May 07, 2025.

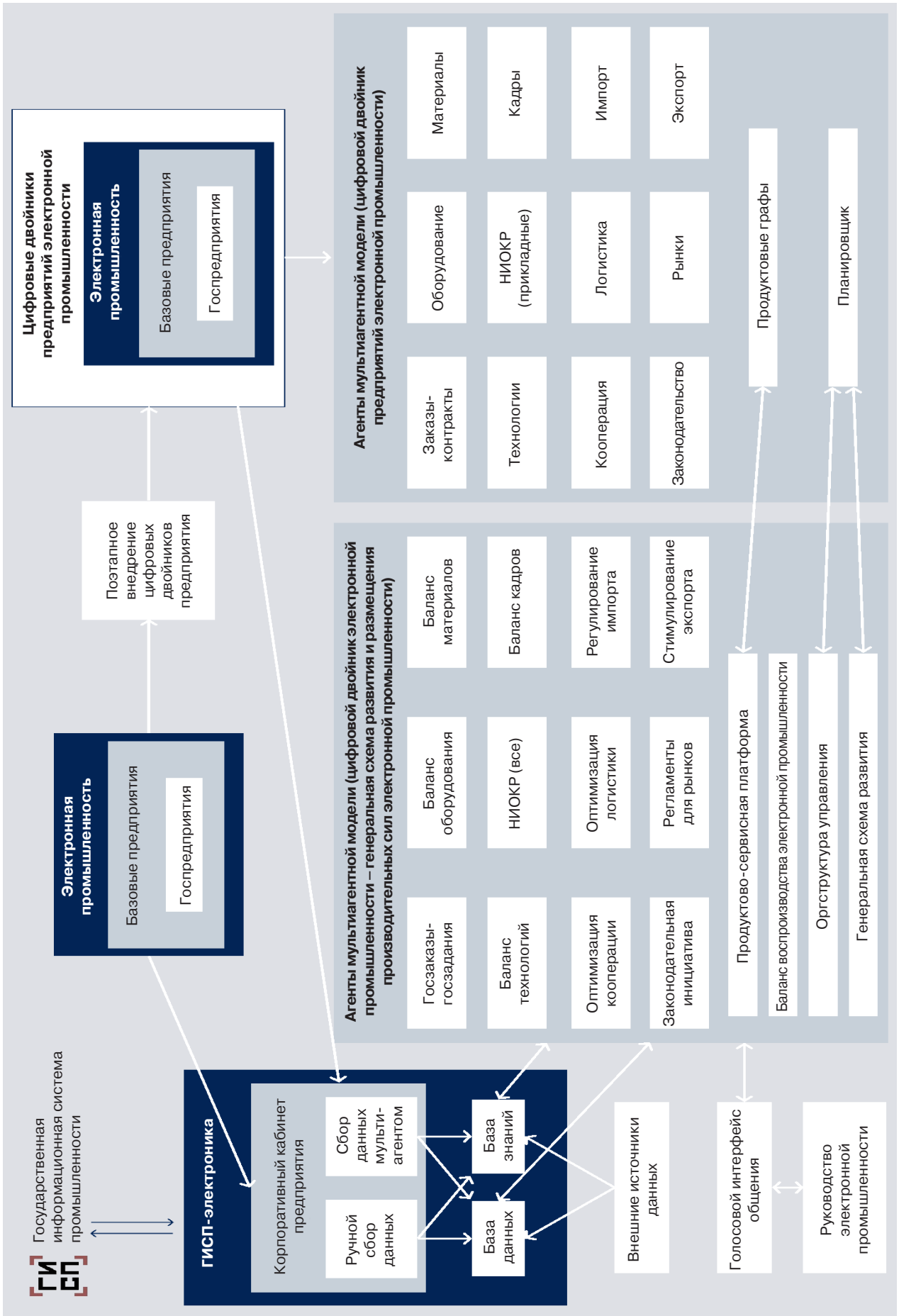


Рис. 5. Блок-схема управления электронной промышленностью на основе современных цифровых технологий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инвентаризация российской электронной промышленности в частности и экономики в целом позволит восстановить достоверность статистических данных, которая ныне вызывает наибольшие сомнения. Систематизация и оценка полученных данных позволят более ответственно противостоять утечке чувствительной информации из России.

Чтобы подготовить, провести и продолжить эту важнейшую работу необходимо восстановить в России работу по оперативному отслеживанию динамики проинвентаризированных параметров экономики России и их сопоставление с лучшими мировыми научно-техническими и технологическими достижениями и стандартами. Следует возродить методическую и фактологическую работу по формированию необходимых балансов, начиная с отдельных продуктовых графов, связывающих всех соисполнителей, и продуктово-сервисных платформ, которые балансируют воспроизводственный процесс в масштабе подотраслей электронной промышленности, и заканчивая отраслевым балансом заказанных результатов с имеющимися ресурсами, причем в увязке с целостным межотраслевым балансом экономики страны. Синхронизация данной работы с национальной инвентаризацией обеспечит надежность не только отраслевого управления, но и поддержания пропорций всей экономики страны. Такой подход позволит синергетически ускорить темпы развития экономики сообщества дружественных стран и в кратчайшие сроки внедрить качественно новую платформу мезоэкономического управления в формате «цифровой двойник электронной промышленности – цифровые двойники предприятий электронной промышленности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпак В.В. *Развитие электронной промышленности в условиях меняющегося мира*. М.: Техносфера; 2024. 128 с. ISBN 978-5-94836-708-8
2. Лайкер Д. *Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира*: пер. с англ. М.: Альпина Паблишер; 2022. 492 с. ISBN 978-5-6047582-0-5
3. *Мезоэкономика: состояние и перспективы*: монография; под ред. Маевского В.И. М.: Институт экономики Российской академии наук; 2018. 314 с. ISBN 978-5-9940-0642-9
4. Шокин А.А. *Министр невероятной промышленности СССР*. М.: ЦНИИ «Электроника»; 1999. 373 с.
5. Шокин А.А. *Министр невероятной промышленности СССР*. М.: Техносфера; 2007. 455 с. ISBN 978-5-94836-151-2
6. Шпак В.В. Формирование организационно-управленческой модели реализации «Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года». *Вестник Челябинского государственного университета*. 2021;3(449):10–23. https://doi.org/10.47475/1994-2796-2021-10302
7. Шпак В.В. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации и ее финансовое обеспечение. *Экономика науки*. 2021;7(3):195–204. https://doi.org/10.22394/2410-132X-2021-7-3-195-204
8. Симчера В.М. Американские цензы. *Ученые записки по статистике АН СССР*. 1969;18:288–314.
9. Симчера В.М. Промышленные цензы США. *Вестник статистики*. 1970;1:45–54.
10. Шпак В.В. Основы мультиагентной планово-логистической модели управления воспроизводственным циклом отрасли в режиме «онлайн». *Фундаментальные исследования*. 2022;3:146–155. https://doi.org/10.17513/fr.43229
11. Рязанов А. *Народный социализм. Теория*. VI. М.: Ритм; 2020. 280 с. ISBN 978-5-98422-474-1
12. Переслегин С.Б. VI технологический уклад: пространство возможностей. *Экономические стратегии.* 2019;3:24–33.
13. Глазьев С.Ю. Новые подходы к организации предприятий в условиях смены технологического и мирохозяйственного укладов. В сб.: *Стратегическое планирование и развитие предприятий: пленарные доклады Двадцатого Всероссийского симпозиума*; под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. М.: ЦЭМИ РАН; 2019. С. 7–18.
14. Кретов С.И., Симчера В.М. Что после либерализма? *Общественно-политический журнал «Изборский клуб»*. 2020;9(85):90–115.
15. Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Laruchkin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A. The Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time. *Mathematics.* 2022;10(10):1662. https://doi.org/10.3390/math10101662
16. Канторович Л.В. Математика в экономике: достижения, трудности, перспективы. (Лекция в Шведской академии наук в связи с присуждением Нобелевской премии за 1975 год). *ЭКО* (*Экономика и организация промышленного производства*). 1976;3:123–133.

REFERENCES

1. Shpak V.V. *Razvitie elektronnoi promyshlennosti v usloviyakh menyayushchegosya mira* (*Development of the Electronics Industry in a Changing World*). Moscow: Tekhnosfera; 2024. 128 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-708-8
2. Liker J.K. *Dao Toyota: 14 printsipov menedzhmenta vedushchei kompanii mira* (*The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*): transl. from Engl. Moscow: Alpina Pablisher; 2022. 492 p. (in Russ.) ISBN 978-5-6047582-0-5

[Liker J.K. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. NY.: McGraw-Hill; 2004. 352 p. ISBN:0071392319]
3. Maevskii V.I. (Ed.). *Mezoekonomika: sostoyanie i perspektivy*: monografiya (*Mesoeconomics: State and Prospects*: monograph). Moscow: Institute of Economics, RAS; 2018. 314 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9940-0642-9
4. Shokin A.A. *Ministr neveroyatnoi promyshlennosti SSSR* (*Minister of Incredible Industry of the USSR*). Moscow: Central Research Institute "Electronics"; 1999. 373 p. (in Russ.).
5. Shokin A.A. *Ministr neveroyatnoi promyshlennosti SSSR* (*Minister of Incredible Industry of the USSR*). Moscow: Tekhnosfera; 2007. 455 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-151-2
6. Shpak V.V. Formation of the organizational and managerial model for the implementation of the "Strategy for the Development of the Electronics Industry of the Russian Federation for the period up to 2030." *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Chelyabinsk State University*. 2021;3(449):10–23 (in Russ.). https://doi.org/10.47475/1994-2796-2021-10302
7. Shpak V.V. Development Strategy for the Electronics Industry of the Russian Federation and its Financial Support. *Ekonomika nauki = Economics of Science*. 2021;7(3):195–204 (in Russ.). https://doi.org/10.22394/2410-132X-2021-7-3-195-204
8. Simchera V.M. American Censuses. *Uchenye zapiski po statistike AN SSSR*. 1969;18:288–314 (in Russ.).
9. Simchera V.M. Industrial Censuses of the USA. *Vestnik statistiki = Bulletin of Statistics*. 1970;1:45–54 (in Russ.).
10. Shpak V.V. Fundamentals of a Multi-Agent Planning and Logistics Model for Managing the Reproduction Cycle of the Industry in the "Online" Mode. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2022;3:146–155 (in Russ.). https://doi.org/10.17513/fr.43229
11. Ryazanov A. *Narodnyi sotsializm. Teoriya.* (*People's socialism. Theory*). VI. Moscow: Ritm; 2020. 280 p. (in Russ.). ISBN 978-5-98422-474-1
12. Pereslegin S.B. Technological Order VI: the Space of Opportunities. *Ekonomicheskie strategii = Economic Strategies*. 2019;3:24–33 (in Russ.).
13. Glaz'ev S.Yu. New approaches to the organization of enterprises in the context of changing technological and world economic modes. In: Kleiner G.B. (Ed.). *Strategic Planning and Evolution of Enterprises: Materials. 20th Russian Symposium.* Moscow: CEMI RAS; 2019. P. 7–18 (in Russ.).
14. Kretov S.I., Simchera V.M. What after liberalism? *Izborskii klub = Izborsky Club.* 2020;9(85):90–115 (in Russ.).
15. Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Laruchkin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A. The Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time. *Mathematics.* 2022;10(10):1662. https://doi.org/10.3390/math10101662
16. Kantorovich L.V. Mathematics in Economics: Achievements, Difficulties, Prospects. (Lecture at the Swedish Academy of Sciences on the Occasion of the Awarding of the Nobel Prize for 1975). *EKO = ECO*. 1976;3:123–133 (in Russ.).

Об авторе

Шпак Василий Викторович, к.э.н., доцент, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: morser@yandex.ru. https://orcid.org/0009-0002-3548-1070

About the Author

Vasily V. Shpak, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: morser@yandex.ru. https://orcid.org/0009-0002-3548-1070

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.
Подписано в печать 30.07.2025 г.
Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.
Уч.-изд. листов 18.50.
Тираж 50 экз. Заказ № 2965.

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 July 30, 2025.
Format 60 × 90/8. Digital print.
C.p.l. 18.50.
50 copies. Order No. 2965.

Subscription to the *Russian Technological Journal* printed version can be made through the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.
Subscription index: **79641**.