

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



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

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

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

Russian Technological Journal
2022, том 10, № 5

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 5

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



Russian Technological Journal
2022, том 10, № 5

Дата опубликования 30 сентября 2022 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 индексируется в РГБ, РИНЦ, elibrary, Соционет, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

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

Редакция:

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

119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

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

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

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

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 5

Publication date September 30, 2022.

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 in RSL (Russian State Library), Russian citation index, elibrary, Socionet, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's International Periodicals Directory.

Editor-in-Chief:

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

Editorial staff:

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

86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

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

The subscription index of *Pressa Rossii*: **79641**.

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Банис Юрас Йонович	хабилированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banyas@ff.vu.lt
Бетелин Владимир Борисович	академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
Боков Алексей Алексеевич	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, член Президиума 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, 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	член-корр. 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	профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Романов Михаил Петрович	д.т.н., профессор, директор Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Савиных Виктор Петрович	член-корр. 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	PhD (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	член-корр. 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	Habilitation 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	Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Sergey B. Vakhrushev	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Yury V. Gulyaev	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Dmitry O. Zhukov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, 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	Dr. Sci. (Eng.), Corr. Member of the RAS, 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	Professor, Dean of Research of Centrale Lille, Villeneuve-d'Ascq, France. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Mikhail P. Romanov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Viktor P. Savinykh	Corresponding Member of 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	Ph.D. (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	Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Yuri A. Chaplygin	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Departments of Nanotechnology and Information Technology of the RAS, President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
Vasilii V. Shpak	Cand. Sci. (Econ.), Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia; Associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *Р.В. Душкин, В.А. Лелекова, В.Ю. Степаньков, С. Фадеева*
Структура ассоциативно-гетерархической памяти
Д.Ю. Ильин
- 16** Программный фреймворк для экспериментальной оценки характеристик информационно-технологических решений в виртуальной среде
- 28** *Е.О. Ямашкина, С.А. Ямашкин, О.В. Платонова, С.М. Коваленко*
Разработка нейросетевой модели для анализа пространственных данных

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

- 38** *М.А. Волкова, М.П. Романов, А.М. Бычков*
Трекер объектов на спортивных мероприятиях

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 49** *М.Ю. Конопелькин, С.В. Петров, Д.А. Смирнягина*
Реализация алгоритмов обработки стохастических сигналов в САПР РЛС
- И.М. Шаров, О.А. Демин, А.А. Судаков, А.Д. Ярлыков*
- 60** Разработка и исследование системы бесперебойного питания в сетях с напряжением до 24 В

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

- В.В. Крутов, А.С. Сигов*
- 73** Технология формирования сегнетоэлектрических регулярных доменных структур с использованием интерферирующих упругих волн
- М.В. Назаренко*
- 92** Анализ источников магнетронного распыления для осаждения толстых слоев меди с высокой скоростью для изделий микроэлектроники

Аналитическое приборостроение и технологии

- 100** *В.В. Стерлядкин, К.В. Куликовский*
Измерение капиллярных волн лазерным волнографом

Мировоззренческие основы технологии и общества

- 111** *Е.В. Новосёлова, Н.И. Чернова, Н.В. Катахова*
Аксиологические аспекты преподавания испанского языка в СССР

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Roman V. Dushkin, Vasilisa A. Lelekova, Vladimir Y. Stepankov, Sandra Fadeeva*
Structure of associative heterarchical memory
- 16** *Dmitry Ilin*
Framework for experimental evaluation of software solutions in a virtual environment
- 28** *Ekaterina O. Yamashkina, Stanislav A. Yamashkin, Olga V. Platonova, Sergey M. Kovalenko*
Development of a neural network model for spatial data analysis

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

- 38** *Maria A. Volkova, Mikhail P. Romanov, Alexander M. Bychkov*
3D object tracker for sports events

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 49** *Maxim Yu. Konopel'kin, Sergey V. Petrov, Daria A. Smirnyagina*
Implementation of stochastic signal processing algorithms in radar CAD
- 60** *Igor M. Sharov, Oleg A. Demin, Alexander A. Sudakov, Alexey D. Yarlykov*
Development and research of uninterruptible power supply system for networks with supply voltage up to 24 V

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 73** *Vladislav V. Krutov, Alexander S. Sigov*
Technology for the creation of ferroelectric regular domain structures using interfering elastic waves
- 92** *Mariia V. Nazarenko*
Comparison of magnetron sputtering systems for high-rate deposition of thick copper layers for microelectronic applications

Analytical instrument engineering and technology

- 100** *Viktor V. Sterlyadkin, Konstantin V. Kulikovsky*
Measurement of capillary waves with a laser wave recorder

Philosophical foundations of technology and society

- 111** *Elena V. Novoselova, Nadezhda I. Chernova, Nataliya V. Katakhova*
Axiological aspects of teaching Spanish in the Soviet Union

УДК 004.825
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-7-15>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Структура ассоциативно-гетерархической памяти

Р.В. Душкин[®], В.А. Лелекова[®], В.Ю. Степаньков, С. Фадеева

Агентство Искусственного Интеллекта, Москва, 127591 Россия
[®] Авторы для переписки, e-mail: drv@aiagency.ru, lv@aiagency.ru

Резюме

Цели. Начиная с XX века методы искусственного интеллекта разделяют на две парадигмы – нисходящую и восходящую. Методы восходящей парадигмы сложно интерпретировать в виде вывода естественного языка, а в методах нисходящей парадигмы затруднена актуализация информации. Обработка естественного языка (NLP, от англ. Natural Language Processing) искусственным интеллектом остается актуальной проблемой современности. Основная задача NLP – создание программ, способных обрабатывать и понимать естественные языки. С учетом авторского подхода к построению агентов искусственного интеллекта (ИИ-агентов) обработка естественного языка должна также вестись на двух уровнях: на нижнем – при помощи методов восходящей парадигмы и на верхнем – при помощи символьных методов нисходящей парадигмы. Для решения этих задач авторами предложен новый математический формализм – ассоциативно-гетерархическая память (АГ-память), структура и функционирование которой основаны как на бионических принципах, так и на достижениях обеих парадигм искусственного интеллекта.

Методы. Использованы методы искусственного интеллекта и алгоритмы распознавания естественного языка.

Результаты. Ранее авторским коллективом была исследована проблема привязки символов в приложении к АГ-памяти. В ней привязка абстрактных символов осуществлялась с помощью мультисенсорной интеграции. При этом первичные символы, получаемые программой, преобразовывались в интегрированные абстрактные символы. В данной статье приведено полное описание АГ-памяти в виде формул, пояснений к ним и соответствующим схемам.

Выводы. В статье представлена максимально универсальная структура АГ-памяти. При работе с АГ-памятью из множества возможных модулей следует выбирать те части АГ-памяти, которые обеспечивают успешное и эффективное функционирование ИИ-агента.

Ключевые слова: искусственный интеллект, обработка естественного языка, ассоциативно-гетерархическая память, ИИ-агент, абстрактные символы, гиперсеть, модель управления предикатного символа, классификатор ролей актантов, гиперграф

• Поступила: 16.03.2022 • Доработана: 13.07.2022 • Принята к опубликованию: 12.09.2022

Для цитирования: Душкин Р.В., Лелекова В.А., Степаньков В.Ю., Фадеева С. Структура ассоциативно-гетерархической памяти. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-7-15>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Structure of associative heterarchical memory

Roman V. Dushkin [®], Vasilisa A. Lelekova [®], Vladimir Y. Stepankov,
Sandra Fadeeva

Artificial Intelligence Agency, Moscow, 127591 Russia

[®] Corresponding authors, e-mail: drv@aiagency.ru, lv@aiagency.ru

Abstract

Objectives. Since the 20th century, artificial intelligence methods can be divided into two paradigms: top-down and bottom-up. While the methods of the ascending paradigm are difficult to interpret as natural language outputs, those applied according to the descending paradigm make it difficult to actualize information. Thus, natural language processing (NLP) by artificial intelligence remains a pressing problem of our time. The main task of NLP is to create applications that can process and understand natural languages. According to the presented approach to the construction of artificial intelligence agents (AI-agents), processing of natural language should be conducted at two levels: at the bottom, methods of the ascending paradigm are employed, while symbolic methods associated with the descending paradigm are used at the top. To solve these problems, the authors of the present paper propose a new mathematical formalism: associative heterarchical memory (AH-memory), whose structure and functionality are based both on bionic principles and on the achievements of top-down and bottom-up artificial intelligence paradigms.

Methods. Natural language recognition algorithms were used in conjunction with various artificial intelligence methods.

Results. The problem of character binding as applied to AH-memory was explored by the research group in earlier research. Here, abstract symbol binding was performed using multi-serial integration, eventually converting the primary symbols produced by the program into integrated abstract symbols. The present paper provides a comprehensive description of AH-memory in the form of formulas, along with their explanations and corresponding schemes.

Conclusions. The most universal structure of AH-memory is presented. When working with AH-memory, a developer should select from a variety of possible module sets those AH-memory components that support the most successful and efficient functioning of the AI-agent.

Keywords: artificial intelligence, natural language processing, associative heterarchical memory, AI-agent, abstract symbols, hypernet, predicate symbol control model, actant role classifier, hypergraph

• Submitted: 16.03.2022 • Revised: 13.07.2022 • Accepted: 12.09.2022

For citation: Dushkin R.V., Lelekova V.A., Stepankov V.Y., Fadeeva S. Structure of associative heterarchical memory. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-7-15>

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

The authors declare no conflicts of interest.

Глоссарий

Искусственный интеллект (ИИ) – комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека.

Обработка естественного языка – подраздел информатики и ИИ, посвященный анализу естественных (человеческих) языков с помощью компьютеров.

ИИ-агент – полноценная кибернетическая машина, которая имеет систему управления, непрерывно получающую информацию с сенсорных систем агента, и воздействует на окружающую среду при помощи исполнительных устройств (или актуаторов).

Glossarium

Artificial intelligence (AI) is a set of technological solutions for simulating human cognitive functions (including self-learning, finding solutions without a predetermined algorithm, and obtaining insights) and yielding specific, practically significant results that are at least comparable with those gained through human intellectual activity.

Natural language processing is a subfield of computer science and AI dedicated to the analysis of natural (human) languages using computers.

AI-agent is a fully-fledged cybernetic machine encompassing a control system that continuously receives information from its sensory systems and operates on its environment by means of actuators.

ВВЕДЕНИЕ

Методы искусственного интеллекта [1] разделяют на две парадигмы – нисходящую и восходящую [2]. Методы восходящей парадигмы применяют для построения моделей когнитивных процессов, используя при этом большие объемы данных. Таким образом получают модель класса «черный ящик», точность которой можно довести до необходимого значения, но процессы принятия решений в которой сложно (или даже практически невозможно) интерпретировать с человеческой точки зрения [3]. С помощью методов нисходящей парадигмы строят модели, основанные на знаниях, которые представляют собой модели класса «белый ящик». Однако в таких моделях сложно поддерживать актуальность состояния при изменении структуры проблемной области, а само построение таких моделей – сложный и трудоемкий процесс [4].

Обработка естественного языка¹ (ЕЯ, NLP, от англ. Natural Language Processing) искусственным интеллектом остается актуальной проблемой современности [5, 6]. Основная задача NLP – создание программ, способных обрабатывать и понимать естественные языки. С учетом авторского подхода к построению ИИ-агентов [7] обработка естественного языка должна также вестись на двух уровнях: на нижнем – при помощи методов восходящей парадигмы (нейронные сети глубокого обучения для решения лингвистических задач) и на верхнем – при помощи символьных методов нисходящей парадигмы (семантические сети и онтологии для представления знаний и машинного вывода на них).

Для решения этих задач авторами предложен новый математический формализм – ассоциативно-гетерархическая память (АГ-память), структура и функционирование которой основаны как

¹ Естественный язык – язык, на котором люди говорят или пишут. [Natural language is a language that human beings speak or write.]

на бионических принципах, так и на достижениях обеих парадигм искусственного интеллекта. АГ-память базируется на этом понимании устройства когнитивного. По своей структуре она является гиперграфом [8], в котором узлы представляют собой символы, а связи и гиперсвязи между символами – это отображение отношений между концептами.

В статье приведено полное описание теоретико-множественной структуры АГ-памяти.

СТРУКТУРА АССОЦИАТИВНО-ГЕТЕРАРХИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

АГ-память представляет собой кортеж – упорядоченный набор элементов фиксированной длины, далее представленный в формуле (1), между элементами которого существуют пять множеств связей, показанных на рис. 1 в виде графа [9].

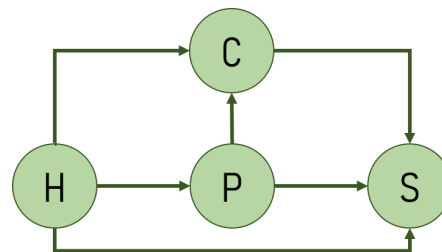


Рис. 1. Граф связей между объектами АГ-памяти

Связь между двумя множествами на графе обозначает все множество ассоциативных связей между их объектами.

$$AG = \langle S, C, P, H, L \rangle, \quad (1)$$

где S – множество абстрактных символов, схема формирования которых представлена на рис. 2; C – АГ-гиперсеть общих знаний; P – АГ-гиперсеть частных знаний; H – АГ-гиперсеть личной истории; L – множество ассоциативных связей между объектами множеств S, C, P и H.

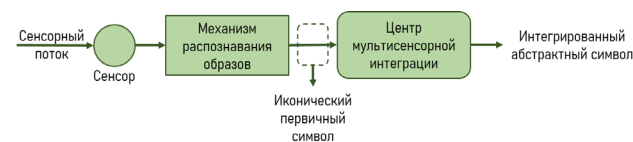


Рис. 2. Схема формирования абстрактного символа

Формирование абстрактного символа происходит следующим образом:

1. На вход сенсорного канала ИИ-агента дискретно или непрерывно поступает сенсорный поток данных, который фильтруется соответствующим сенсором и отправляется на обработку в механизм распознавания образов.

2. Механизм распознавания образов соответствующей сенсорной модальности осуществляет выделение воспринимаемых образов среди сенсорного потока, их обособление и дальнейшую отправку в центр мультисенсорной интеграции. Сенсорные модальности могут состоять из одной или нескольких сенсорных систем, каждая из которых состоит из одного или нескольких сенсорных каналов [10].
3. Центр мультисенсорной интеграции собирает выделенные и распознанные образы со всех сенсорных модальностей ИИ-агента и осуществляет построение интегрированного абстрактного символа, привязанного ко всем распознанным образам сенсорного восприятия. Таким образом, ИИ-агент решает проблему привязки символов [11].

Объект S представляет собой следующую структуру:

$$S = \{s_i\}_{i=1}^N,$$

где s_i – абстрактный символ с идентификатором i при N абстрактных символов в множестве S . При этом каждый абстрактный символ s_i является следующим объектом:

$$s_i = \langle UID, R \rangle$$

где s_i – произвольная уникальная последовательность символов из выделенного алфавита V ; UID – уникальный идентификатор [12] абстрактного символа; R – размеченное множество первичных сенсорных символов, к которым привязан абстрактный символ s_i .

$$R = \bigcup_{i=1}^K R_i, \text{ при этом } R_i \cap R_j = \emptyset, \text{ если } i \neq j.$$

У ИИ-агента имеется K сенсорных модальностей и множества R_i ($i = 1, \dots, K$) – это множества первичных сенсорных символов для каждой сенсорной модальности i . АГ-гиперсети C , P и H с математической точки зрения являются гиперграфами [13] – обобщенными случаями графа, при которых ребром могут соединяться любые подмножества вершин. Элементы АГ-памяти C , P и H представляют собой следующий кортеж:

$$e = \langle s^* | m | m^* | g | k | T | N \rangle, x, f \rangle, \quad (2)$$

где N – гиперсвязь между объектами АГ-памяти из множеств C , P или H ; x – текущий уровень возбужденности элемента АГ-памяти; f – функция активации элемента АГ-памяти; m – абстрактный символ второго порядка, $m = \langle UID, Pr, Mt \rangle$, где

UID – уникальный идентификатор символа; Pr и Mt – множества свойств и мета-свойств символов соответственно; s^* и m^* – ссылка на абстрактный символ из множества S и ссылка на абстрактный символ второго порядка из множеств C , P и H соответственно, представляющие собой идентификаторы символов с дополнительной информацией, по которой можно идентифицировать тип ссылки и саму ссылку:

$$s^* = \langle S^*, UID, UID^* \rangle, m^* = \langle M^*, UID, UID^* \rangle.$$

Здесь S^* и M^* – метки, подтверждающие релевантность ссылок; UID – уникальный идентификатор s и m , на который имеется соответствующая ссылка; UID^* – уникальный идентификатор самой ссылки.

Мета-свойства из множества Mt представляют собой семантический набор свойств, находящихся отражение в паттернах ИИ-агента и заложенных в его реализацию непосредственно в коде. Свойства из множества Pr представляют собой чисто синтаксические конструкции, семантика которых для ИИ-агента неизвестна на программном уровне и выявляется только в процессе функционирования АГ-памяти с учетом привязки всех символов к сенсорной информации. Оба множества представляют собой набор элементов следующего вида:

$$p = \langle name, value, type, unit \rangle,$$

где все объекты, входящие в состав свойства p , представляют собой строки. Строки $name$ – наименование свойства и $value$ – значение свойства – обязательно должны быть непустыми, а строки $type$ – тип свойства и $unit$ – единица измерения значения свойства – могут быть пустыми. Свойство конкретного элемента АГ-памяти может быть идентифицировано по уникальному идентификатору, такому как $UID.name$, т.е. в одном элементе АГ-памяти не может быть двух свойств с одинаковым наименованием.

В (2) g – функциональный символ, предназначенный для таких элементов знаний ИИ-агента, которые имеют особые поведенческие реакции или специальные процедуры обработки, такие как кванторы или логические пропозиционные связки (союзы «и», «или» и т.д.).

Функциональные символы могут использоваться для описания произвольных отношений между некоторыми элементами АГ-памяти и представляют собой следующий кортеж:

$$g = \langle UID, ID, \{e_i^*\}_{i=1}^Z \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор функционального символа; ID – идентификатор типа

функциональности, необходимый для указания на то, какой именно поведенческий паттерн у ИИ-агента соответствует выбранному функциональному символу; e_i^* – i -ая ссылка на элемент АГ-памяти из множества операндов (значение, переменная или выражение, расположенное слева или справа от оператора) функционального символа; Z – количество операндов функционального символа.

Символом k в (2) обозначен список элементов АГ-памяти, предназначенный для группировки элементов АГ-памяти в единый объект, что необходимо для формирования иерархий и гетерархий. Фактически k представляет собой идентифицированное и упорядоченное множество ссылок на произвольные объекты АГ-памяти, выраженное в следующем кортеже:

$$k = \langle UID, \{e_i^*\}_{i=1}^Y, Pr, Mt \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор списка элементов АГ-памяти; e_i^* – i -ая ссылка на элемент АГ-памяти; Y – количество элементов в списке; Pr и Mt – множества свойств и мета-свойств списка элементов АГ-памяти соответственно, определяющиеся аналогично пункту m .

В (2) шаблон модели управления предикатного символа T [14] представляет собой следующий кортеж:

$$T = \langle UID, s^*, A \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор шаблона модели управления предикатного символа; s^* – ссылка на абстрактный символ из множества S , которому соответствует предикат описываемого шаблона модели управления; $A = \{a_i\}_{i=1}^Q$ – множество актантов в модели управления предикатного символа, состоящее из i -го количества актантов валентности Q (общее количество актантов) предикатного символа. Актант в модели управления предикатного символа a представляет собой роль элемента, который занимает вакантное место в случае реализации шаблона модели управления [15].

Для конкретного ИИ-агента должен быть составлен классификатор ролей элементов в моделях управления предикатных символов. Ниже представлен предлагаемый авторами классификатор ролей актантов (языковых выражений, заполняющих валентность предикатного символа), который решает задачи обработки естественного языка:

1. СУБЪЕКТ (SUBJECT) – роль актанта, выполняющего действие предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде подлежащего в синтаксической конструкции предиката.

2. ОБЪЕКТ (OBJECT) – роль актанта, над которым выполняется действие предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде прямого дополнения в синтаксической конструкции предиката.

3. ЛОКАЦИЯ (LOCATION) – роль актанта, которая указывает место выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде обстоятельства места в синтаксической конструкции предиката, либо дополнения в каком-либо грамматическом локативе. Также эта роль может разбиваться на несколько подролей, в числе которых могут быть такие часто используемые, как ЛОКАЦИЯ-ИЗ (LOC-FROM) и ЛОКАЦИЯ-В (LOC-TO), обозначающие места – источник и назначение – движения, реализуемого действием предикатного символа.

4. ВРЕМЯ (TIME) – роль актанта, которая указывает время выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде обстоятельства времени в синтаксической конструкции предиката.

5. ПРИЧИНА (CAUSE) – роль актанта, которая указывает на причину выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде подчиненной синтаксической конструкции, которая вводит каузальные отношения в высказывание.

6. ЦЕЛЬ (PURPOSE) – роль актанта, которая указывает на цель выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке также выражается в виде подчиненной синтаксической конструкции, которая вводит каузальные отношения в высказывание. При этом сам предикат, описывающий действие, выступает в качестве причины для актанта-цели.

7. ИНСТРУМЕНТ (TOOL) – роль актанта, которая указывает на способ (инструмент) выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается в виде непрямого дополнения в синтаксической конструкции предиката в инструментальном грамматическом падеже.

8. МАТЕРИАЛ (MATERIAL) – роль актанта, которая указывает на материал, из которого производится объект во время выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. На естественном языке

эта роль выражается при помощи непрямого дополнения в предложном падеже с использованием таких предлогов, как «из» (либо сходных грамматических конструкций в других языках).

9. ОБРАЗ ДЕЙСТВИЯ (HOW-TO) – роль актанта, которая указывает на способ (атрибут) выполнения действия предикатного символа, модель управления которого описывается шаблоном. Обычно на естественном языке выражается при помощи наречия, относящегося к сказуемому в предложении, описывающему факт.

Здесь под действием также подразумевается и состояние субъекта или смена такого состояния – это также может выражаться предикатными символами на естественном языке.

Поскольку предикат со своей моделью управления представляет собой описание факта о жизнедеятельности ИИ-агента, представленный классификатор ролей актантов в модели управления целостно и полно описывает возможные ситуации, в которых оказывается ИИ-агент в рамках различных фактов своей личной истории.

Для конкретного предиката шаблон модели управления может содержать подмножество выделенных актантов. Вместе с тем, практически любой предикат должен содержать в своей модели управления актанты с ролями СУБЪЕКТ и ОБЪЕКТ.

В качестве примера можно рассмотреть предикат «Создавать» (CREATE). Его шаблон будет иметь 7 актантов, перечисленных в представленном классификаторе ролей актантов. На рис. 3 показана схема шаблона предиката «Создавать».

Необходимо отметить, что при реализации шаблона предикатного символа не все вакантные роли актантов могут быть заполнены.

Гиперсвязь N между объектами АГ-памяти из множеств C , P или H представляет собой конкретную

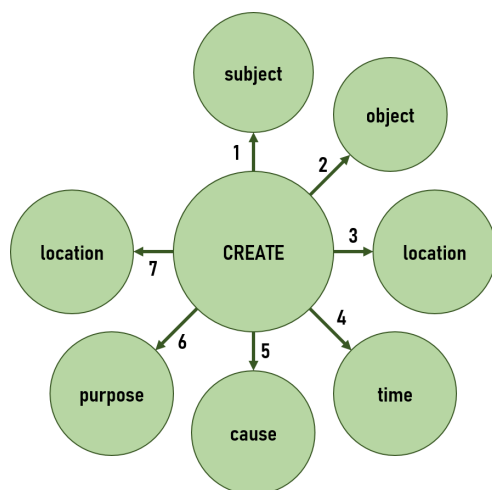


Рис. 3. Шаблон модели управления предикатного символа «Создавать»

реализацию модели управления предикатного символа. Каждая гиперсвязь в АГ-памяти представляет собой предикатный символ, описывающий какой-либо факт из личной истории ИИ-агента. Таким образом, гиперсвязь N представляет собой следующий объект:

$$N = \langle UID, w, t^*, \{s_i^* | e_i^*\}_{i=1}^Q \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор гиперсвязи; w – все активации гиперсвязи ($w \in [0,1]$); t^* – ссылка на шаблон управления предикатного символа; s_i^* – ссылка на абстрактный символ множества S , замещающий вакантную роль i в модели управления предикатного символа; e_i^* – ссылка на элемент множеств C , P или H , замещающая вакантную роль i в модели управления предикатного символа.

Наиболее интересным вариантом из представленных возможностей по замещению вакантного актанта модели управления предикатного символа является элемент типа e_i^* , поскольку этот тип элемента фактически позволяет в качестве актанта предиката выступать любому другому элементу множеств C , P или H , в т.ч. и гиперсвязям N . Это делает АГ-гиперсеть очень гибкой для описания фактов из личной истории ИИ-агента, т.к. в качестве любого актанта может выступать другой факт из личной истории, что делает АГ-гиперсеть именно гиперграфом с математической точки зрения. Эта структура, таким образом, позволяет очень гибко обрабатывать ЕЯ-факты, выявленные в текстах, описывающих личную историю ИИ-агента.

Наконец, множество ассоциативных связей L состоит из объектов следующего вида:

$$l = \langle UID, ID, w(e_1^*, e_2^*) \rangle,$$

где UID – уникальный идентификатор конкретной связи; ID – неуникальный идентификатор (тип) связи; w – вес активации связи ($w \in [0,1]$); e_1^* и e_2^* – ссылки на элементы множеств C , P или H . При этом связь l является направленной и идет от элемента e_1^* к элементу e_2^* .

Для конкретного проявления ИИ-агента необходимо создать исчерпывающее множество возможных идентификаторов связей, семантика которых может быть прописана на уровне программного кода конкретного ИИ-агента.

Осталось отметить, что вес активации $w[0,1]$, используемый в связях и гиперсвязях АГ-памяти, уровень возбужденности элемента x и функция активации элемента АГ-памяти f применяются в процедурах обработки знаний и вывода на фактах, записанных в АГ-памяти, что будет детально описано в последующих статьях.

На рис. 4 представлена сводная схема структуры АГ-памяти.

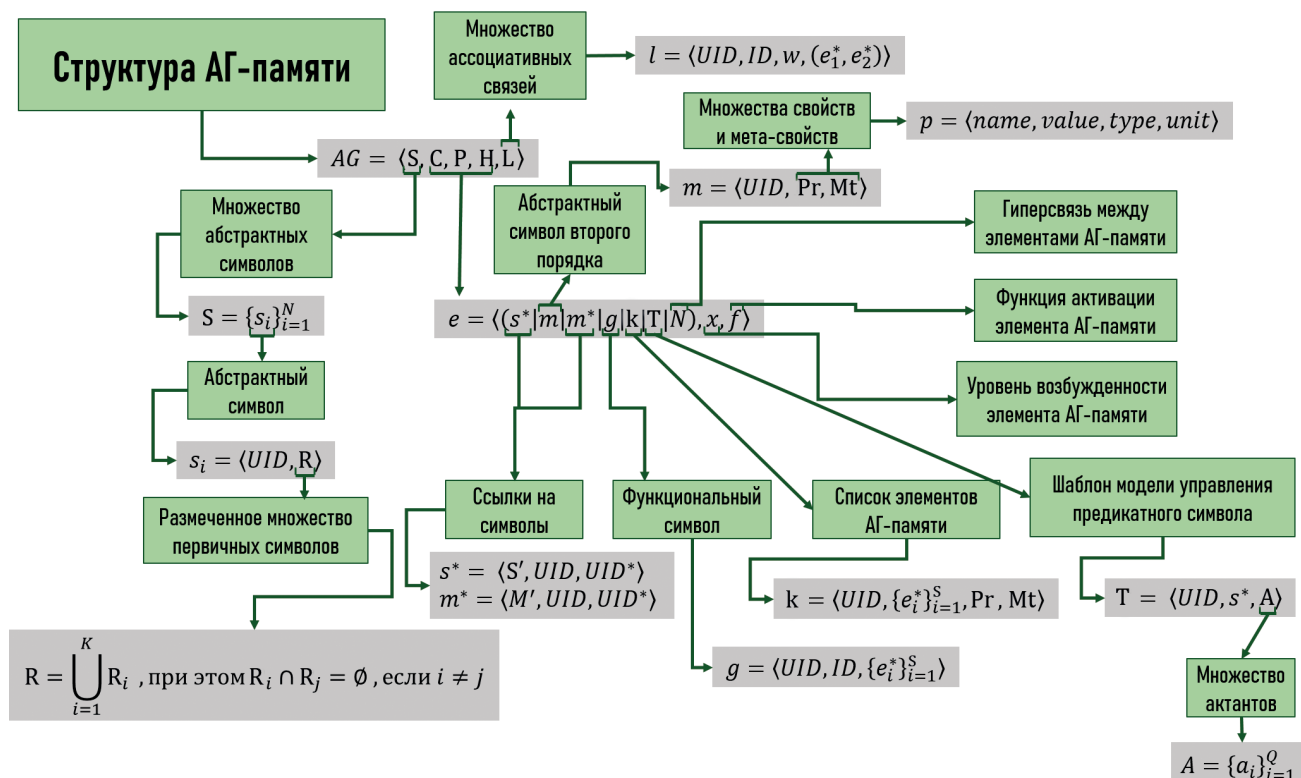


Рис. 4. Структура АГ-памяти

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При реализации конкретного ИИ-агента его проектировщик и разработчик должен выбирать те элементы АГ-памяти из описанных, которые требуются для успешного и эффективного функционирования конкретно этого ИИ-агента. В настоящей статье представлена максимально универсальная структура АГ-памяти, однако в каждом специфическом случае следует выбирать, какие именно ее компоненты следует использовать.

Вклад авторов

Р.В. Душкин – разработка АГ-памяти, представление теоретической базы для реализации в форме статьи.

В.А. Лелекова – анализ теоретических научных материалов, написание текста статьи.

В.Ю. Степанков – разработка АГ-памяти, консультации по техническим деталям АГ-памяти.

С. Фадеева – анализ теоретических научных материалов, редактирование текста статьи.

Authors' contributions

R.V. Dushkin – development of AG-memory, presentation of theoretical basis for implementation in the form of an article.

V.A. Lelekova – analysis of theoretical scientific materials, writing the text of the article.

V.Y. Stepankov – development of AG-memory, consultations on technical details of AG-memory.

S. Fadeeva – analysis of theoretical scientific materials, editing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Душкин Р.В. *Искусственный интеллект*. М.: ДМК-Пресс; 2019. 280 с. ISBN 978-5-97060-787-9.
2. Душкин Р.В. Обзор подходов и методов искусственного интеллекта. *Радиоэлектронные технологии*. 2018;3:85–89.
3. Николенко С., Архангельская Е., Кадури А. *Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей*. СПб: Питер; 2018. 480 с. ISBN 978-5-496-02536-2.
4. Sarker M.K., Zhou L., Eberhart A., Hitzler P. Neuro-symbolic artificial intelligence: Current trends. *AI Communications*. 2021. 13 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05330>

REFERENCES

1. Dushkin R.V. *Iskusstvennyi intellekt (Artificial intelligence)*. Moscow: DMK-Press; 2019. 280 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-787-9
2. Dushkin R.V. Review of artificial intelligence approaches and methods. *Radioelektronnye tekhnologii*. 2018;3: 85–89 (in Russ.).
3. Nikolenko S., Arkhangel'skaya E., Kadurin A. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neuronnykh setei (Deep learning. Immersion in the world of neural networks)*. St. Petersburg: Piter; 2018. 480 p. (in Russ.). ISBN 978-5-496-02536-2

5. Raina V., Krishnamurthy S. Natural language processing. In: *Building an Effective Data Science Practice*. Apress, Berkeley, CA; 2022. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7419-4_6
6. Zadeh L.A. From computing with numbers to computing with words – From manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 2002;12(3):307–324. URL: <https://www.zbc.uz.zgora.pl/Content/2928/1zade.pdf>
7. Душкин Р.В. Развитие методов адаптивного обучения при помощи использования интеллектуальных агентов. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019;1:87–96. <https://doi.org/10.14357/20718594190108>
8. Zhu L., Gao W. Hypergraph ontology sparse vector representation and its application to ontology learning. In: Tan Y., Shi Y., Zomaya A., Yan H., Cai J. (Eds.). *Data Mining and Big Data*. International Conference on Data Mining and Big Data (DMBD 2021). Part of the *Communications in Computer and Information Science*. Book series. Singapore: Springer; 2021. V. 1454. P. 16–27. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7502-7_2
9. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. *Алгоритмы. Построение и анализ*. М.: Вильямс; 2011. 1296 с. ISBN 0-07-013151-1
10. Horiguchi H., Winawer J., Dougherty R.F., Wandell B.A. Human trichromacy revisited. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2012;110(3):E260–E269. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214240110>
11. Harnad S. The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1990;42(1–3):335–346. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6)
12. Jentzsch R., Feustel D., Topf B. *Unique identifier, method for providing the unique identifier and use of the unique identifier*: US Pat. US8578162B2. Publ. 05.11.2013.
13. Kaminski B., Pralat P., Theberge F. Hypergraphs. In: *Mining Complex Networks*. NY: Chapman and Hall/CRC; 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003218869-7>
14. Попов Э.В. *Общение с ЭВМ на естественном языке*. М.: Наука; 1982. 360 с.
15. Malchukov A., De Swart P. Differential case marking and actancy variation. In: *The Oxford Handbook of Case*. Oxford: Oxford University Press; 2012.
4. Sarker M.K., Zhou L., Eberhart A., Hitzler P. Neuro-symbolic artificial intelligence: Current trends. *AI Communications*. 2021. 13 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05330>
5. Raina V., Krishnamurthy S. Natural language processing. In: *Building an Effective Data Science Practice*. Apress, Berkeley, CA; 2022. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7419-4_6
6. Zadeh L.A. From computing with numbers to computing with words – From manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 2002;12(3):307–324. Available from URL: <https://www.zbc.uz.zgora.pl/Content/2928/1zade.pdf>
7. Dushkin R.V. Development of adaptive learning methods using intelligent agents. *Iskussvennyi intellekt i prinyatie reshenii*. 2019;1:87–96 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718594190108>
8. Zhu L., Gao W. Hypergraph ontology sparse vector representation and its application to ontology learning. In: Tan Y., Shi Y., Zomaya A., Yan H., Cai J. (Eds.). *Data Mining and Big Data*. International Conference on Data Mining and Big Data (DMBD 2021). Part of the *Communications in Computer and Information Science*. Book series. Singapore: Springer; 2021. V. 1454. P. 16–27. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7502-7_2
9. Kormen T., Leizeron Ch., Rivest R., Shtain K. *Algoritmy. Postroenie i analiz*. Moscow: Vil'yams; 2011. 1296 p. (in Russ.). ISBN 0-07-013151-1 [Cormen T.H., Leiseron C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. London: The MIT Press; 2009. 1312 p.]
10. Horiguchi H., Winawer J., Dougherty R.F., Wandell B.A. Human trichromacy revisited. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2012;110(3):E260–E269. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214240110>
11. Harnad S. The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1990;42(1–3):335–346. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6)
12. Jentzsch R., Feustel D., Topf B. *Unique identifier, method for providing the unique identifier and use of the unique identifier*: US Pat. US8578162B2. Publ. 05.11.2013.
13. Kaminski B., Pralat P., Theberge F. Hypergraphs. In: *Mining Complex Networks*. NY: Chapman and Hall/CRC; 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003218869-7>
14. Popov E.V. *Obshchenie s EVM na estestvennom yazyke (Communication with a computer in natural language)*. Moscow: Nauka; 1982. 360 p. (in Russ.).
15. Malchukov A., De Swart P. Differential case marking and actancy variation. In: *The Oxford Handbook of Case*. Oxford: Oxford University Press; 2012.

Об авторах

Душкин Роман Викторович, эксперт в области искусственного интеллекта, директор по науке и технологиям, Агентство искусственного интеллекта (127591, Россия, Москва, ул. Дубнинская, д. 75Б, стр. 2, офис 10). E-mail: drv@aiagency.ru. Scopus Author ID 14070035900, SPIN-код РИНЦ 1371-0337, <https://orcid.org/0000-0003-4789-0736>

Лелекова Василиса Алексеевна, аналитик, Агентство искусственного интеллекта (127591, Россия, Москва, ул. Дубнинская, д. 75Б, стр. 2, офис 10). E-mail: lv@aiagency.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6150-980X>

Степаньков Владимир Юрьевич, технический директор, Агентство искусственного интеллекта (127591, Россия, Москва, ул. Дубнинская, д. 75Б, стр. 2, офис 10). E-mail: svu@aiagency.ru. Scopus Author ID 57226776426, <https://orcid.org/0000-0003-0783-000X>

Фадеева Сандра, главный аналитик, Агентство искусственного интеллекта (127591, Россия, Москва, ул. Дубнинская, д. 75Б, стр. 2, офис 10). E-mail: sf@aiagency.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9064-0017>

About the authors

Roman V. Dushkin, Expert in the Field of Artificial Intelligence, Science and Technology Director, Artificial Intelligence Agency (75B, build. 2, off. 10, Dubninskaya ul., Moscow, 127591 Russia). E-mail: drv@aiagency.ru. Scopus Author ID 14070035900, RSCI SPIN-code 1371-0337, <https://orcid.org/0000-0003-4789-0736>

Vasilisa A. Lelekova, Analyst, Artificial Intelligence Agency (75B, build. 2, off. 10, Dubninskaya ul., Moscow, 127591 Russia). E-mail: lv@aiagency.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6150-980X>

Vladimir Y. Stepankov, Technical Director, Artificial Intelligence Agency (75B, build. 2, off. 10, Dubninskaya ul., Moscow, 127591 Russia). E-mail: svu@aiagency.ru. Scopus Author ID 57226776426, <https://orcid.org/0000-0003-0783-000X>

Sandra Fadeeva, Chief Analyst, Artificial Intelligence Agency (75B, build. 2, off. 10, Dubninskaya ul., Moscow, 127591 Russia). E-mail: sf@aiagency.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9064-0017>

УДК 004.41
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-16-27>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Программный фреймворк для экспериментальной оценки характеристик информационно-технологических решений в виртуальной среде

Д.Ю. Ильин[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: i@dmityilin.com

Резюме

Цель. При разработке программного обеспечения, как правило, применяются готовые информационно-технологические решения. Они обладают различными характеристиками, объективные данные о которых можно получить экспериментально. Постановка корректного и воспроизводимого эксперимента требует от исследователя применения целого ряда разрозненных технологий и программных инструментов, что делает задачу трудоемкой. Снизить трудоемкость постановки эксперимента возможно, предоставив исследователю предметно-ориентированный инструментарий. Цель работы – проектирование и разработка предметно-ориентированного программного фреймворка для экспериментальной оценки характеристик информационно-технологических решений в виртуальной среде.

Методы. Для определения требуемых характеристик программного фреймворка проведен анализ программных инструментов проведения экспериментальных исследований по оценке характеристик информационно-технологических решений в виртуальной среде. При проектировании и разработке фреймворка применены методы декомпозиции, структурного проектирования, разработки программного обеспечения.

Результаты. Спроектирован и разработан программный фреймворк для экспериментальной оценки характеристик информационно-технологических решений в виртуальной среде. Представлены результаты проектирования, ключевые особенности фреймворка и программные технологии, примененные для разработки. Приведено описание функциональных возможностей фреймворка. Реализация фреймворка содержит 12 команд для управления виртуальными машинами и 4 команды для скаффолдинга. Предложена методика проведения экспериментальных исследований с применением фреймворка.

Выводы. Проведенное исследование позволило идентифицировать недостатки применения существующего инструментария, разработать предметно-ориентированный программный фреймворк и предложить методику его использования, что может сократить трудозатраты при проведении экспериментов по оценке информационно-технологических решений в виртуальной среде. Фреймворк позволяет сократить количество языков программирования и разметки, необходимых исследователю для постановки эксперимента, с 3 до 1.

Ключевые слова: программный фреймворк, виртуальные машины, экспериментальная оценка характеристик программного обеспечения, мониторинг вычислительных ресурсов, скаффолдинг

• Поступила: 04.03.2022 • Доработана: 13.07.2022 • Принята к опубликованию: 05.09.2022

Для цитирования: Ильин Д.Ю. Программный фреймворк для экспериментальной оценки характеристик информационно-технологических решений в виртуальной среде. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-16-27>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Framework for experimental evaluation of software solutions in a virtual environment

Dmitry Ilin ®

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

® Corresponding author, e-mail: i@dmityilin.com

Abstract

Objectives. Ready-made information technology solutions used when developing software have various characteristics depending on the objectives to be experimentally obtained. While the selection of appropriate technologies and software tools used in experimental software engineering can be time-consuming, experimental complexity can be reduced by providing the researcher with domain-specific tools. The aim of the study is to design and develop a domain-specific software framework for experimental evaluation of the characteristics of information technology solutions in a virtual environment.

Methods. To determine the required characteristics of the software framework, an analysis of software tools for conducting experimental studies to evaluate the characteristics of information technology solutions in a virtual environment was conducted. Methods of decomposition, structural design, and software development were applied to design and develop the framework.

Results. A software framework for conducting experimental research has been developed. The design results, key features of the framework and a description of the functionality are presented. The implementation of the framework comprises commands for managing virtual machines and commands for scaffolding. A technique for conducting experimental studies using the framework is proposed.

Conclusions. The developed domain-specific software framework addresses shortcomings of existing tools to reduce labor costs when conducting experiments to evaluate information technology solutions. The developed framework and proposed methodology allows the number of programming and markup languages required for setting up a software experiment to be reduced from 3 to 1.

Keywords: software framework, virtual machines, experimental evaluation of software solutions, resource utilization monitoring, scaffolding

• Submitted: 04.03.2022 • Revised: 13.07.2022 • Accepted: 05.09.2022

For citation: Ilin D. Framework for experimental evaluation of software solutions in a virtual environment. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-16-27>

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

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка программного обеспечения (ПО) в значительной степени основывается на использовании готовых информационно-технологических решений. При этом проводится интеграция программных библиотек, фреймворков, систем управления базами данных или целых программных продуктов.

Интегрируемые решения могут обладать различными характеристиками качества, в т.ч. в разных условиях функционирования [1–3]. Оценка характеристик качества, например, производительности [2–4], особенно важна при проектировании систем, обслуживающих большое количество пользователей. Для этого рассматриваемые информационно-технологические решения или результат их интеграции проверяют экспериментально [3–5]. Как правило, такие эксперименты проводят на облачной инфраструктуре, хотя это не всегда целесообразно. Иногда необходимая инфраструктура может быть организована на рабочих станциях [6, 7] исследователей. В обоих случаях организация инфраструктуры требует подготовки виртуальных машин или контейнеров [8, 9], позволяющих оценивать информационно-технологические решения в изолированной среде.

Исследователи сходятся во мнении, что результаты экспериментальных оценок должны быть воспроизводимы [7, 10–13]. Однако существуют различные подходы к обеспечению воспроизводимости. В одних работах отмечается важность подробного документирования инфраструктуры, протокола проведения эксперимента [12], в других – предлагаются инструменты, позволяющие фиксировать действия ПО на уровне системных вызовов [10, 11]. Также предлагается осуществлять подготовку инфраструктуры не вручную, а с помощью технологий, широко применяемых в сфере DevOps¹ [14–17]. Эти технологии зарекомендовали себя, в т.ч. для исследовательских целей [5, 18], т.к. обеспечивают воспроизводимость экспериментов. Кроме того, они применяются и в педагогической деятельности [19–21] для обеспечения участников образовательного процесса идентичным рабочим окружением.

Тем не менее, в исследованиях отмечается, что для реализации воспроизводимого эксперимента необходимо применение множества программных инструментов [10, 11], что требует от исследователя дополнительных знаний и навыков. Также отмечается,

что их использование может увеличивать трудозатраты при постановке эксперимента.

Настоящая работа посвящена анализу инструментов, применяемых для реализации инфраструктуры на рабочих станциях исследователей, и разработке фреймворка для проведения экспериментальных исследований по оценке характеристик информационно-технологических решений в виртуальной среде.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести анализ задач исследователя при постановке эксперимента, а также определить инструментальные средства, применяемые для их решения;
- на основе проведенного анализа подготовить архитектурные решения, определяющие ключевые характеристики программного фреймворка;
- разработать фреймворк, соответствующий предметной области и архитектурным решениям, а также представить методику его применения.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Перед тем как переходить к разработке программного фреймворка, следует провести анализ задач исследователя при постановке воспроизводимого эксперимента, а также инструментальных средств, применяемых для их решения.

Проведение экспериментальных исследований по оценке характеристик информационно-технологических решений возможно без использования перечисленных далее программных инструментов. Однако целесообразность применения таких средств обоснована.

Использование виртуальных машин (например, с помощью *VirtualBox*² [9, 22]) позволяет проводить эксперименты с использованием меньшего числа устройств, вплоть до проведения эксперимента на единственном физическом устройстве.

Сама виртуальная среда может занимать значительный объем дискового пространства, что усложняет передачу виртуальных машин между исследователями. Также сама по себе виртуальная среда не предоставляет инструментов для формального описания ее конфигурации и конфигурации виртуальных машин. Таким образом, при описании экспериментального стенда постфактум появляется вероятность ошибок при документировании деталей эксперимента.

Это может быть скомпенсировано применением инструментов создания и конфигурирования

¹ DevOps – акроним от development & operations (разработка и эксплуатация) – совокупность практик автоматизации технологических процессов сборки, настройки, развертывания программного обеспечения. [DevOps is an acronym for development & operations – a set of practices for automating the technological processes of building, configuring, and deploying software.]

² <https://www.virtualbox.org/>, дата обращения: 18.02.2022. [<https://www.virtualbox.org/>. Accessed February 18, 2022.]

виртуальной среды (например, *Vagrant*³ [9, 22]). Если виртуальные машины заданы с помощью инструмента конфигурации, то получается, что формальное описание характеристик виртуального стенда может быть определено еще до того, как стенд фактически начнет функционировать. В дополнение, средства облачной конфигурации (например, *Ansible*⁴ [22, 23]) позволяют задать настройки ПО виртуальных машин аналогичным образом. Такой подход, именуемый «инфраструктура как код» [14, 23], решает две обозначенные проблемы – уменьшает объем экспериментального стенда при передаче между исследователями и обеспечивает надежность документирования деталей эксперимента.

Несмотря на решение описанных проблем, этого недостаточно для проведения экспериментов. Конфигурация виртуального экспериментального стенда не всегда остается неизменной на протяжении всего эксперимента. Например, ограничения на утилизацию вычислительных ресурсов могут требоваться только на определенных стадиях эксперимента. Вышеперечисленные инструменты не позволяют изменять характеристики стенда, т.к. описывают статическую конфигурацию.

Для проведения программно-управляемого эксперимента также необходим менеджер задач (например, *Gulp*⁵), который бы выполнял команды в заданном порядке. Также важными являются инструменты сбора данных мониторинга утилизации вычислительных ресурсов (например, *Atop*⁶) и средства для подготовки отчетов.

Суммируя вышеизложенное, можно прийти к выводу, что для проведения надежно задокументированного программно-управляемого эксперимента в виртуальной среде необходима подготовка виртуального стенда и решение следующих задач:

- 1) дизайн экспериментального исследования;
- 2) подготовка формального описания виртуальных машин;
- 3) подготовка формального описания конфигурации ПО виртуальных машин;
- 4) установка средств мониторинга утилизации ресурсов на каждую виртуальную машину (в дополнение к п. 3);
- 5) подготовка материалов исследования (ИТ-решение, экспериментальные данные и т.д.);
- 6) разработка и отладка программного кода управления экспериментом;

³ <https://www.vagrantup.com/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://www.vagrantup.com/. Accessed February 18, 2022.]

⁴ <https://www.ansible.com/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://www.ansible.com/. Accessed February 18, 2022.]

⁵ <https://gulpjs.com/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://gulpjs.com/. Accessed February 18, 2022.]

⁶ <https://www.atoptool.nl/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://www.atoptool.nl/. Accessed February 18, 2022.]

7) обеспечение корректных ограничений по утилизации ресурсов на различных стадиях эксперимента;

8) экспорт данных мониторинга и построение отчета об утилизации ресурсов.

Перечисленное требует от исследователя знания большого перечня технологий и способов их интеграции. Ситуацию также усложняет то, что разные технологии требуют знания разных языков программирования и разметки данных. Примером может служить перечень, показанный в табл. 1. Важно отметить, что знание перечисленных технологий становится обязательным.

Таблица 1. Пример перечня технологий, необходимых для проведения экспериментов в виртуальной среде

Категория	Инструмент	Язык (программирования, разметки)
Конфигурирование виртуальных машин	<i>Vagrant</i>	Ruby ⁷
Конфигурирование ПО виртуальных машин	<i>Ansible</i>	YAML ⁸
Управление экспериментом	<i>Gulp</i> , Shell script ⁹	JavaScript ¹⁰ , Bash ¹¹
Генерация отчетов	<i>Gulp</i> + <i>EJS</i> ¹² + <i>Plotly.js</i> ¹³	JavaScript, HTML ¹⁴ , JSON ¹⁵
Экспорт данных мониторинга	<i>Atop</i> , Shell script	Bash

Поскольку перед исследователем стоит объемный перечень задач, часть из которых не решается существующими инструментами, целесообразно спроектировать и разработать инструмент, который бы обладал следующими характеристиками:

⁷ <https://www.ruby-lang.org/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://www.ruby-lang.org/. Accessed February 18, 2022 (in Russ.).]

⁸ <https://yaml.org/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://yaml.org/. Accessed February 18, 2022.]

⁹ Shell script – скрипт, написанный на языке Bash или аналогичном ему языке. [Shell script is a script written in Bash or a similar language.]

¹⁰ <https://262.ecma-international.org/6.0/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://262.ecma-international.org/6.0/. Accessed February 18, 2022.]

¹¹ <http://www.gnu.org/software/bash/>, дата обращения: 18.02.2022. [http://www.gnu.org/software/bash/. Accessed February 18, 2022.]

¹² <https://ejs.co/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://ejs.co/. Accessed February 18, 2022.]

¹³ <https://plotly.com/javascript/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://plotly.com/javascript/. Accessed February 18, 2022.]

¹⁴ <https://html.spec.whatwg.org/multipage/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://html.spec.whatwg.org/multipage/. Accessed February 18, 2022.]

¹⁵ <https://www.json.org/>, дата обращения: 18.02.2022. [https://www.json.org/. Accessed February 18, 2022.]

- возможностью формального описания эксперимента в виде программных конфигураций;
- возможностью применения специфичных программных конфигураций на конкретных стадиях эксперимента;
- способностью сократить число языков программирования, разметки данных и информационных технологий, необходимых для проведения эксперимента.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФРЕЙМВОРКА

В процессе проектирования фреймворка был проведен анализ требований к программному обеспечению и сформирована отвечающая заданным требованиям программная архитектура.

Так как конфигурация виртуальной машины и параметры ее ПО описываются в статике, то их можно задавать с помощью слабоструктурированных форматов. Такой формат должен быть удобен

для чтения и редактирования, поэтому предлагается использовать язык разметки YAML. Этот язык применяется в системе *Ansible* для конфигурирования ПО виртуальных машин и знаком исследователям. Вместо использования языка программирования общего назначения алгоритм выполнения автоматизированных задач также можно задавать в декларативном виде на языке YAML.

Подразумевается, что фреймворк для проведения экспериментальных исследований будет компилировать исходные файлы на языке YAML в целевые конфигурации (например, конфигурацию для инструмента *Vagrant* на языке Ruby), и будет содержать встроенное средство автоматизации выполнения задач. Таким образом, исследователю вместо использования трех различных языков для конфигурирования виртуальных машин, их ПО и выполнения автоматизированных задач достаточно только языка разметки YAML, что показано на рис. 1.

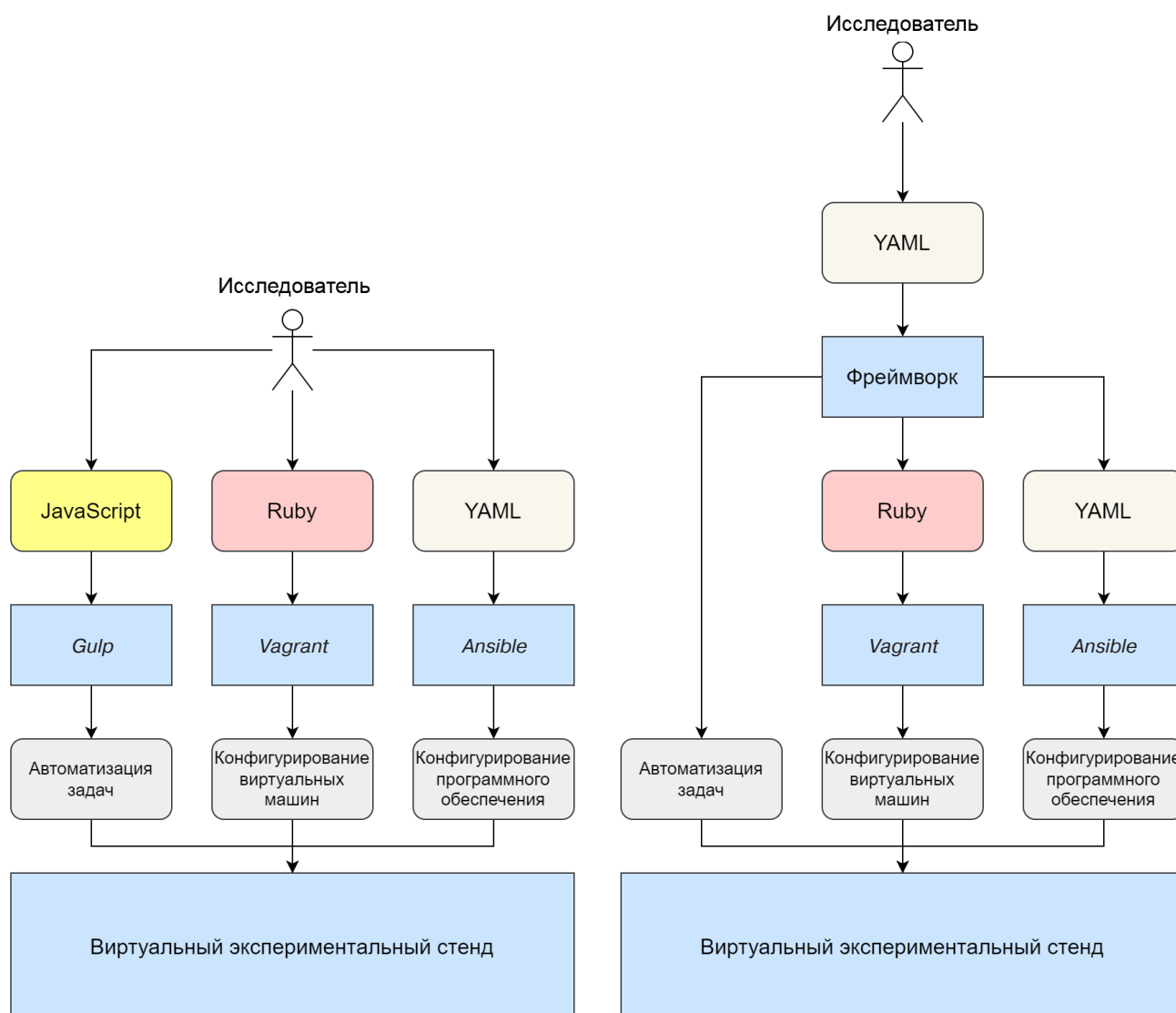


Рис. 1. Сокращение числа применяемых исследователем языков программирования и разметки данных

Для того чтобы обеспечить проведение эксперимента с учетом специфических для каждой стадии конфигураций, предлагается следующее. Эксперимент разделяется на стадии, на каждой из которых к каждой виртуальной машине применяются скомпилированные конфигурации. Они состоят из трех составляющих: (1) общей конфигурации для всего проекта, (2) конфигурации конкретной виртуальной машины и (3) конфигурации, адресованной к определенной стадии эксперимента. После компиляции выбранных конфигураций выполняется ряд действий, задающих алгоритм эксперимента на конкретной стадии. Эти действия могут включать любые команды в отношении виртуальных машин. Диаграмма, иллюстрирующая процесс эксперимента, показана на рис. 2.

Файловая структура проекта для проведения экспериментального исследования показана на рис. 3. Типовой проект состоит из:

- файла конфигурации;
- одной или нескольких виртуальных машин, для каждой из которых также существует отдельный

файл конфигурации и набор специфических для виртуальной машины файлов провизии;

- общих файлов провизии для всех виртуальных машин;
- файлов с исходными данными (включая исследуемое информационно-технологическое решение);
- директорий с отчетами об утилизации ресурсов виртуальных машин в ходе проведенных экспериментов.

Файл конфигурации эксперимента и файлы конфигурации виртуальных машин реализуются в слабо-структурированном формате YAML. Схематично структура этих файлов представлена на рис. 4, где сверху (файл gerex.yml) показана конфигурация эксперимента, а снизу (файл vm.yml) – конфигурация одной из виртуальных машин.

Содержимое файлов взаимосвязано. Свойство «path» в конфигурации эксперимента указывает путь до файла vm.yml. Название стадии эксперимента (stage), используемое в файле конфигурации эксперимента, может быть использовано в конфигурации

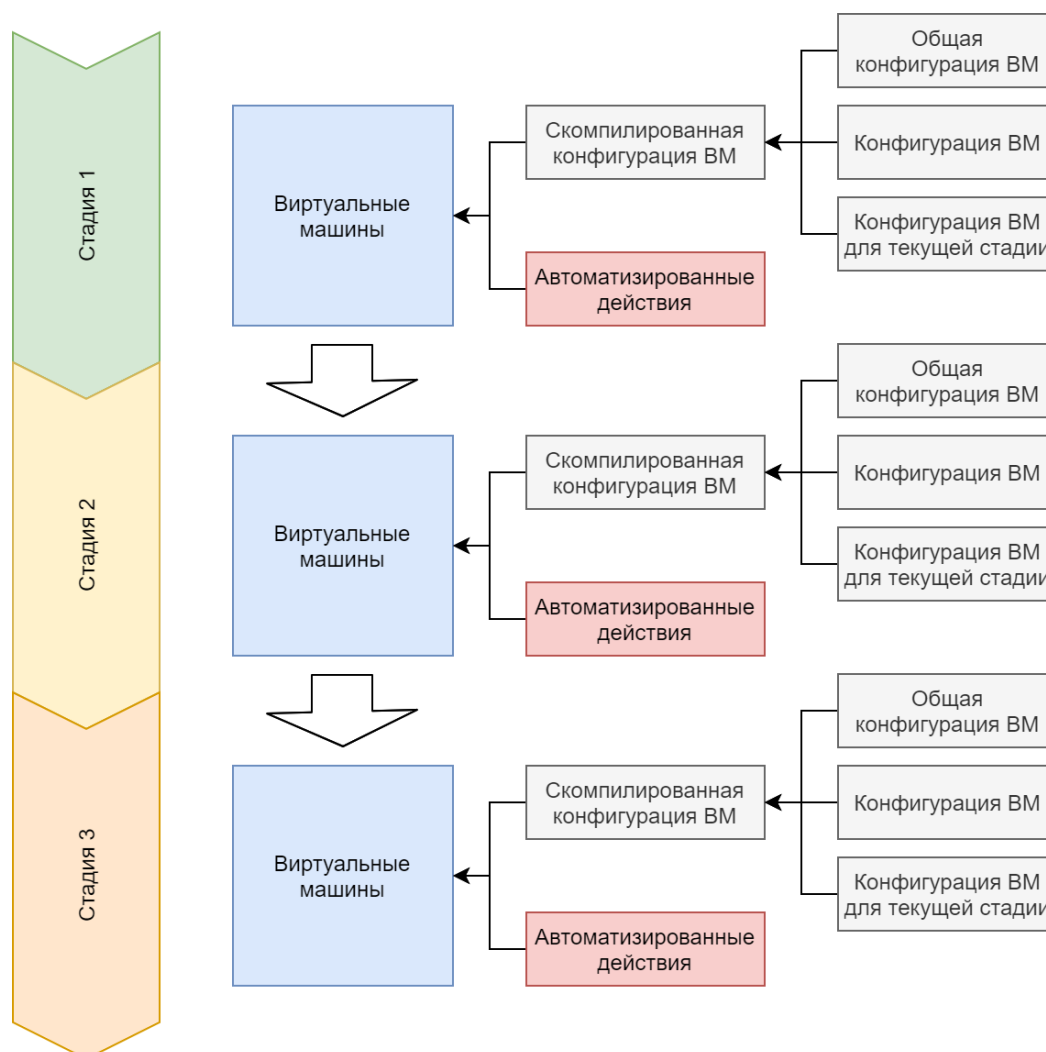


Рис. 2. Диаграмма проведения эксперимента

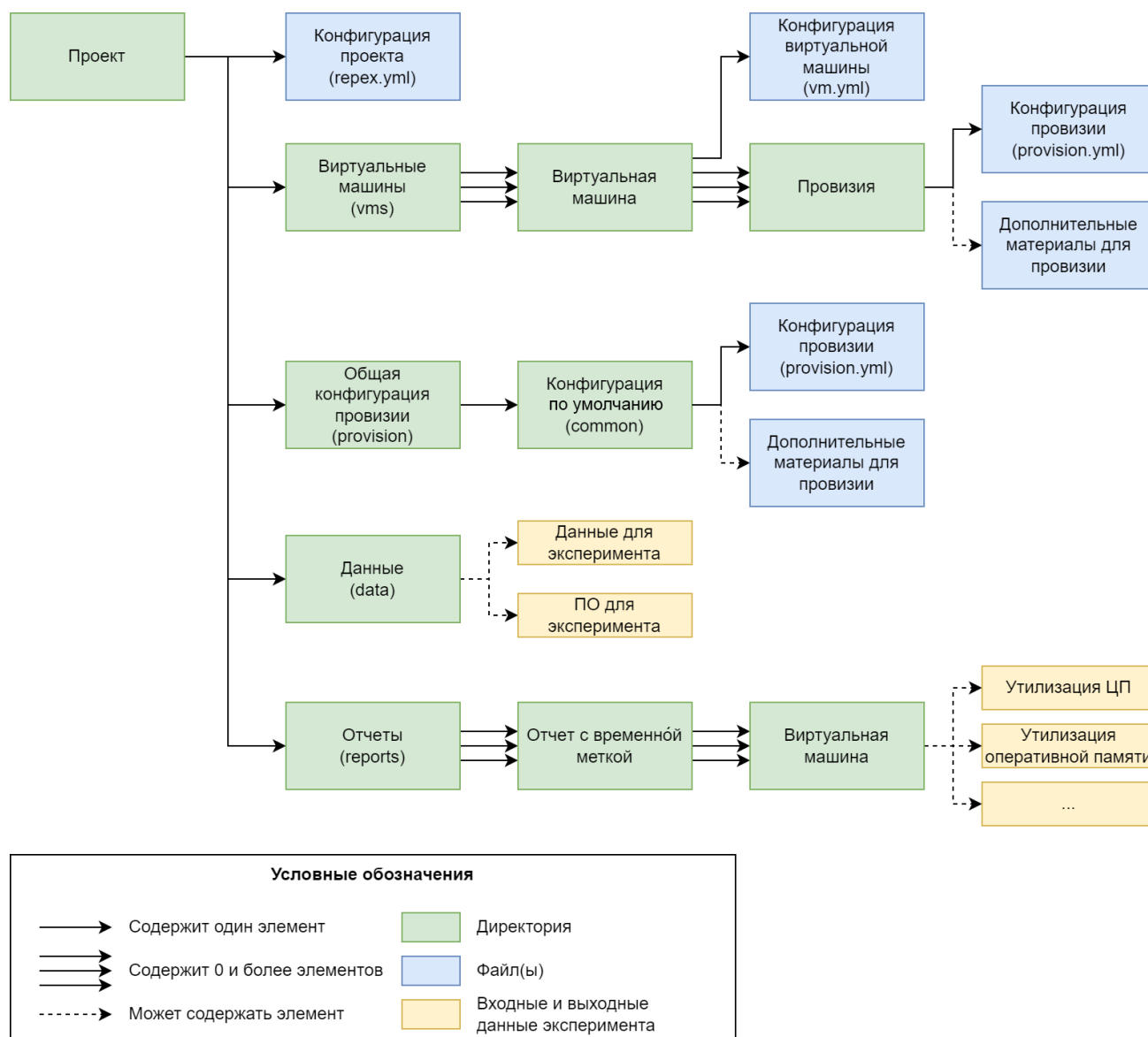


Рис. 3. Файловая структура проекта для проведения экспериментального исследования

виртуальной машины с целью применения ее настроек, отличных от настроек по умолчанию. Эти настройки будут применяться только на указанной стадии эксперимента, однако следует учитывать особенности работы гипервизора. Так, большинство настроек будут применены только после перезагрузки виртуальной машины. Некоторые настройки, такие как ограничения пропускной способности дисковой подсистемы или сетевого канала, применяются на перманентной основе, и потребуются создание еще одной стадии эксперимента для снятия примененных ограничений.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФРЕЙМВОРКА

На основе полученных результатов проектирования был разработан и опубликован в качестве ПО с открытым исходным кодом программный

фреймворк *Repexlab* (reproducible experiment laboratory)¹⁶. Он является инструментом с интерфейсом командной строки (command line interface, далее – CLI), основная задача которого – поддержка проведения экспериментальных исследований по оценке характеристик ИТ-решений. Фреймворк задает базовую конфигурацию проекта, обеспечивает применение настроек виртуального окружения на различных стадиях эксперимента.

Программный фреймворк базируется на ряде существующих инструментов:

VirtualBox – система виртуализации, которая позволяет организовать работу одной или нескольких виртуальных машин, в том числе на ПК;

¹⁶ <https://github.com/rnd-student-lab/repexlab>, дата обращения: 18.02.2022. [<https://github.com/rnd-student-lab/repexlab>. Accessed February 18, 2022.]

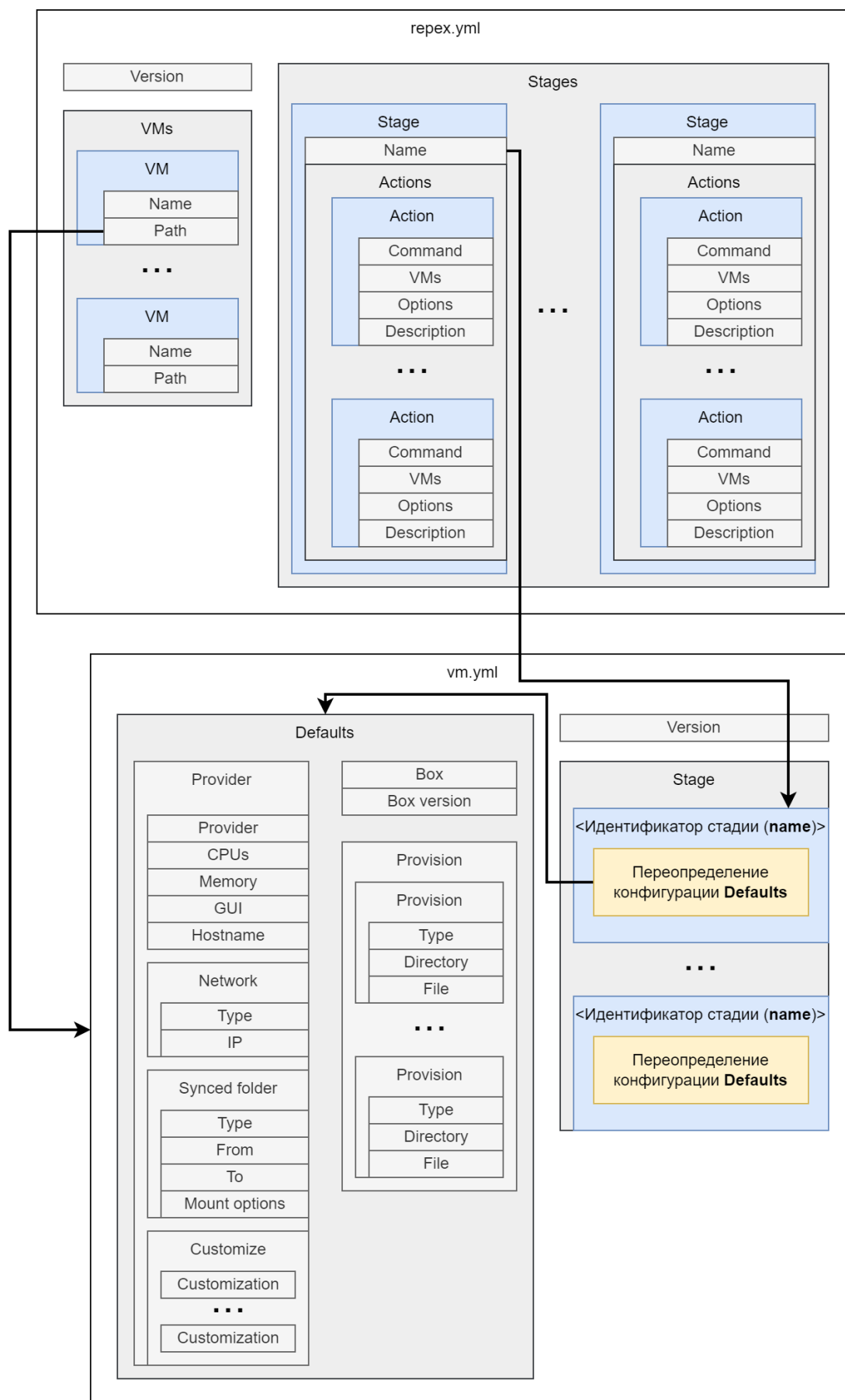


Рис. 4. Связь конфигурационных файлов проекта для проведения экспериментального исследования

Vagrant – инструмент создания и конфигурирования виртуальной среды. Как правило, применяется для подготовки виртуального рабочего окружения разработчиков. В базовом варианте использует *VirtualBox* в качестве гипервизора;

Ansible – инструмент управления облачными конфигурациями. Используется фреймворком как основное средство провизии виртуальных машин;

Atop – инструмент мониторинга процессов в операционной системе. Используется фреймворком для сбора данных о задействовании вычислительных ресурсов виртуальных машин;

*Node.js*¹⁷ и *NPM*¹⁸ – платформа для исполнения JavaScript-кода и сопутствующий пакетный менеджер. Так как *Repexlab* разработан на JavaScript, они необходимы для установки и исполнения кода фреймворка.

К основным функциям, отличающим фреймворк от совокупности применяемых в нем технологий, относятся:

- создание базового проекта для проведения экспериментального исследования;
- скаффолдинг¹⁹ для управления виртуальными машинами в рамках экспериментального стенда;
- управление виртуальным стендом из командной строки;
- встроенный инструмент автоматизации выполнения задач взаимодействия с виртуальным стендом.

Разработанный инструмент имеет команды, которые можно использовать как из командной строки, так и с помощью встроенных средств автоматизации выполнения задач. Они делятся на две категории: команды для взаимодействия с виртуальными машинами в рамках эксперимента (табл. 2) и команды для изменения конфигурации виртуального экспериментального стенда (табл. 3).

Так как команды из табл. 3 меняют структуру эксперимента, их использование возможно только через CLI. Большинство команд из табл. 2 применимо как с помощью CLI для тестирования и отладки отдельных действий, так и с помощью встроенного средства автоматизации выполнения задач. Исключениями являются команды «*vm status*» и «*vm ssh*», которые применимы только через CLI.

¹⁷ <https://nodejs.org/>, дата обращения: 18.02.2022. [<https://nodejs.org/>. Accessed February 18, 2022.]

¹⁸ <https://www.npmjs.com/>, дата обращения: 18.02.2022. [<https://www.npmjs.com/>. Accessed February 18, 2022.]

¹⁹ Скаффолдинг (англ. scaffolding) – метод программирования, предусматривающий генерацию программного кода для решения типовых задач, таких как, например, построение файловой структуры проекта или создание классов для доступа к таблицам базы данных. [Scaffolding is a programming method that involves generating program code for solving typical tasks, such as, for example, building a project file structure or creating classes for accessing database tables.]

Применение разработанного инструмента на практике предполагается по следующей методике:

- 1) планирование и дизайн экспериментального исследования;
- 2) инициализация проекта экспериментального исследования с заданным числом виртуальных машин;
- 3) подготовка формального описания виртуальных машин и их конфигураций в формате YAML;
- 4) разработка и отладка последовательности действий в эксперименте с помощью CLI-инструментария;
- 5) автоматизация последовательности действий в эксперименте с помощью инструментария автоматизации выполнения задач;
- 6) проведение эксперимента в программно-управляемом режиме;
- 7) анализ экспортированных данных об утилизации вычислительных ресурсов и иных данных, полученных в ходе эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проанализированы задачи, стоящие перед исследователями, и инструменты, с помощью которых осуществляется постановка экспериментов по оценке характеристик информационно-технологических решений. Выявлено, что проведение экспериментальных исследований требует от исследователя знаний и навыков работы с большим числом отдельных инструментов. Сформулированы три ключевые характеристики, которым должен соответствовать фреймворк.

Спроектирован предметно-ориентированный фреймворк, инкапсулирующий часть используемых технологий и предоставляющий необходимый функционал для проведения экспериментальных исследований. Подготовлена схема взаимодействия фреймворка с соответствующим ПО для проведения эксперимента. Определена общая схема проведения эксперимента на основе виртуальных машин. Также сформирована файловая структура проекта эксперимента, структура основных файлов проекта и внутренняя связь между файлами проекта.

На основе результатов проектирования разработан фреймворк, содержащий 12 команд для работы с виртуальными машинами. Большая часть команд возможна к исполнению как в режиме CLI, так и в режиме автоматизации выполнения задач. Для упрощения процесса подготовки проекта эксперимента реализованы 4 команды скаффолдинга. Также предложена методика использования фреймворка на практике, и описаны программные технологии, с помощью которых фреймворк реализован.

Таблица 2. Список команд взаимодействия с виртуальными машинами

Команда	Опции		Описание команды
	Имя	Описание	
vm compile	-n, --name	Имя виртуальной машины	Компилирует настройки виртуальных машин из слабоструктурированного формата данных в форматы конфигураций используемых инструментальных средств
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
vm copy	-n, --name	Имя виртуальной машины	Копирует файл или директорию между хост-системой и указанной виртуальной машиной
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
	-d, --direction	Copy direction	
	-f, --from	Copy from	
	-t, --to	Copy to	
vm destroy	-n, --name	Имя виртуальной машины	Удаляет все данные, связанные с виртуальной машиной (не конфигурации)
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
vm exec	-n, --name	Имя виртуальной машины	Выполняет команду на указанной виртуальной машине
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
	-c, --command	Команда для выполнения на виртуальной машине	
vm provision	-n, --name	Имя виртуальной машины	Производит установку и настройку ПО виртуальных машин в соответствии с конфигурациями провизии
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
vm report	-n, --name	Имя виртуальной машины	Формирует отчет о задействовании вычислительных ресурсов виртуальными машинами. В скобках указан вариант в случае использования автоматизации
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
	--start	Время начала периода для отчета (или название стадии эксперимента)	
	--end	Время завершения периода для отчета (или название стадии эксперимента)	
	-l, --labels	Список меток <i>Atop</i> для формирования отчета по ним	
vm restart	-n, --name	Имя виртуальной машины	Перезапускает виртуальную машину
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
vm setupHosts	-n, --name	Имя виртуальной машины	Добавляет связки IP-Hostname каждой виртуальной машины в эксперименте в файл /etc/hosts виртуальных машин с целью упрощения адресации
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
vm ssh	-n, --name	Имя виртуальной машины	Подключение к виртуальной машине посредством SSH
vm start	-n, --name	Имя виртуальной машины	Запускает виртуальную машину
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
vm status	-n, --name	Имя виртуальной машины	Отображает статус виртуальной машины
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	
vm stop	-n, --name	Имя виртуальной машины	Выключает виртуальную машину
	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	

Таблица 3. Список команд взаимодействия с проектом

Команда	Опции		Описание команды
	Имя	Описание	
project init	Отсутствуют, используется интерактивный режим ввода параметров		Инициализирует проект эксперимента в текущей директории и создает базовую файловую структуру
project run	-s, --stage	Имя стадии эксперимента	Запускает исполнение сконфигурированной последовательности действий эксперимента или указанной стадии эксперимента
project vm add	Отсутствуют, используется интерактивный режим ввода параметров		Добавляет новую конфигурацию виртуальной машины
project vm remove	-n, --name	Имя виртуальной машины	Удаляет существующую конфигурацию виртуальной машины

Дальнейшие исследования могут быть направлены на решение конкретных задач оценки информационно-технологических решений с применением фреймворка, выявление и устранение ограничений фреймворка, создание методической базы для проведения экспериментальных исследований с помощью предложенного инструментария.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий», номер проекта НИЧ 28/22.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the RTU MIREA grant “Innovations in the implementation of priority areas for the development of science and technology,” Research Part project No. 28/22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Barrett E., Bolz-Tereick C.F., Killick R., Mount S., Tratt L. Virtual machine warmup blows hot and cold. In: *Proc. ACM Program. Lang.* 2017;1:52:1–52:27. <https://doi.org/10.1145/3133876>
- Eismann S., Bezemer C.-P., Shang W., Okanović D., van Hoorn A. Microservices: A performance tester’s dream or nightmare? In: *Proceedings of the ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*, Edmonton AB Canada: ACM; 2020. P. 138–149. <https://doi.org/10.1145/3358960.3379124>
- Curino C., Godwal N., Kroth B., Kuryata S., Lapinski G., Liu S., et al. MLOS: An infrastructure for automated software performance engineering. In: *Proceedings of the Fourth International Workshop on Data Management for End-to-End Machine Learning*. 2020:1–5. <https://doi.org/10.1145/3399579.3399927>
- Jiang Z.M., Hassan A.E. A survey on load testing of large-scale software systems. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2015;41(11):1091–1118. <https://doi.org/10.1109/TSE.2015.2445340>
- Alankar B., Sharma G., Kaur H., Valverde R., Chang V. Experimental setup for investigating the efficient load balancing algorithms on virtual cloud. *Sensors*. 2020;20(24):7342. <https://doi.org/10.3390/s20247342>
- Spanaki P., Sklavos N. Cloud Computing: security issues and establishing virtual cloud environment via Vagrant to secure cloud hosts. In: Daimi K. (Ed.). *Computer and Network Security Essentials*. Springer, Cham; 2018. P. 539–553. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58424-9_31
- Saïngre D., Ledoux T., Menaud J.-M. BCTMark: a framework for benchmarking blockchain technologies. In: *2020 IEEE/ACS 17th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*. Antalya, Turkey: IEEE; 2020. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/AICCSA50499.2020.9316536>
- Potdar A.M., Narayan D.G., Kengond S., Mulla M.M. Performance evaluation of Docker container and virtual machine. *Procedia Computer Science*. 2020;171:1419–1428. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.152>
- Kucek S., Leitner M. An empirical survey of functions and configurations of open-source Capture the Flag (CTF) environments. *J. Network Comput. Appl.* 2020;151:102470. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102470>
- Chirigati F., Rampin R., Shasha D., Freire J. ReproZip: Computational reproducibility with ease. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data*. New York, USA: Association for Computing Machinery; 2016. P. 2085–2088. <https://doi.org/10.1145/2882903.2899401>
- Steeves V., Rampin R., Chirigati F. Using ReproZip for reproducibility and library services. *IASSIST Quarterly*. 2018;42(1):14–14. <https://doi.org/10.29173/iq18>
- Jimenez I., Sevilla M., Watkins N., Maltzahn C., Lofstead J., Mohror K., et al. The Popper convention: making reproducible systems evaluation practical. In: *2017 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*. 2017. P. 1561–1570. <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2017.157>
- Papadopoulos A.V., Versluis L., Bauer A., Herbst N., von Kistowski J., Ali-Eldin A., et al. Methodological principles for reproducible performance evaluation in cloud computing. *IEEE Trans. Software Eng.* 2021;47(8): 1528–1543. <https://doi.org/10.1109/TSE.2019.2927908>
- Artač M., Borovssak T., Di Nitto E., Guerriero M., Tamburri D.A. DevOps: introducing infrastructure-as-code. In: *2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering Companion (ICSE-C)*. 2017. P. 497–498. <https://doi.org/10.1109/ICSE-C.2017.162>
- Marquardson J. Infrastructure tools for efficient cybersecurity exercises. *Inform. Systems Education. J.* 2018;16(6):23–30.
- Šimec A., Držanić B., Lozić D. Isolated environment tools for software development. In: *2018 International Conference on Applied Mathematics Computer Science (ICAMCS)*. 2018. P. 48–484. <https://doi.org/10.1109/ICAMCS46079.2018.00016>
- Stillwell M., Coutinho J.G.F. A DevOps approach to integration of software components in an EU research project. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Quality-Aware DevOps*. New York, USA: Association for Computing Machinery; 2015. P. 1–6. <https://doi.org/10.1145/2804371.2804372>
- Magomedov S., Ilin D., Nikulchev E. Resource analysis of the log files storage based on simulation models in a virtual environment. *Appl. Sci.* 2021;11(11):4718. <https://doi.org/10.3390/app11114718>
- Staubitz T., Brehm M., Jasper J., Werkmeister T., Teusner R., Willems C., et al. Vagrant virtual machines for hands-on exercises in massive open online courses. In: Uskov V.L., Howlett R.J., Jain L.C. (Eds.). *Smart Education and e-Learning 2016*. Springer, Cham; 2016. P. 363–373. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39690-3_32

20. Berger O., Gibson J.P., Lecocq C., Bac C. Designing a virtual laboratory for a relational database MOOC. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Supported Education*. Lisbon, Portugal: SCITEPRESS – Science and Technology Publications; 2015. P. 260–268. <https://doi.org/10.5220/0005439702600268>
21. Hobeck R., Weber I., Bass L., Yasar H. Teaching DevOps: a tale of two universities. In: *Proceedings of the 2021 ACM SIGPLAN International Symposium on SPLASH-E*, New York, USA: Association for Computing Machinery; 2021. P. 26–31. <https://doi.org/10.1145/3484272.3484962>
22. Shah J., Dubaria D., Widhalm J. A survey of DevOps tools for networking. In: *2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)*. 2018. P. 185–188. <https://doi.org/10.1109/UEMCON.2018.8796814>
23. Sandobalín J., Insfran E., Abrahão S. On the effectiveness of tools to support infrastructure as code: Model-driven versus code-centric. *IEEE Access*. 2020;8:17734–17761. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966597>

Об авторе

Ильин Дмитрий Юрьевич, к.т.н., доцент, кафедра «Цифровые технологии обработки данных» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: i@dmityrilin.com. ResearcherID J-7668-2017, Scopus Author ID 57203848706, <https://orcid.org/0000-0002-0241-2733>, <https://www.researchgate.net/profile/Dmitry-Ilin-2>

About the author

Dmitry Ilin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Data Processing Digital Technologies, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: i@dmityrilin.com. ResearcherID J-7668-2017, Scopus Author ID 57203848706, <https://orcid.org/0000-0002-0241-2733>, <https://www.researchgate.net/profile/Dmitry-Ilin-2>

УДК 004.93
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-28-37>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разработка нейросетевой модели для анализа пространственных данных

Е.О. Ямашкина¹,
С.А. Ямашкин²,
О.В. Платонова^{1, @},
С.М. Коваленко¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, 430005 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: oplatonova@gmail.com

Резюме

Цели. Цели настоящего исследования – разработка и апробация нейросетевой модели для анализа пространственных данных. Преимуществом предложенной модели является наличие большого количества степеней свободы, что позволяет гибко конфигурировать модель, исходя из решаемой проблемы. Данная разработка входит в состав базы знаний репозитория моделей глубокого машинного обучения, включающего подсистему динамической визуализации на основе адаптивных веб-интерфейсов с интерактивной возможностью прямого редактирования архитектуры и топологии нейросетевых моделей.

Методы. Решение проблемы повышения точности анализа и классификации пространственных данных основано на привлечении геосистемного подхода, предполагающего анализ генетической однородности территориально-смежных образований различного масштаба и иерархического уровня. Для апробации предложенной методики применен открытый набор данных EuroSAT, сформированный для обучения и тестирования моделей машинного обучения с целью эффективного решения проблемы классификации систем землепользования и растительного покрова с использованием спутниковых снимков Sentinel-2. Онтологическая модель репозитория, в который входит модель, декомпозируется на домены моделей глубокого машинного обучения, решаемых задач и данных. Это позволяет дать комплексное определение формализуемой области знаний: каждая хранимая нейросетевая модель сопоставлена с набором конкретных задач и наборами данных.

Результаты. Апробация модели для набора EuroSAT, алгоритмически расширенного с позиции геосистемного подхода, дает возможность повысить точность классификации в условиях дефицита обучающих данных в пределах 9%, а также приблизиться к точности глубоких моделей ResNet50 и GoogleNet.

Выводы. Внедрение созданной модели в репозиторий позволит не только сформировать базу знаний моделей для анализа пространственных данных, но и решить проблему подбора эффективных моделей для решения задач в области цифровой экономики.

Ключевые слова: нейронная сеть, глубокое обучение, данные дистанционного зондирования, геосистема, классификация, машинное обучение

• Поступила: 20.12.2021 • Доработана: 11.07.2022 • Принята к опубликованию: 24.08.2022

Для цитирования: Ямашкина Е.О., Ямашкин С.А., Платонова О.В., Коваленко С.М. Разработка нейросетевой модели для анализа пространственных данных. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):28–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-28-37>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Development of a neural network model for spatial data analysis

Ekaterina O. Yamashkina ¹,
Stanislav A. Yamashkin ²,
Olga V. Platonova ^{1, @},
Sergey M. Kovalenko ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² National Research Mordovia State University, Saransk, 430005 Russia

@ Corresponding author, e-mail: oplatonova@gmail.com

Abstract

Objectives. The paper aimed to develop and validate a neural network model for spatial data analysis. The advantage of the proposed model is the presence of a large number of degrees of freedom allowing its flexible configuration depending on the specific problem. This development is part of the knowledge base of a deep machine learning model repository including a dynamic visualization subsystem based on adaptive web interfaces allowing interactive direct editing of the architecture and topology of neural network models.

Methods. The presented solution to the problem of improving the accuracy of spatial data analysis and classification is based on a geosystem approach for analyzing the genetic homogeneity of territorial-adjacent entities of different scales and hierarchies. The publicly available EuroSAT dataset used for initial validation of the proposed methodology is based on Sentinel-2 satellite imagery for training and testing machine learning models aimed at classifying land use/land cover systems. The ontological model of the repository including the developed model is decomposed into domains of deep machine learning models, project tasks and data, thus providing a comprehensive definition of the formalizing area of knowledge. Each stored neural network model is mapped to a set of specific tasks and datasets.

Results. Model validation for the EuroSAT dataset algorithmically extended in terms of the geosystem approach allows classification accuracy to be improved under training data shortage within 9% while maintaining the accuracy of ResNet50 and GoogleNet deep learning models.

Conclusions. The implementation of the developed model into the repository enhances the knowledge base of models for spatial data analysis as well as allowing the selection of efficient models for solving problems in the digital economy.

Keywords: neural network, deep learning, remote sensing data, geosystem, classification, machine learning

• Submitted: 20.12.2021 • Revised: 11.07.2022 • Accepted: 24.08.2022

For citation: Yamashkina E.O., Yamashkin S.A., Platonova O.V., Kovalenko S.M. Development of a neural network model for spatial data analysis. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):28–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-28-37>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий машинного обучения, в т.ч. основанных на использовании глубоких нейросетевых моделей, позволяет осуществлять высокоточный автоматизированный мониторинг систем природопользования, анализировать закономерности проявления стихийных процессов и явлений. Актуальной научной проблемой является решение задачи классификации типов систем землепользования и растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования высокого разрешения. Для этого применяются методы и алгоритмы глубокого машинного обучения в условиях малого количества размеченных данных посредством привлечения геосистемного подхода, предполагающего анализ генетической однородности территориально-смежных образований различного масштаба и иерархического уровня.

Описанная в данной статье модель геосистемного анализа территории позволяет подойти к решению обозначенной проблемы и характеризуется наличием большого количества степеней свободы. Это позволяет гибко конфигурировать инструмент, исходя из решаемой задачи и анализируемых данных. Предложенная разработка входит в состав базы знаний репозитория моделей глубокого машинного обучения, включающего подсистему динамической визуализации на основе адаптивных веб-интерфейсов с интерактивной возможностью прямого редактирования архитектуры и топологии нейросетевых моделей.

Развертывание репозитория нейросетевых моделей позволяет не только сформировать базу знаний для анализа пространственных данных, но и решить проблему подбора эффективных алгоритмов для решения задач в области цифровой экономики. Онтологическая модель декомпозирована на домены моделей глубокого машинного обучения, решаемых задач и данных. Это позволяет дать комплексное определение формализуемой области знаний: каждая хранимая нейросетевая модель сопоставлена с набором конкретных задач и наборами данных.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование глубокого машинного обучения позволяет снизить стоимость проводимых исследований в области анализа пространственных данных за счет возможности точной интерполяции

и экстраполяции измерений. Ключ к решению этих задач следует искать не только в совершенствовании архитектур моделей глубокого машинного обучения, но и в разработке методов и алгоритмов оптимального обогащения обучающих наборов данных [1–3]. Авторами предлагается использование геосистемного подхода, в рамках которого состояние и свойства каждой территориальной единицы определяются особенностями ее взаимодействия с окрестными объектами. В [4] доказано, что ландшафт территории имеет горизонтальную, вертикальную и временную структуры: под вертикальной структурой понимается деление ландшафта на геогоризонты, горизонтальная структура связана с делением ландшафта на фации, а временная связана с динамикой состояний ландшафтов.

На основе данного подхода сформулируем предположение о том, что точность классификации земель на базе дистанционного зондирования Земли можно увеличить, если нейронная сеть будет анализировать не только черты конкретной системы, но и особенности тех участков, с которыми она взаимодействует. С целью проверки этой гипотезы необходимо подготовить для обучения моделей несколько наборов данных [5]: базовых (состоящих из размеченных образцов территорий, зафиксированных при помощи космической съемки) и расширенных (дополненных данными о соседних и вмещающих геосистемах).

Перейдем к описанию методики анализа пространственных данных средствами глубокого машинного обучения и формирования глубокой нейросетевой модели, входящей в состав репозитория, способной эти данные эффективно проанализировать. Обоснованные с позиции системного анализа пользовательского опыта графические веб-интерфейсы репозитория глубоких нейросетевых моделей позволяют осуществлять подбор релевантной модели машинного обучения для решения конкретных задач анализа пространственных данных, получать систематизированную информацию о необходимой глубокой нейросетевой модели.

На рис. 1 представлена онтологическая модель репозитория, декомпозированная на домен моделей глубокого машинного обучения, домен решаемых проектных задач и домен пространственных данных. Это позволяет дать комплексное определение

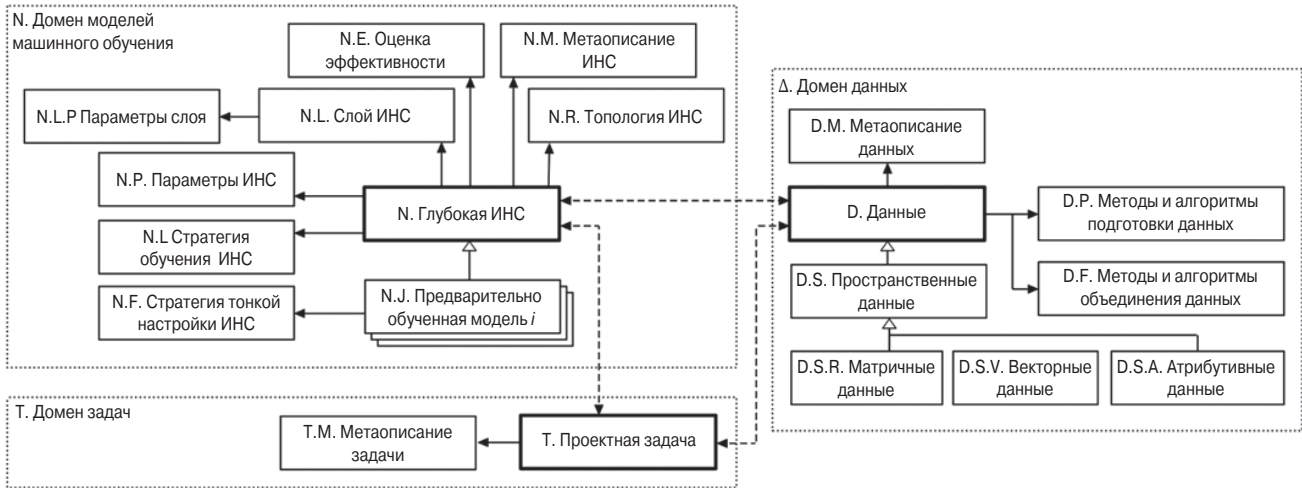


Рис. 1. Модель данных репозитория

формализуемой области знаний: каждая хранимая нейросетевая модель сопоставлена с набором конкретных задач и наборами данных. Организованная таким образом система дает возможность релевантного поиска эффективного архитектурного решения и его тонкой настройки для решения проектных задач посредством графического веб-интерфейса репозитория нейронных сетей.

Для интеграции и использования нейронных сетей предложена схема хранения моделей в виде метаязыка, которая позволяет конвертировать их в представления, используемые фреймворками машинного обучения. С позиции теоретико-множественного подхода набор моделей репозитория $MODELS$ представляет собой универсальное множество, мощность которого определяется числом моделей репозитория:

$$MODELS = \{MODEL_i | 1 \leq i \leq N \wedge i \in \mathbb{Z}\}.$$

Топология нейросетевой модели $MODEL_i$ может быть описана в виде граф-схемы $GRAPH_i$ и структурированного мета-описания $META_i$ (включая кортеж параметров модели $COMPILATION_i$, описывающий методы и алгоритмы оптимизации нейросетевой модели, а также параметры ее функционирования). Элемент $GRAPH_i$ – это ориентированный граф, в котором множество вершин $LAYERS_i$ определяет набор слоев модели, а множество дуг $LINKS_i$ – топологию сети, устанавливая связи между слоями:

$$MODEL_i = \langle META_i, GRAPH_i \rangle = \\ = \langle META_i, \langle LAYERS_i, LINKS_i \rangle \rangle.$$

Ключевым компонентом графовой модели i выступает слой $LAYER_{ij}$, который может быть представлен в виде набора объектов, определяющих архитектуру слоя $TYPE_{layer_{ij}}$, набор интерфейсов $INTERFACES_{ij}$ и аргументов $PROPERTIES_{ij}$:

$$LAYER_{ij} = \langle TYPE_{layer_{ij}}, INTERFACES_{ij}, PROPERTIES_{ij} \rangle.$$

Объект $TYPE_{layer}$ определяет архитектуру слоя и задает особенности обработки данных и настройки гиперпараметров при обучении модели. Параметры интерфейса $INTERFACES_{ij}$ слоя $LAYER_{ij}$ (входов $INPUTS_{ij}$ и выходов $OUTPUTS_{ij}$) определяются кортежем $\langle name, type \rangle$, где $name$ задает название интерфейса, $type$ – размерность и тип данных.

$$INTERFACES_{ij} = \langle INPUTS_{ij}, OUTPUTS_{ij} \rangle = \\ = \langle \{INPUTS_{ij\lambda} | 1 \leq \lambda \leq \Lambda \wedge \lambda \in \mathbb{Z}\}, \\ \{OUTPUTS_{ij\mu} | 1 \leq \mu \leq M \wedge \mu \in \mathbb{Z}\} \rangle.$$

Набор $PROPERTIES_{ij}$ задает гиперпараметры, описывающие особенности функционирования слоя $LAYER_{ij}$. Данный набор именованных аргументов может включать определение алгоритмов инициализации весов, регуляризации, активации.

Для осуществления классификации пространственных данных перейдем к проектированию глубокой нейронной сети $MODEL$, принимающей на вход тензоры данных различного иерархического уровня о классифицируемой территории и вмещающих ее геосистемах. С точки зрения «черного ящика», глубокая модель классификации, основанная на применении геосистемного подхода, представляет собой функциональный элемент, принимающий на вход полученные на основе космической съемки изображения территории и вмещающих ее геосистем, а также синтетических карт [6, 7]. Количество входов $INPUTS$ может варьироваться, исходя из числа уровней геосистемной модели территории. Однако к их росту следует относиться с осторожностью, т.к. это неминуемо повлечет необходимость роста емкости модели. Модель имеет один выход, имеющий форму вектора, каждый i -й элемент которого определяет прогнозируемую вероятность принадлежности

территории i -му классу. Итоговая гипотеза о принадлежности территории определенному классу выдвигается по принципу «победитель получает все», при котором объект относится к классу, для которого модель предсказывает максимальную вероятность. Перейдем к декомпозиции модели.

Структура каждого блока представляет собой цепочку слоев *LAYERS*. Первый слой, осуществляющий операцию глубинной разделимой свертки, позволяет извлечь признаки из исходного изображения и, в отличие от применения обычного сверточного слоя, позволяет сделать модель более компактной и, соответственно, устойчивой к переобучению. Лежащая в основе функционирования слоя операция двухмерной свертки с ядром $\mathbf{W}$ размера K представляет собой линейное преобразование, при котором каждое значение $y_{i,j}$ выходной матрицы $\mathbf{Y}$ рассчитывается на основе значений x исходной матрицы $\mathbf{X}$ согласно следующему выражению:

$$y_{i,j} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{X} = \sum_{a=0}^{K-1} \sum_{b=0}^{K-1} W_{a,b} x_{i+a,j+b}.$$

Операция свертки обладает важными свойствами: сохраняет структуру и геометрию входа, характеризуется разреженностью и многократным использованием одних и тех же весов. Операция глубинной разделимой свертки работает не только с пространственными измерениями, но также с измерением глубины, например, каналами изображения, и, в отличие от классической свертки, предполагает использование отдельных сверточных ядер, на основе которых к исходному тензору последовательно применяются две свертки: глубинная и поточечная.

Отметим, что при решении тестовых задач классификации, описанных далее, было проведено сплит-тестирование моделей с классическими сверточными слоями и с глубинной разделимой сверткой, которое подтвердило эффективность использования второго подхода. Следующим слоем блока извлечения признаков, эффективность которого была апробирована экспериментально, стал слой *batch normalization* [8], позволяющий достичь регуляризации и устойчивости модели [9, 10]. Для выполнения операции активации была выбрана функция ReLU^1 [11], осуществляющая преобразование вида $x = \max(0, x)$. Завершает блок извлечения признаков слой субдискретизации, осуществляющий применение операции максимума для уменьшения размера получаемых представлений и имеющий внешние выходы. Эксперименты показали, что применение операции взятия максимума показало

наилучший результат. Отметим, что количество выходных фильтров в свертке и размер ядра свертки предлагается выбирать по принципу минимизации этих значений с сохранением приемлемой точности классификации. С каждым новым шагом, заключающимся в извлечении признаков следующего уровня, рекомендуется увеличение количества выходных фильтров для глубинной разделимой свертки.

Следующим компонентным блоком модели является модуль слияния признаков. Он принимает на вход признаки уровня N , извлеченные из изображения классифицируемой территории и ассоциируемых с ним изображений геосистем. Также модули слияния второго и последующих уровней принимают на вход выходные данные предыдущего модуля слияния. Все входные данные конкатенируются в единый тензор и подвергаются обработке при помощи конвейера извлечения признаков. Он состоит из слоев глубинной разделимой свертки, пакетной нормализации, активации и субдискретизации.

Выход последнего модуля слияния признаков преобразуется в вектор и подается на вход многослойного персептрона. Число плотно связанных слоев многослойного персептрона и их мощность выбираются по принципу минимизации данных параметров при сохранении достаточной точности классификации. Кроме этого, для решения проблемы переобучения рекомендуется применение пакетной нормализации и прореживания к выходам плотно-связанного слоя. Для активации выхода входного и скрытых слоев выбрана функция ReLU , для выходного слоя – Sigmoid [12] при бинарной классификации и Softmax [12] при мультиклассовой.

При обучении классификатора в качестве оптимизатора используется алгоритм RMSProp^2 , основанный на методе стохастического градиентного спуска, а в качестве функции потерь – перекрестная энтропия. На тонкую настройку модели оказывает влияние особенности конкретной решаемой задачи классификации [13]. Перейдем к апробации модели.

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ

Для первичной апробации предложенной методики применен открытый набор данных *EuroSAT* [14], сформированный для обучения и тестирования моделей машинного обучения с целью эффективного решения проблемы классификации

¹ <https://pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.ReLU.html>, дата обращения 27.07.2022. [<https://pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.ReLU.html>. Accessed July 27, 2022.]

² Hinton G., Srivastava N., Swersky K. *Neural networks for machine learning. Lecture 6a. Overview of mini-batch gradient descent*. URL: <http://www.cs.toronto.edu/~hinton/coursera/lecture6/lec6.pdf>, дата обращения 27.07.2022. [Hinton G., Srivastava N., Swersky K. *Neural networks for machine learning. Lecture 6a. Overview of mini-batch gradient descent*. URL: <http://www.cs.toronto.edu/~hinton/coursera/lecture6/lec6.pdf>. Accessed July 27, 2022.]

Таблица. Точность классификации различных моделей для набора данных EuroSAT

Метод	Число модулей	Набор данных	Диапазон тестирования								
			10/90	20/80	30/70	40/60	50/50	60/40	70/30	80/20	90/10
CNN (2layers)	422 378	EuroSAT	75.88	79.84	81.29	83.04	84.48	85.77	87.24	87.96	88.66
ResNet-50	25 636 712	EuroSAT	75.06	88.53	93.75	94.01	94.45	95.26	95.32	96.43	96.37
GoogleNet	6 797 700	EuroSAT	77.37	90.97	90.57	91.62	94.96	95.54	95.70	96.02	96.17
Разработанная модель	1 324 526	Расширенный EuroSAT	86.23	91.52	93.98	94.11	94.29	94.35	94.41	94.65	95.30

систем землепользования и растительного покрова с использованием спутниковых снимков Sentinel-2³ [15]. Набор данных равномерно размечен на 10 классов (annual crop – однолетние культуры; forest – леса; herbaceous vegetation – травянистая растительность; highway – шоссе; industrial – промышленные объекты; pasture – пастбища; permanent crop – многолетние культуры; residential – жилые кварталы; river – реки; water – открытые водоемы) и состоит из 27 000 изображений, содержащих информацию об участках земель, распределенных по территории Европейского Союза, в 13 спектральных диапазонах. Каждый элемент набора данных имеет размер 64 × 64 пикселя с пространственным разрешением 10 м на пиксель, а также характеризуется географической привязкой.

Приведем характеристики сравнения точности классификации различных моделей для набора данных EuroSAT [16], проводимой на основе различных соотношений тренировочных и тестовых выборок. Нейросетевая модель ResNet-50 [17] показывает точность 96.43% (для разделения обучающих и проверочных данных в соотношении 80 к 20) и 75.06% (при соотношении 10 к 90). Небольшая сверточная сеть в два слоя достигает точности в 87.96% (разделение 80 к 20) и 75.88% (разделение 10 к 90). Отметим также, что модели глубокого машинного обучения на основе сверточных слоев показали преимущественно большую точность, чем машины опорных векторов.

Таким образом, современные глубокие сверточные сети показывают превосходную точность классификации космических снимков при относительно большом размере обучающей выборки набора данных EuroSAT. Однако в условиях нехватки обучающих данных представленные подходы начинают значительно терять в точности. Проблема повышения точности методов и алгоритмов анализа пространственных данных в условиях их дефицита является актуальной и открытой.

Процесс получения дополнительных данных потенциально подлежит полной автоматизации:

обладая сведениями о географических координатах (широте и долготе) классифицируемого участка, можно сделать запрос к API провайдера пространственных данных на получение фрагмента космического снимка территории, включающего эти координаты и характеризующегося необходимым масштабом и разрешением. Таким образом, мы получаем возможность алгоритмического расширения набора обучающих данных за счет импорта фрагментов космической съемки, характеризующих геосистемы более высокого иерархического уровня и вмещающие классифицируемый участок.

В настоящее время пространственные данные открыто предоставляются множеством провайдеров через Интернет, некоторые из которых предлагают для быстрого получения удобные прикладные программные интерфейсы (API) [18, 19]. Тот факт, что эти данные обладают низким временным разрешением (часто мы не имеем возможности и близко выбрать конкретную дату космической съемки), обуславливает их низкую стоимость. Одновременно с этим, они не перестают быть информативным источником сведений о вмещающих геосистемах различного иерархического уровня. Авторами статьи использована платформа API Mapbox⁴ для автоматизированной аугментации исходного набора данных космическими снимками различного масштаба.

Сравнительные значения точности предложенной модели и CNN (2 layers) [12], ResNet-50, GoogleNet [20] представлены в таблице. При выделении тестовых данных из набора EuroSAT в соотношении 40% и ниже предложенная в статье модель показывает наилучший результат, причем относительная эффективность растет с уменьшением обучающей выборки до 10% (86.23% против 77.37% у второго результата (GoogleNet)). С ростом размера обучающих данных модель начинает уступать глубоким моделям ResNet-50 и GoogleNet, однако этот разрыв укладывается в диапазон 2%.

Разработанная модель позволила получить такие результаты благодаря анализу расширенного с позиции геосистемного подхода набора EuroSAT

³ <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>, дата обращения 27.07.2022. [<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Accessed July 27, 2022.]

⁴ <https://docs.mapbox.com/api/overview/>, дата обращения 27.07.2022. [<https://docs.mapbox.com/api/overview/>. Accessed July 27, 2022.]

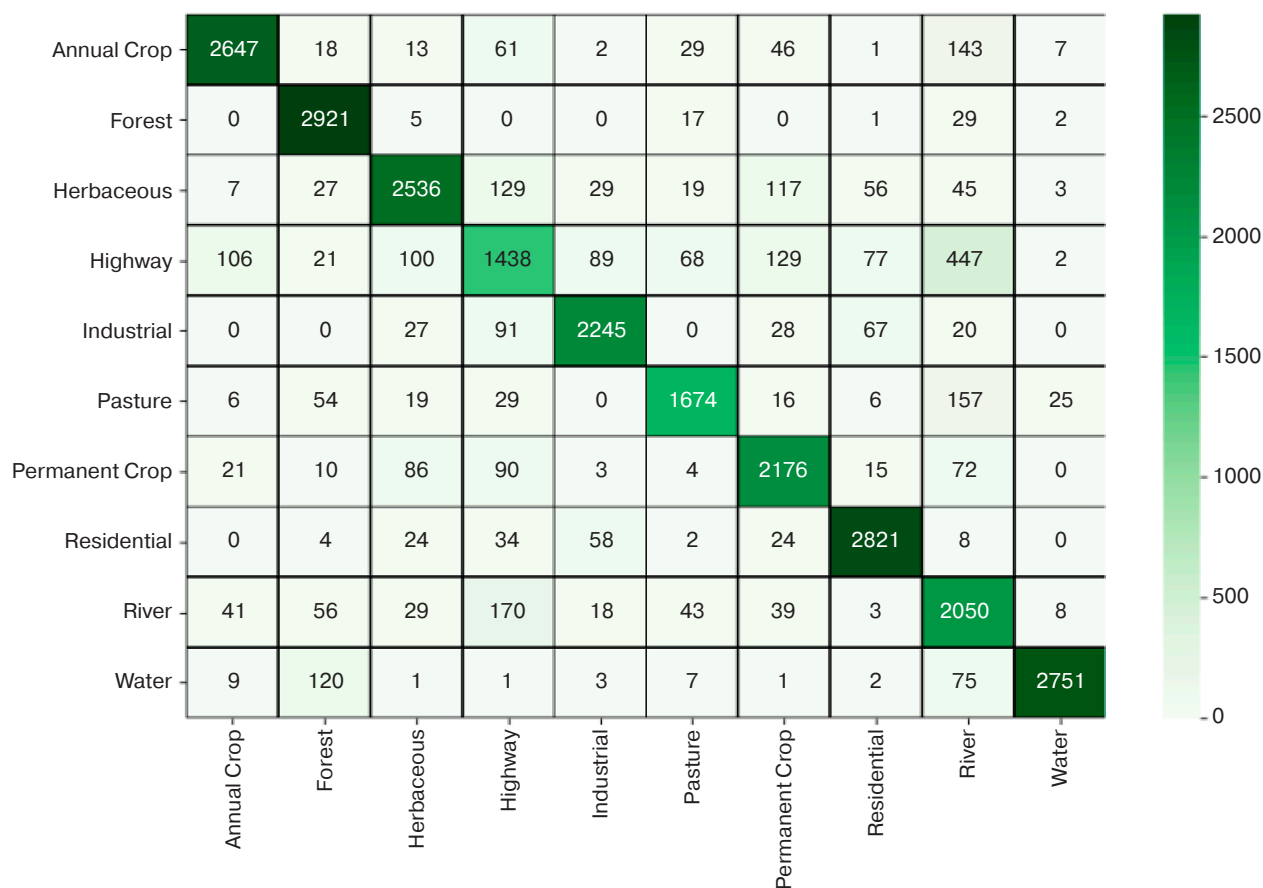


Рис. 2. Матрица ошибок

(в то время как модели ResNet-50 и GoogleNet обучались и анализировали исходный набор данных EuroSAT. Разница в условиях проведения эксперимента нивелировалась низкой стоимостью и быстротой полностью автоматизированного процесса расширения обучающего набора, а также более низкой емкостью модели: 1.3 млн единиц против 6.8 млн у GoogleNet и 25.6 млн у ResNet-50. Таким образом, получение преимущества в обучении модели в условиях дефицита данных обусловлено малозатратным автоматизированным расширением набора на основе геосистемного подхода и созданием эффективной модели для его анализа.

Представляет интерес анализ процесса обучения модели. Так как обучение нейронных сетей – это вероятностный процесс, была проведена серия из 10 экспериментов, по результатам которой построена зависимость математического ожидания и стандартного отклонения точности классификации на проверочных данных от эпохи обучения. Модель на ранних стадиях процесса обучения показывает низкую точность классификации расширенного набора, которая начинает расти практически с нулевого значения. Сверточная нейронная сеть в два слоя и модель ResNet50 с первой эпохи достигают точности выше 40%. Однако после десятой эпохи

обучения созданная модель опережает другие модели, достигая ожидаемой точности в 86%. Также отметим малое среднее квадратическое отклонение от математического ожидания зависимости, характерное при обучении на малом наборе данных. Это говорит о большей устойчивости процесса обучения модели и высокой способности к правильному обобщению информации об анализируемых признаках.

Разберем случаи, когда разработанная модель показала более низкую точность. Матрица ошибок представлена на рис. 2. Низкие значения попаданий для классов highway, industrial, water возникают из-за того, что учет изображений вмещающих геосистем при классификации неминуемо приводит к росту анализируемых данных, для анализа которых может потребоваться большая емкость модели. Кроме того, дополнительные изображения в ряде случаев могут ввести модель классификации в заблуждение: определено, с точки зрения алгоритма гораздо проще классифицировать одно однородное изображение водной поверхности, нежели изображение, дополненное несколькими фрагментами более мелкого масштаба, включающими прибрежные территории.

Таким образом, расширение набора EuroSAT с позиции геосистемного подхода и разработка модели позволили повысить точность классификации

в условиях дефицита обучающих данных (разделении обучающего набора на обучающий и тестовый в соотношении от 10/90 до 40/60) и показать результаты, которые превышают значения точности моделей глубокого машинного обучения при классификации набора EuroSAT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная нейросетевая модель, входящая в состав базы знаний репозитория моделей глубокого машинного обучения, позволяет решить проблему повышения точности анализа и классификации пространственных данных посредством привлечения геосистемного подхода, предполагающего анализ генетической однородности территориально-смежных образований различного масштаба и иерархического уровня. Внедрение в репозиторий позволит не только сформировать базу знаний моделей для анализа пространственных данных, но и решить проблему подбора эффективных моделей для решения задач в области цифровой экономики. Преимуществом предложенной модели является наличие высокого количества степеней свободы, что позволяет гибко конфигурировать модель, исходя из решаемой проблемы.

Апробация модели для набора EuroSAT, алгоритмически расширенного с позиции геосистемного подхода, показала возможность повышения точности классификации в условиях дефицита обучающих данных в пределах 9%, а также приближения к точности глубоких моделей ResNet50 и GoogleNet. После десятой эпохи обучения созданная модель опережает другие модели, достигая ожидаемой точности в 86%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saleh H., Alexandrov D., Dzhonov A. Uberisation business model based on blockchain for implementation decentralized application for lease/rent lodging. In: Rocha Á., Serhini M. (Eds.). *Information Systems and Technologies to Support Learning (EMENA-ISTL 2018)*. Smart Innovation, Systems and Technologies. *International Conference Europe Middle East & North Africa*. Springer, Cham. 2018;111:225–232. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03577-8_26
2. Сигов А.С., Цветков В.Я., Рогов И.Е. Методы оценки сложности тестирования в сфере образования. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):64–72. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-64-72>
3. Liu Y., Sangineto E., Bi W., Sebe N., Lepri B., Nadai M. Efficient training of visual transformers with small datasets. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2021;34:23818–23830. URL: <https://arxiv.org/pdf/2106.03746.pdf>

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (грант № МК-199.2021.1.6).

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the grant from the President of the Russian Federation, project No. MK-199.2021.1.6).

Вклад авторов

Е.О. Ямашкина – разработка и описание методологии исследования, проведение экспериментов, оптимизация модели.

С.А. Ямашкин – постановка задачи и обоснование концепции исследования, проектирование и разработка нейросетевой модели.

О.В. Платонова – анализ отечественного и зарубежного опыта в области интерпретации пространственных данных, работа с материалом, редактирование и подготовка рукописи.

С.М. Коваленко – планирование эксперимента, интерпретация и обобщение результатов исследования.

Authors' contributions

E.O. Yamashkina – development and description of the research methodology, conducting experiments, and model optimization.

S.A. Yamashkin – statement of the problem and justification of the research concept, design and development of a neural network model.

O.V. Platonova – analysis of domestic and foreign experience in the field of interpretation of spatial data, work with the material, editing and preparation of the manuscript.

S.M. Kovalenko – planning of the experiment, interpretation and generalization of the results of the study.

REFERENCES

1. Saleh H., Alexandrov D., Dzhonov A. Uberisation business model based on blockchain for implementation decentralized application for lease/rent lodging. In: Rocha Á., Serhini M. (Eds.). *Information Systems and Technologies to Support Learning (EMENA-ISTL 2018)*. Smart Innovation, Systems and Technologies. *International Conference Europe Middle East & North Africa*. Springer, Cham. 2018;111:225–232. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03577-8_26
2. Sigov A.S., Tsvetkov V.Ya., Rogov I.E. Methods for assessing testing difficulty in education sphere. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):64–72 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-64-72>
3. Liu Y., Sangineto E., Bi W., Sebe N., Lepri B., Nadai M. Efficient training of visual transformers with small datasets. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2021;34:23818–23830. Available from URL: <https://arxiv.org/pdf/2106.03746.pdf>

4. Занозин В.В., Карабаева А.З., Конеева А.В., Макеева Е.В., Молокова В.Г. Особенности горизонтальной структуры центральной части ландшафта дельты Волги. *Географические науки и образование: сб. трудов XI Всероссийской научно-практической конференции*. 2018. С. 161–163.
5. Yamashkina E.O., Kovalenko S.M., Platonova O.V. Development of repository of deep neural networks for the analysis of geospatial data. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021;1047(1):012124. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1047/1/012124>
6. Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sens. Environ.* 2020;236(5):111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
7. Ямашкин С.А., Ямашкин А.А. Повышение эффективности процесса интерпретации данных дистанционного зондирования Земли за счет анализа дескрипторов окрестности. *Инженерные технологии и системы*. 2018;28(3):352–365. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.352-365>
8. Ioffe S., Szegedy Ch. *Batch Normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift*. Preprint. March 2, 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1502.03167.pdf>
9. Yao Z., Cao Y., Zheng S., Huang G., Lin S. Cross-iteration Batch Normalization. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2021:12331–12340. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01215>
10. Jung W., Jung D., Kim B., Lee S., Rhee W., Ahn J.H. Restructuring Batch Normalization to accelerate CNN training. In: *Proceedings of Machine Learning and Systems*. 2019;1:14–26. URL: <https://mlsys.org/Conferences/2019/doc/2019/18.pdf>
11. Chen Y., Dai X., Liu M., Chen D., Yuan L., Liu Z. Dynamic ReLU. In: Vedaldi A., Bischof H., Brox T., Frahm J.M. (Eds.). *Computer Vision – ECCV 2020. ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer; 2020. V. 12364. P. 351–367. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58529-7_21
12. Gu J., et al. Recent advances in convolutional neural networks. *Pattern Recognition*. 2018;77:354–377. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.10.013>
13. Kozaev A., Saleh H., Alexandrov D. Simulation of emergency situations on main gas pipeline with MATLAB Simulink. In: *2019 Actual Problems of Systems and Software Engineering (APSSE)*. IEEE. 2019:63–68. <https://doi.org/10.1109/APSSE47353.2019.00015>
14. Helber P., Bischke B., Dengel A., Borth D. Introducing EuroSAT: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification. In: *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS)*. 2018: 204–207. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519248>
15. Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V.R., Murayama Y., Ranagalage M. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sens.* 2020;12(14):2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
16. Helber P., Bischke B., Dengel A., Borth D. EuroSAT: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2019;12(7): 2217–2226. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2918242>
4. Zanozin V.V., Karabaeva A.Z., Koneeva A.V., Makeeva E.V., Molokova V.G. Features of the horizontal structure of the central part of the Volga delta landscape. In: *Geographic Sciences and Education: Proceedings of the XI All-Russian Conf.* 2018. P. 161–163 (in Russ.).
5. Yamashkina E.O., Kovalenko S.M., Platonova O.V. Development of repository of deep neural networks for the analysis of geospatial data. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021;1047(1):012124. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1047/1/012124>
6. Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sens. Environ.* 2020;236(5):111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
7. Yamashkin S.A., Yamashkin A.A. Improving the efficiency of remote sensing data interpretation by analyzing neighborhood descriptors. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems (Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin)*. 2018; 28(3):352–365 (in Russ.). <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.352-365>
8. Ioffe S., Szegedy Ch. *Batch Normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift*. Preprint. March 2, 2015. Available from URL: <https://arxiv.org/abs/1502.03167>
9. Yao Z., Cao Y., Zheng S., Huang G., Lin S. Cross-iteration Batch Normalization. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2021:12331–12340. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01215>
10. Jung W., Jung D., Kim B., Lee S., Rhee W., Ahn J.H. Restructuring Batch Normalization to accelerate CNN training. In: *Proceedings of Machine Learning and Systems*. 2019;1:14–26. Available from URL: <https://mlsys.org/Conferences/2019/doc/2019/18.pdf>
11. Chen Y., Dai X., Liu M., Chen D., Yuan L., Liu Z. Dynamic ReLU. In: Vedaldi A., Bischof H., Brox T., Frahm J.M. (Eds.). *Computer Vision – ECCV 2020. ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer; 2020. V. 12364. P. 351–367. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58529-7_21
12. Gu J., et al. Recent advances in convolutional neural networks. *Pattern Recognition*. 2018;77:354–377. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.10.013>
13. Kozaev A., Saleh H., Alexandrov D. Simulation of emergency situations on main gas pipeline with MATLAB Simulink. In: *2019 Actual Problems of Systems and Software Engineering (APSSE)*. IEEE. 2019:63–68. <https://doi.org/10.1109/APSSE47353.2019.00015>
14. Helber P., Bischke B., Dengel A., Borth D. Introducing EuroSAT: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification. In: *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS)*. 2018: 204–207. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519248>
15. Phiri D., Simwanda M., Salekin S., Nyirenda V.R., Murayama Y., Ranagalage M. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sens.* 2020;12(14):2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
16. Helber P., Bischke B., Dengel A., Borth D. EuroSAT: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2019;12(7): 2217–2226. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2918242>

17. Szegedy Ch., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A. Inception-v4, Inception-ResNet and the impact of residual connections on learning. In: *Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2017;31(1). <https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.11231>
18. Yamashkin S.A., Radovanovic M.M., Yamashkin A.A., Barmin A.N., Zanozin V.V., Petrovic M.D. Problems of designing geoportal interfaces. *GeoJournal of Tourism and Geosites*. 2019;24(1):88–101. <https://doi.org/10.30892/gtg.24108-345>
19. Soni A., Ranga V. API features individualizing of web services: REST and SOAP. *Int. J. Innovative Technol. Exploring Eng.* 2019;8(9S):664–671. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I1107.0789S19>
20. Szegedy Ch., et al. Going deeper with convolutions. In: *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015;1–9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>
17. Szegedy Ch., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A. Inception-v4, Inception-ResNet and the impact of residual connections on learning. In: *Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2017;31(1). <https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.11231>
18. Yamashkin S.A., Radovanovic M.M., Yamashkin A.A., Barmin A.N., Zanozin V.V., Petrovic M.D. Problems of designing geoportal interfaces. *GeoJournal of Tourism and Geosites*. 2019;24(1):88–101. <https://doi.org/10.30892/gtg.24108-345>
19. Soni A., Ranga V. API features individualizing of web services: REST and SOAP. *Int. J. Innovative Technol. Exploring Eng.* 2019;8(9S):664–671. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I1107.0789S19>
20. Szegedy Ch., et al. Going deeper with convolutions. In: *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015;1–9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>

Об авторах

Ямашкина Екатерина Олеговна, аспирант, кафедра вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: eoladanova@yandex.ru. Scopus Author ID 57222118879, SPIN-код РИНЦ 9940-1751, <https://orcid.org/0000-0002-8086-7717>

Ямашкин Станислав Анатольевич, к.т.н., доцент, кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (430005, Россия, Саранск, ул. Большевикская, д. 68). E-mail: yamashkinsa@mail.ru. ResearcherID N-2939-2018, Scopus Author ID 9133286400, SPIN-код РИНЦ 5569-7314, <https://orcid.org/0000-0002-7574-0981>

Платонова Ольга Владимировна, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: oplatonova@gmail.com. Scopus Author ID 57222119478, SPIN-код РИНЦ 4680-5904

Коваленко Сергей Михайлович, к.т.н., профессор, кафедра вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kovalenko@mirea.ru. Scopus Author ID 57222117274, SPIN-код РИНЦ 7308-8250

About the authors

Ekaterina O. Yamashkina, Postgraduate Student, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: eoladanova@yandex.ru. Scopus Author ID 57222118879, RSCI SPIN-code 9940-1751

Stanislav A. Yamashkin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Automated Information Processing and Management Systems, Institute of Electronics and Lighting Engineering, Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya ul., Saransk, 430005 Russia). E-mail: yamashkinsa@mail.ru. ResearcherID N-2939-2018, Scopus Author ID 9133286400, RSCI SPIN-code 5569-7314, <https://orcid.org/0000-0002-7574-0981>

Olga V. Platonova, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Head of the Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: oplatonova@gmail.com. Scopus Author ID 57222119478, RSCI SPIN-code 4680-5904

Sergey M. Kovalenko, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kovalenko@mirea.ru. Scopus Author ID 57222117274, RSCI SPIN-code 7308-8250

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

УДК 004.93'11
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-38-48>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Трекер объектов на спортивных мероприятиях

М.А. Волкова[@],
М.П. Романов,
А.М. Бычков

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

Резюме

Цели. На сегодняшний день спорт является одной из наиболее перспективных областей для применения систем слежения за объектами. Большинство методов, на базе которых реализованы эти системы, ориентированы на отслеживание движущихся объектов в двумерной плоскости, например, для локализации игроков на поле, а также на их идентификацию по различным признакам. С развитием дрон-рейсинга актуальной стала задача определения положения в трехмерной системе координат. Целями работы являются разработка программно-алгоритмического обеспечения метода, позволяющего отслеживать траекторию движущихся объектов в трехмерном пространстве, абстрагированного от способа сегментации данных, и тестирование предложенного решения для оценки качества работы трекера.

Методы. На основе проведенного обзора и анализа современных методов отслеживания траекторий движения был выбран метод сопоставления информации о скорости и положении объектов.

Результаты. Предложена структура программно-алгоритмического обеспечения трекера движущихся объектов на спортивных мероприятиях и представлены результаты экспериментальных исследований на общедоступном датасете APIDIS, который включает в себя фрагменты видеозаписи баскетбольной игры, где по критерию качества отслеживания MOTA был получен показатель 0.858. Также были проведены эксперименты с использованием предложенного авторами датасета с пролетом FPV квадрокоптера по трассе. В результате по полученным с трекера данным была восстановлена траектория полета дрона в трехмерном пространстве.

Выводы. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что предложенное решение позволяет отслеживать траекторию полета квадрокоптера в трехмерной (мировой) системе координат, а также подходит для слежения за объектами на спортивных мероприятиях.

Ключевые слова: трекер, слежение за движущимися объектами, FPV квадрокоптер, определение положения, система слежения

• Поступила: 02.06.2022 • Доработана: 19.07.2022 • Принята к опубликованию: 26.08.2022

Для цитирования: Волкова М.А., Романов М.П., Бычков А.М. Трекер объектов на спортивных мероприятиях. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):38–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-38-48>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

3D object tracker for sports events

Maria A. Volkova @,
Mikhail P. Romanov,
Alexander M. Bychkov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Sports events are currently among the most promising areas for the application of tracking systems. In most cases, such systems are designed to track moving objects in a two-dimensional plane, e.g., players on the field, as well as to identify them by various features. However, as new sports such as drone racing are developed, the problem of determining the position of an object in a three-dimensional coordinate system becomes relevant. The aim of the present work was to develop algorithms and software for a method to perform 3D tracking of moving objects, regardless of the data segmentation technique, and to test this method to estimate the tracking quality.

Methods. A method for matching information on the speed and position of objects was selected based on a review and analysis of contemporary tracking methods.

Results. The structure of a set of algorithms comprising software for a moving-object tracker for sports events is proposed. Experimental studies were performed on the publicly available *APIDIS* dataset, where a MOTA metric of 0.858 was obtained. The flight of an FPV quadcopter along a track was also tracked according to the proposed dataset; the 3D path of the drone flight was reconstructed using the tracker data.

Conclusions. The results of the experimental studies, which demonstrated the feasibility of using the proposed method to track a quadcopter flight trajectory in a three-dimensional world coordinate system, is also showed that the method is suitable for tracking objects at sports events.

Keywords: tracker, moving object tracking, FPV quadcopter, localization, tracking system

• Submitted: 02.06.2022 • Revised: 19.07.2022 • Accepted: 26.08.2022

For citation: Volkova M.A., Romanov M.P., Bychkov A.M. 3D object tracker for sports events. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):38–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-38-48>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день системы слежения за движущимися объектами широко используются в разных социальных и производственных сферах деятельности человека, например, при создании автономного транспорта [1], фиксации нарушений при движении автомобилей [2], обеспечении безопасности мероприятий [3], определении местоположения сотрудников предприятия [4]. Одной из самых перспективных областей применения таких систем является спорт, в особенности командные игры: футбол, баскетбол и др. Отслеживание участников спортивных мероприятий позволяет оценивать групповые тактические действия, прогнозировать результаты матчей и т.д. Например, во время

трансляции футбола мониторинг движения используется для просмотра персональных повторов или получения расширенной статистики игроков [5].

Для отслеживания перемещения спортсменов во время соревнований необходимо решить две основные задачи:

- 1) обнаружение движущихся объектов с помощью сенсоров и их идентификация;
- 2) определение параметров (например, положения и скорости) объектов, на базе которых можно восстановить траекторию движения.

Сложность состоит в том, что спортсмены внешне часто похожи (из-за одинаковой спортивной формы), что затрудняет их идентификацию. Кроме того, траектория движения игроков в командных видах спорта может резко меняться, что приводит

к окклюзии и необходимости повторной идентификации. Таким образом, главной проблемой, которая влияет на показатели точности отслеживания, является частое переключение идентификаторов объектов [6].

Отметим, что в англоязычной литературе, посвященной методам и алгоритмам слежения за движущимися объектами, отдельно выделяется направление multi-athlete tracking (MAT), т.е. отслеживание спортсменов, поскольку оно имеет свои особенности. Как правило, в качестве сенсоров используется система видеонаблюдения, включающая несколько камер, поэтому многие работы сфокусированы именно на обработке видеоданных. Их можно разделить на две группы. Первая группа [6, 7] ориентирована в большей степени на поиск характерных признаков и решение задачи идентификации объекта, что зачастую приводит к длительным задержкам вывода информации, вторая [8, 9] – на определение параметров. Однако для корректной работы алгоритмов требуется детерминированная в пространстве плоскость, по которой движутся объекты, что затрудняет отслеживание в воздухе или на сложном рельефе.

Относительно молодым видом спорта, который сейчас активно развивается, является гонка first person view (FPV) квадрокоптеров или дрон-рейсинг, т.е. соревнование на скорость и качество прохождения заранее определенной трассы с трансляцией видео в режиме реального времени с камеры дрона на монитор, очки или шлем пилота. Отслеживание трассы движения объектов в 3D-пространстве в данном случае актуально ввиду необходимости проведения оценки траектории полета для справедливого судейства. Например, из-за высоких скоростей часто невозможно визуально определить, какой из квадрокоптеров первым прошел финишные ворота. Большинство работ в данной области посвящено повышению автономности квадрокоптеров и разработке алгоритмов поиска оптимального маршрута, а также их тестированию [10–12].

Целями данной работы являются разработка программно-алгоритмического обеспечения метода, позволяющего отслеживать движущиеся объекты в трехмерной системе координат и не требующего идентификации на этапе обнаружения, и тестирование для оценки качества его работы.

Вклад авторов заключается в следующем:

- предложен способ реализации трекера объектов на спортивных мероприятиях на базе метода сопоставления информации о скорости и положении объектов, предложенного в [13];
- представлены результаты экспериментальных исследований как на общедоступном датасете *APIDIS*, где по критерию качества отслеживания multiple object tracking accuracy (MOTA) был

получен показатель 0.858, так и на предложенном авторами датасете с пролетом квадрокоптера по трассе;

- построена траектория полета в 3D-пространстве.

1. ОБЗОР РАБОТ ПО ТЕМАТИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большинство научных работ, посвященных проблеме отслеживания движущихся объектов, применимо для разработки систем слежения за движением спортсменов. В основном, в этих работах предложены методы, включающие в себя предварительный этап – обнаружение, т.е. сегментацию данных с сенсоров различными способами. Многие исследования предполагают идентификацию объектов на данном этапе и нацелены на повышение ее точности путем модернизации существующих методов поиска особых точек и дескрипторов [14]. В работе [15] приведено описание наиболее часто используемых дескрипторов и способов обнаружения объектов, а также проведено исследование по улучшению отдельных элементов алгоритмов. Результаты экспериментов показывают более высокую точность отслеживания, чем при использовании базовых методов. В [16] автор решает задачу локализации объектов на базе цветowych моделей RGB путем проведения обучения дескриптора на двух уровнях – непосредственно на полученном изображении и на его инфракрасном представлении, что существенно улучшает работу системы. Подобные методы не подходят для реализации в режиме реального времени, ввиду необходимости обучения дескрипторов, что ведет к задержке вывода информации.

Методы отслеживания на базе обнаружения можно разделить на три группы по способу представления формы объекта: точки, геометрические фигуры и контуры (силуэты). Последняя группа методов чаще используется для отслеживания людей (пешеходов, спортсменов и др.) [17]. Две первые группы больше подходят для других объектов (автомобилей, мобильных роботов и др.), и их реализация является менее ресурсоемкой. В [13] предлагается метод сопоставления информации о скорости и положении объектов, позволяющий отслеживать объекты в трехмерном пространстве. Идентификация проводится на базе полученных данных о скорости и положении объектов, которые могут быть представлены в виде точек, что подходит для отслеживания FPV квадрокоптеров, имеющих небольшие размеры.

В работе [18] предлагается система слежения за пешеходами в режиме online. Сегментированные данные оптимизируются при помощи указания статуса окклюзии. Положение обнаруженных на первом этапе объектов прогнозируется с помощью фильтра Калмана, который, стоит отметить, часто применяется

в алгоритмах слеживания. Также авторы проводят сравнение с пятью наиболее распространенными на сегодняшний день трекерами (WVMF, SMOT-admm, SFCT, TLDiDP + NMS). По итогам экспериментальных исследований представленная система показывает лучшие результаты. В работе [19] выполнено сравнение двух систем слежения в футболе – «Gen4» и «Gen5». Главное отличие данных систем состоит в том, что «Gen4» состоит из двух мультикамерных систем, а «Gen5» объединяет две стереопары с каждой стороны поля и две монокулярные системы за воротами. Был сделан вывод о том, что при большем количестве камер увеличивается точность слежения за объектом. В [20] представлен сравнительный анализ систем трекинга в командном спорте на базе данных GPS и мультикамерных систем, и сделан вывод о том, что алгоритмы, которые используют данные с камер, позволяют достичь более высоких показателей точности отслеживания.

Многие алгоритмы, предназначенные для решения задачи МАТ, требуют для реализации высокопроизводительные вычислительные устройства, что приводит к большим финансовым затратам [19], поэтому ведутся исследования по созданию более дешевых систем. В работе [21] предлагается система слежения на базе алгоритма поиска k -кратчайших путей. Результаты исследований доказали эффективность предложенного решения при использовании сравнительно недорогих камер. В [22] авторы представляют исследование по отслеживанию траектории движения спортивных объектов на основе алгоритма Mean Shift. На основе проведенных экспериментальных исследований сделан вывод о том, что данный подход позволяет сократить требуемые вычислительные мощности.

Кроме методов на базе обнаружения и идентификации для решения задачи МАТ часто применяются алгоритмы, основанные на построении карт занятости. В работах [23, 24] представлен способ отслеживания на базе фильтра частиц, где не требуется априорная информация о количестве объектов. В [25, 26] применяется гибридный метод, сочетающий построение карты занятости и выделение основных признаков игроков. Такой подход обеспечивает высокий показатель МОТА, но подобные методы для реализации требуют наличия детерминированной в пространстве плоскости, поэтому не подходят для отслеживания квадрокоптеров.

Во многих публикациях, посвященных оценке полета квадрокоптера по трассе, основное внимание уделяется вопросам повышения автономности полета, а также поиска оптимального маршрута [10–12], т.е. именно техническому зрению и навигации. Кроме того, идет активная разработка датасетов со сложными траекториями, содержащими большое количество

резких поворотов, где квадрокоптер проходит трассу на высокой скорости [27], что существенно усложняет задачу слежения за спортивными дронами.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что для достижения поставленной цели наиболее подходящим методом отслеживания траектории движения спортивного объекта является подход, основанный на сопоставлении информации о скорости и положении объектов, представленный в работе [13].

2. СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕКЕРА

Структура программно-алгоритмического обеспечения трекера представлена на рис. 1. Отметим, что в данной работе было принято решение использовать только основные параметры, такие как скорость и пространственное положение (без использования дополнительных признаков), для уменьшения задержки вывода информации об объектах.

Обязательным условием для работы трекера является предварительная калибровка всех сенсоров перед началом работы, которая предполагает определение относительных линейных и угловых смещений систем координат сенсоров, а также выбор начала мировой системы координат. Предполагается, что положение сенсоров друг относительно друга не изменяется в течение всего времени работы трекера.

На вход трекера подаются данные, полученные на этапе детектирования объектов. Результатом работы трекера является вектор состояния объекта $\mathbf{x}_i$ на момент времени t . Вектор состоит из основных геометрических параметров (L – положение, V – скорость, a – ускорение, T – символ транспонирования) в мировой (трехмерной) системе координат, а также, при необходимости, идентификационного номера:

$$\mathbf{x}_i = (L, V, a)^T.$$

Рассмотрим блоки, входящие в структуру трекера. Сопоставление операций выбранного метода и блоков программно-алгоритмического обеспечения представлено в табл. 1.

Алгоритм работы трекера состоит из 6 блоков.

1. На вход блока «Формирование набора данных о положении объектов» подаются все сегментированные данные о положении объектов O и O' – совокупность проецированных векторов координат объектов, прогнозируемых с помощью фильтра Калмана в системе координат, выбранной для локализации. Таким образом, выходом блока является набор векторов $O_i = \{O O'\}$.
2. На вход блока «Расчет общей функции правдоподобия» поступает набор данных O_i . Кластеризация в данном случае выполняется

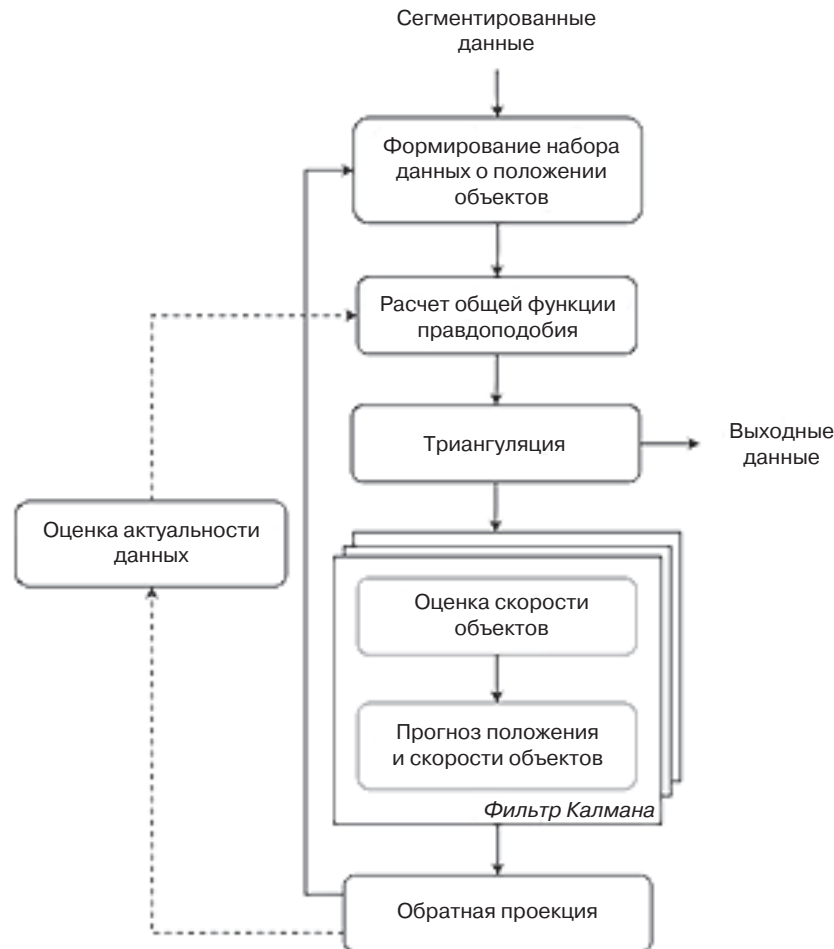


Рис. 1. Структура программно-алгоритмического обеспечения трекера

Таблица 1. Сопоставление операций метода и блоков программно-алгоритмического обеспечения трекера

Название блока	Операция
Формирование набора данных о положении объектов	Формирование выборки наблюдений O_t
Расчет общей функции правдоподобия	Расчет общей функции правдоподобия $p(O_t \mathbf{x}_t)$
Триангуляция	Получение векторов $\mathbf{x}_t(L)$
Оценка скорости объектов	Получение векторов $\mathbf{x}_t(V)$
Прогноз положения и скорости объектов	Расчет векторов $\hat{\mathbf{x}}_t$
Обратная проекция	Формирование выборки наблюдений O'
Оценка актуальности данных	Расчет параметра, отражающего степень достоверности полученной информации A_M

методом Mean Shift [24], в результате работы которого появляется набор кластеров, количество которых соответствует количеству объектов. Сегментированным данным с сенсоров присваиваются идентификационные номера объектов, которые находятся в одном кластере.

- В блоке «Триангуляция» выполняется триангуляция данных с одинаковыми идентификационными номерами со всех сенсоров [28]. На выходе блока – положение объектов в трехмерной (мировой) системе координат $\mathbf{x}_t(L)$.

- Данные, полученные на предыдущем этапе, поступают в блок фильтра Калмана третьего порядка, состоящего, в свою очередь, из двух блоков, расчеты для которых выполняются последовательно: «Оценка скорости объектов» и «Прогноз скорости и положения объектов» [29]. Для оценки параметров в трехмерной системе координат необходимо три фильтра Калмана. При расчете прогнозируемых параметров по координате X используются выражения (для Y, Z выражения аналогичны):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0],$$

$$\mathbf{x}_t = (L_X \ V_X \ a_X)^T,$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{T^4}{4\sigma^2} & \frac{T^3}{2\sigma^2} & 0 \\ \frac{T^3}{2\sigma^2} & \frac{T^2}{\sigma^2} & T\sigma^2 \\ 0 & T\sigma^2 & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t,$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q},$$

$$K_{t+1} = \hat{\mathbf{P}}_{t+1|1...3,1}(\hat{\mathbf{P}}_{t+1|1,1} + \mathbf{R})^{-1},$$

$$\mathbf{x}_{t+1} = \hat{\mathbf{x}} + K_{n+1}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}_{1,1}),$$

где $\mathbf{Q}$ – матрица ковариации шумов процессов; $\mathbf{R}$ – матрица шума датчиков; $\mathbf{P}$ – матрица ковариации шумов; K – матричный коэффициент коррекции; $\mathbf{H}$ – матрица, определяющая выходные данные; $\mathbf{A}$ – матрица состояний; T – период измерений, σ – параметр фильтра, который зависит от динамических характеристик наблюдаемого объекта.

На выходе блока формируются данные о прогнозируемом положении и скорости объектов в трехмерной системе координат.

5. Блок «Обратная проекция» осуществляет репроецирование полученных в п. 4 данных из мировой системы координат в систему координат каждого сенсора O' .
6. Блок «Оценка актуальности данных» позволяет рассчитывать параметр, отражающий степень достоверности полученной информации A_M . Он рассчитывается следующим образом:

$$A_M = \exp\left(-\frac{t_m}{d\Delta Ts}\right),$$

где t_m – время, которое прошло с последнего определения признака; ΔTs – период измерений сенсора; d – коэффициент снижения актуальности данных.

Если на момент времени t для объекта не пришли данные ни одного измерения (или только одного, что недопустимо для выполнения триангуляции), в блоке «Формирование набора данных о положении объектов» в качестве данных, полученных с сенсоров,

будут указаны прогнозируемые репроецированные положение и скорость. Параметр A_M в данном случае необходим для корректировки длительности слежения по прогнозируемым данным, т.е. для того, чтобы вовремя прекратить слежение за объектом.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первом эксперименте для верификации предложенного программно-алгоритмического обеспечения был выбран датасет *APIDIS*¹, который включает в себя 7 фрагментов видеозаписи баскетбольной игры, снятых с разных камер, расположенных вокруг игрового поля. Были выбраны две камеры (первая и седьмая), нацеленные на один угол игрового поля, с разным фокусным расстоянием. Сегментированные данные объектов были получены методом, предложенным в [30]. В процессе эксперимента в течение одной минуты (последовательность из 1500 кадров) оценивались параметры положения и скорости четырех заранее выбранных объектов, которые наиболее часто пересекались между собой и с другими объектами.

На рис. 2 представлены эталонные траектории для всех объектов в пространстве на плоскости XY (в данном эксперименте перемещение по оси $Z = 0$), отмеченные черным цветом; цветными линиями отмечены выбранные цели. Эталонные траектории были получены методом интерполяции координат объектов, которые были представлены на ресурсе, предоставляющем датасет, с интервалом в 1 с.

На рис. 3 показаны эталонные траектории выбранных целей и траектории, восстановленные на базе полученных сегментированных данных с камер. Результаты расчета показателя точности отслеживания MOTA в сравнении с другими современными методами представлены в табл. 2.

Таблица 2. Показатели MOTA разных трекеров

Трекер	MOTA
[6]	0.752
[31]	0.796
[32]	0.811
Трекер, предложенный в данной статье	0.858

На основе анализа табл. 2 можно сделать вывод, что предложенное программно-алгоритмическое обеспечение трекера обеспечивает высокий показатель точности отслеживания и превосходит известные аналоги.

¹ <https://sites.uclouvain.be/ispgroup/index.php/Softwares/APIDIS>, дата обращения 01.01.2022. [<https://sites.uclouvain.be/ispgroup/index.php/Softwares/APIDIS>. Accessed January 1, 2022.]

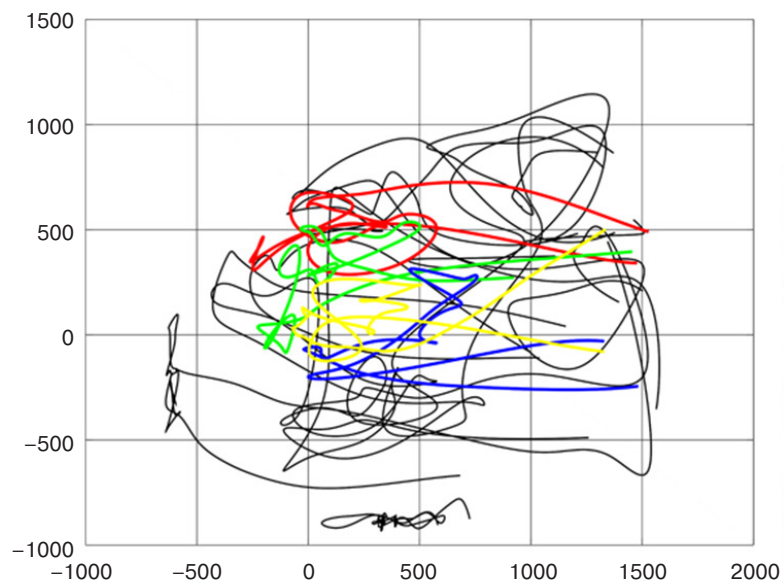


Рис. 2. Эталонные траектории движения игроков (слева) и кадры с первой и седьмой камер (справа)

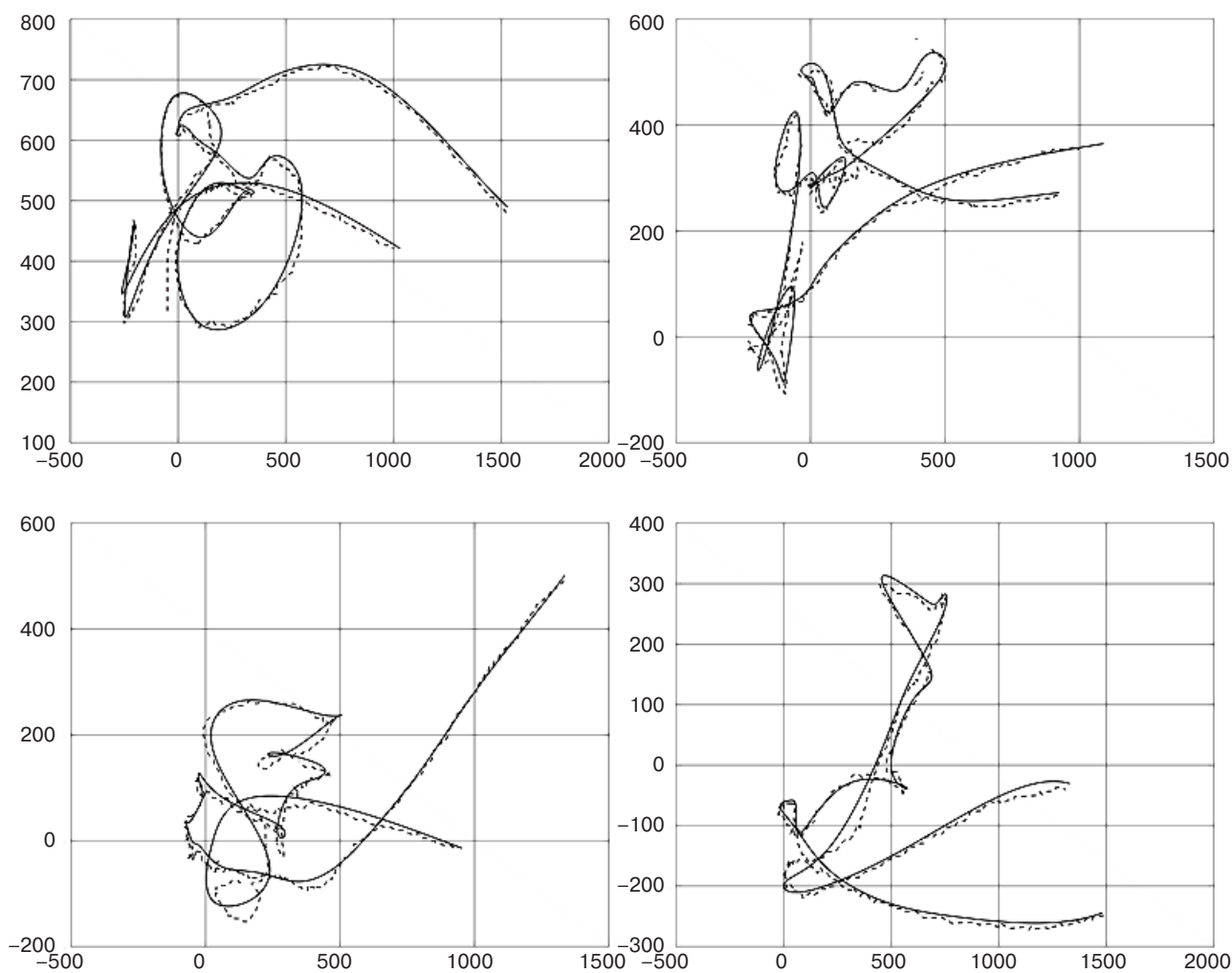


Рис. 3. Эталонные траектории целей (сплошные линии) и траектории, восстановленные по сегментированным данным (пунктирные линии)

Для проведения второго эксперимента в лаборатории был создан стенд, схема которого представлена на рис. 4.

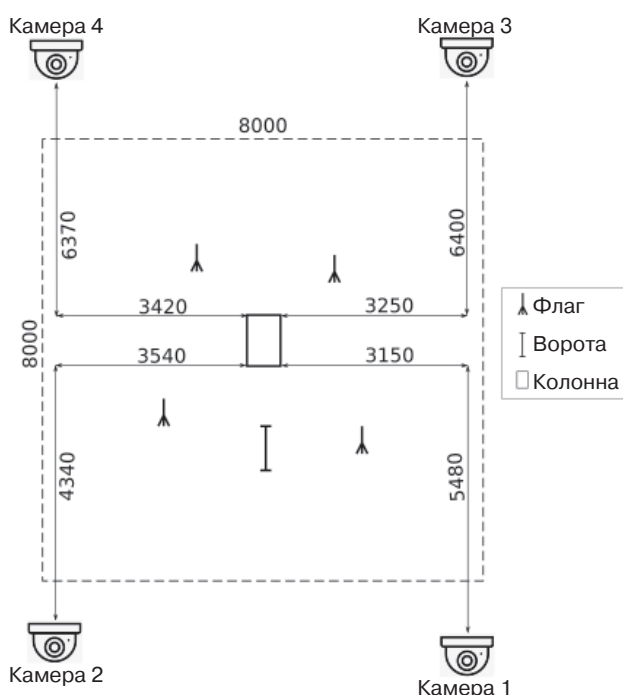


Рис. 4. Схема испытательного стенда

Стенд состоит из системы видеонаблюдения, включающей четыре купольных камеры BD133 (производитель Beward, Россия), а также трассы для квадрокоптера, которая состоит из 5 элементов: 4 флага (представляют собой геологические вешки) и ворота. Габаритные размеры рабочей зоны составляют $8 \times 8 \times 3$ м. При калибровке камер были установлены следующие частоты кадров: для первой камеры – 13 fps², для остальных – 25 fps. В ходе эксперимента одновременно с четырех камер был снят датасет с пролетом квадрокоптера Photon (производитель РТУ МИРЭА, Россия) по трассе длительностью 30 с. Сегментация подвижного объекта (квадрокоптера) выполнена методом бинаризации кадров с заранее заданным порогом. Траектория полета квадрокоптера была восстановлена в мировой системе координат (рис. 5). Затем для верификации данная траектория обратно проецировалась на изображения, полученные с камер. Результат представлен на рис. 6.

Траектория полета квадрокоптера была успешно восстановлена. Также в ходе эксперимента определено, что задержка вывода информации для одного объекта после подачи на трекер сегментированных данных составляет 32 мс.

² fps – от англ. frames per second (количество кадров в секунду).

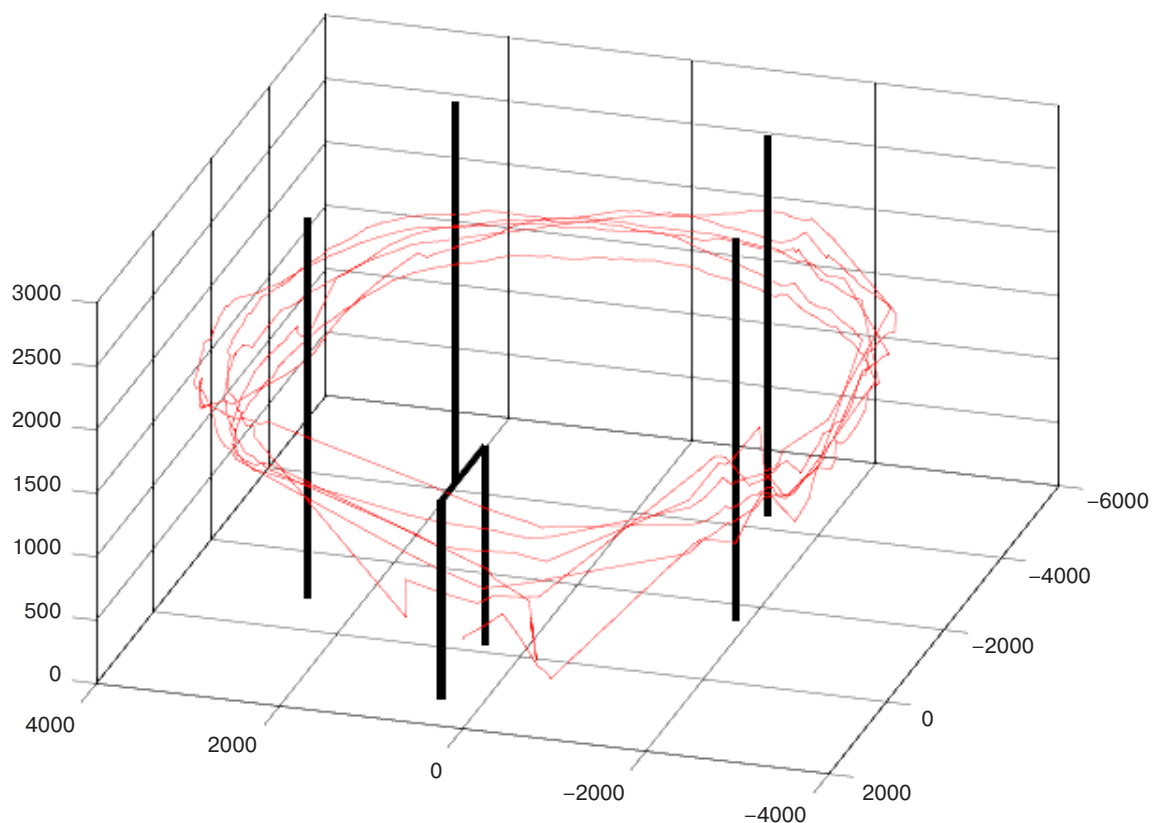


Рис. 5. Восстановленная в 3D траектория полета квадрокоптера



Рис. 6. Кадры, полученные с камер, и отслеживаемый квадрокоптер (отмечен красным маркером)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проведены обзор и анализ современных способов отслеживания движущихся объектов, при этом особое внимание уделялось методам МАТ. Была предложена структура программно-алгоритмического обеспечения трекера движущихся объектов на базе метода сопоставления информации о положении и скорости объектов. Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенное решение позволяет отслеживать траекторию полета квадрокоптера в трехмерной (мировой) системе координат, а также подходит для слежения за объектами на спортивных мероприятиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РТУ МИРЭА в рамках гранта «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий» (НИЧ 28/24).

ACKNOWLEDGMENTS

This research is supported by the RTU MIREA grant “Innovations in the implementation of priority areas for the science and technology development,” project No. 28/24.

Вклад авторов

М.А. Волкова – предложение способа реализации трекера объектов на спортивных мероприятиях; представление результатов экспериментальных исследований на датасете APIDIS; представление стенда для проведения экспериментальных исследований, проведение эксперимента с пролетом квадрокоптера по трассе, написание текста статьи.

М.П. Романов – предложение способа реализации трекера объектов на спортивных мероприятиях.

А.М. Бычков – представление стенда для проведения экспериментальных исследований, проведение эксперимента с пролетом квадрокоптера по трассе.

Authors' contributions

M.A. Volkova has proposed the solution for implementing the object tracker for sports events, presented the results of experimental studies on the APIDIS dataset and a test stand, conducted an experiment with a quadcopter flying along the track, and written the text of the article.

M.P. Romanov has proposed the solution for implementing the object tracker for sports events.

A.M. Bychkov has presented a test stand and conducted an experiment with a quadcopter flying along the track.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Zein Y., Darwiche M., Mokhiamar O. GPS tracking system for autonomous vehicles. *Alexandria Eng. J.* 2018;57(4): 3127–3137. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.12.002>
2. Yu K., et al. Deep learning-based traffic safety solution for a mixture of autonomous and manual vehicles in a 5G-enabled intelligent transportation system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* 2020;22(7): 4337–4347. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3042504>
3. Ryan B.J., et al. COVID-19 contact tracing solutions for mass gatherings. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness.* 2021;15(3):e1–e7. <https://doi.org/10.1017/dmp.2020.241>
4. Khan S., et al. Implementing traceability systems in specific supply chain management (SCM) through critical success factors (CSFs). *Sustainability.* 2018;10(1):204. <https://doi.org/10.3390/su10010204>

5. Cioppa A., Deliege A., Magera F., Giancola S., Barnich O., Ghanem B., Van Droogenbroeck M. Camera calibration and player localization in soccerNet-v2 and investigation of their representations for action spotting. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. 2021. P. 4537–4546. <https://doi.org/10.1109/CVPRW53098.2021.00511>
6. Kong L., Zhu M., Ran N., Liu Q., He R. Online multiple athlete tracking with pose-based long-term temporal dependencies. *Sensors*. 2020;21(1):197. <https://doi.org/10.3390/s21010197>
7. Liu J., Tong X., Li W., Wang T., Zhang Y., Wang H. Automatic player detection, labeling and tracking in broadcast soccer video. *Pattern Recognition Lett.* 2009;30(2):103–113. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2008.02.011>
8. Possegger H., Sternig S., Mauthner T., Roth P.M., Bischof H. Robust real-time tracking of multiple objects by volumetric mass densities. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2013. P. 2395–2402. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2013.310>
9. Bialkowski A., Lucey P., Carr P., Denman S., Matthews I., Sridharan S. Recognising team activities from noisy data. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2013. P. 984–990. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2013.143>
10. Foehn P., Brescianini D., Kaufmann E., et al. AlphaPilot: Autonomous drone racing. *Auton. Robot.* 2022;46(1): 307–320. <https://doi.org/10.1007/s10514-021-10011-y>
11. Spica R., Cristofalo E., Wang Z., Montijano E., Schwager M. A real-time game theoretic planner for autonomous two-player drone racing. *IEEE Transactions on Robotics*. 2020;36(5):1389–1403. <https://doi.org/10.1109/TRO.2020.2994881>
12. Kaufmann E., et al. Beauty and the beast: Optimal methods meet learning for drone racing. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE; 2019. P. 690–696. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793631>
13. Волкова М.А., Романов А.М., Романов М.П. Распределенная система локализации объектов в рабочей зоне модульного реконфигурируемого мобильного робота. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021;22(12):634–643. <https://doi.org/10.17587/mau.22.634-643>
[Volkova M.A., Romanov A.M., Romanov M.P. Distributed system for objects localization in the working area of a modular reconfigurable mobile robot. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021;22(12):634–643 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.22.634-643>]
14. Dai-Hong J., Lei D., Dan L., San-You Z. Moving-object tracking algorithm based on PCA-SIFT and optimization for underground coal mines. *IEEE Access*. 2019;7: 35556–35563. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899362>
15. Матвеев И.А., Чигринский В.В. Оптимизация работы системы слежения, основанной на сети камер. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2020;4:110–124. <https://doi.org/10.31857/S0002338820040125>
[Chigrinskii V.V., Matveev I.A. Optimization of a tracking system based on a network of cameras. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(4):583–597. <https://doi.org/10.1134/S1064230720040127>]
16. Lan X., Ye M., Shao R., Zhong B., Yuen P.C., Zhou H. Learning modality-consistency feature templates: A robust RGB-infrared tracking system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(12):9887–9897. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2898618>
17. Bao Q., Liu W., Cheng Y., Zhou B., Mei T. Pose-guided tracking-by-detection: Robust multi-person pose tracking. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2020;23:161–175. <https://doi.org/10.1109/TMM.2020.2980194>
18. Wang Z., Li M., Lu Y., Bao Y., Li Z., Zhao J. Effective multiple pedestrian tracking system in video surveillance with monocular stationary camera. *Expert Systems with Applications*. 2021;178:114992. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114992>
19. Linke D., Link D., Lames M. Football-specific validity of TRACAB's optical video tracking systems. *PLoS ONE*. 2020;15(3):e0230179. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230179>
20. Pons E., García-Calvo T., Resta R., Blanco H., López del Campo R., Díaz García J., Pulido J.J. A comparison of a GPS device and a multi-camera video technology during official soccer matches: Agreement between systems. *PLoS ONE*. 2019;14(8):e0220729. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220729>
21. Nishikawa Y., Sato H., Ozawa J. Multiple sports player tracking system based on graph optimization using low-cost cameras. In: *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. IEEE; 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326126>
22. Hui Q. Motion video tracking technology in sports training based on Mean-Shift algorithm. *J. Supercomput.* 2019;75(9):6021–6037. <https://doi.org/10.1007/s11227-019-02898-3>
23. Taj M., Cavallaro A. Distributed and decentralized multicamera tracking. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2011;28(3):46–58. <https://doi.org/10.1109/MSP.2011.940281>
24. Taj M., Cavallaro A. Simultaneous detection and tracking with multiple cameras. In: Cipolla R., Battiatto S., Farinella G. (Eds.). *Machine Learning for Computer Vision. Studies in Computational Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. V. 411. P. 197–214. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28661-2_8
25. Liang Q., Wu W., Yang Y., Zhang R., Peng Y., Xu M. Multi-player tracking for multi-view sports videos with improved k-shortest path algorithm. *Appl. Sci.* 2020;10(3):864. <https://doi.org/10.3390/app10030864>
26. Yang Y., Xu M., Wu W., Zhang R., Peng Y. 3D multiview basketball players detection and localization based on probabilistic occupancy. In: *2018 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*. IEEE; 2018. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/DICTA.2018.8615798>
27. Delmerico J., Cieslewski T., Rebecq H., Faessler M., Scaramuzza D. Are we ready for autonomous drone racing? The UZH-FPV drone racing dataset. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE; 2019. P. 6713–6719. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793887>

28. Chen J., Wu D., Song P., Deng F., He Y., Pang S. Multi-view triangulation: Systematic comparison and an improved method. *IEEE Access*. 2020;8:21017–21027. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969082>
29. Romanov A.M., et al. Modular reconfigurable robot distributed computing system for tracking multiple objects. *IEEE Systems J*. 2021;15(1):802–813. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2990921>
30. Delannay D., Danhier N., De Vleeschouwer C. Detection and recognition of sports(wo)men from multiple views. In: *2009 Third ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC)*. IEEE; 2009. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICDSC.2009.5289407>
31. Byeon M., et al. Variational inference for 3-D localization and tracking of multiple targets using multiple cameras. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2019;30(11):3260–3274. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2890526>
32. Zhang R., et al. Multi-camera multi-player tracking with deep player identification in sports video. *Pattern Recognition*. 2020;102:107260. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107260>

Об авторах

Волкова Мария Александровна, старший преподаватель, кафедра проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: volkova_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57194215422, SPIN-код РИНЦ 5939-6811, <https://orcid.org/0000-0002-1219-5090>

Романов Михаил Петрович, д.т.н., профессор, директор Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: m_romanov@mirea.ru. Scopus Author ID 14046079000, SPIN-код РИНЦ 5823-8795, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>

Бычков Александр Михайлович, ассистент, кафедра проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bychkov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0701-7529>

About the authors

Maria A. Volkova, Senior Lecturer, Control Problems Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: volkova_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57194215422, RSCI SPIN-code 5939-6811, <https://orcid.org/0000-0002-1219-5090>

Mikhail P. Romanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: m_romanov@mirea.ru. Scopus Author ID 14046079000, RSCI SPIN-code 5823-8795, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>

Alexander M. Bychkov, Assistant, Control Problems Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bychkov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0701-7529>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 004.94
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-49-59>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Реализация алгоритмов обработки стохастических сигналов в САПР РЛС

М.Ю. Конопелькин[®],
С.В. Петров,
Д.А. Смирнягина

Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», Москва, 121471 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: m.konopelkin@almaz-antey.ru

Резюме

Цели. В 2020 г. завершилась опытно-конструкторская работа по созданию российской системы автоматизированного проектирования (САПР) радиолокационных станций (РЛС). Отличительной особенностью САПР РЛС являются богатые возможности для создания имитационных моделей и имитационного моделирования, что позволяет отрабатывать аппаратную часть и комплекс боевых алгоритмов РЛС с учетом конкретных условий боевого применения, средств воздушно-космического нападения и фоно-целевой обстановки. Цель настоящей статьи – обзор и демонстрация возможностей САПР РЛС в части реализации и отработки алгоритмов обработки стохастических сигналов.

Методы. В работе использовался математический аппарат линейной алгебры. Анализ характеристик алгоритмов проведен методом имитационного моделирования.

Результаты. В визуальном функциональном редакторе САПР РЛС создана имитационная модель РЛС секторного обзора с цифровой антенной решеткой. В состав пассивного канала входили следующие алгоритмы: алгоритм обнаружения стохастических сигналов; алгоритм оценивания числа стохастических сигналов; алгоритм пеленгации источников стохастических сигналов; алгоритм адаптивной пространственной фильтрации. В процессе имитационного моделирования алгоритмы обнаружения и оценивания числа выдавали корректный признак обнаружения и оценку числа сигналов. Алгоритм пеленгации оценивал угловое положение источников с точностью до долей градусов. Алгоритм адаптивной пространственной фильтрации подавлял сигналы мешающих сигналов до уровня ниже мощности собственных шумов антенны.

Выводы. Обширные возможности по разработке моделей функционирования РЛС, имеющиеся в российской САПР РЛС, позволяют детально моделировать процессы обработки различных видов сигналов. По результатам моделирования получены координаты целей и приведена оценка эффективности работы алгоритмов. Полученные результаты полностью соответствуют теоретическому прогнозу. Продемонстрированные в настоящей работе возможности САПР РЛС могут быть использованы специалистами в области радиолокации и обработки сигналов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, алгоритм обработки радиолокационной информации, система автоматизированного проектирования, радиолокационная станция, адаптивная пространственная фильтрация

• Поступила: 05.05.2022 • Доработана: 15.07.2022 • Принята к опубликованию: 02.09.2022

Для цитирования: Конопелькин М.Ю., Петров С.В., Смирнягина Д.А. Реализация алгоритмов обработки стохастических сигналов в САПР РЛС. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):49–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-49-59>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Implementation of stochastic signal processing algorithms in radar CAD

Maxim Yu. Konopel'kin @,
Sergey V. Petrov,
Daria A. Smirnyagina

"Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation, Moscow, 121471 Russia

@ Corresponding author, e-mail: m.konopelkin@almaz-antey.ru

Abstract

Objectives. In 2020, development work on the creation of a Russian computer-assisted design system for radars (radar CAD) was completed. Radar CAD provides extensive opportunities for creating simulation models for developing the hardware-software complex of radar algorithms, which take into account the specific conditions of aerospace environment observation. The purpose of the present work is to review and demonstrate the capabilities of radar CAD in terms of implementing and testing algorithms for processing stochastic signals.

Methods. The work is based on the mathematical apparatus of linear algebra. Analysis of algorithms characteristics was carried out using the simulation method.

Results. A simulation model of a sector surveillance radar with a digital antenna array was created in the radar CAD visual functional editor. The passive channel included the following algorithms: algorithm for detecting stochastic signals; algorithm for estimating the number of stochastic signals; direction finding algorithm for stochastic signal sources; adaptive spatial filtering algorithm. In the process of simulation, the algorithms for detecting and estimating the number of stochastic signals produced a correct detection sign and an estimate of the number of signals. The direction-finding algorithm estimated the angular position of the sources with an accuracy of fractions of degrees. The adaptive spatial filtering algorithm suppressed interfering signals to a level below the antenna's intrinsic noise power.

Conclusions. The processing of various types of signals can be simulated in detail on the basis of the Russian radar CAD system for the development of functional radar models. According to the results of the simulation, coordinates of observing objects were obtained and an assessment of the effectiveness of the algorithms was given. The obtained results are fully consistent with the theoretical prediction. The capabilities of radar CAD systems demonstrated in this work can be used by specialists in the field of radar and signal processing.

Keywords: simulation modeling, radar information processing algorithm, computer-aided design system, radar station, adaptive spatial filtering

• Submitted: 05.05.2022 • Revised: 15.07.2022 • Accepted: 02.09.2022

For citation: Konopel'kin M.Yu., Petrov S.V., Smirnyagina D.A. Implementation of stochastic signal processing algorithms in radar CAD. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):49–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-49-59>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В 2020 г. завершилась опытно-конструкторская работа по созданию системы автоматизированного проектирования (САПР) радиолокационных станций (РЛС), радиолокационных комплексов и радиолокационных систем, а также их компонентов [1–10]. Большие возможности САПР РЛС в области создания имитационных моделей и имитационного моделирования позволяют отрабатывать аппаратную часть и комплекс боевых алгоритмов РЛС с учетом конкретных условий боевого применения, средств воздушно-космического нападения и фоно-целевой обстановки. Одним из важнейших применений разработанной САПР является отработка алгоритмов обработки радиолокационной информации по результатам проведения сквозного комплексного имитационного моделирования на основе требований к образцам вооружений и военной техники, а также принципов их боевого применения.

Настоящая статья демонстрирует возможности САПР РЛС в части реализации и отработки алгоритмов обработки стохастических сигналов.

1. ИНСТРУМЕНТАРИЙ САПР РЛС

1.1. Визуальный функциональный редактор

В САПР РЛС для создания имитационных моделей используется подход, известный под названием «программирование потоков данных». Пользователь с помощью визуального конструктора составляет граф вычислений из блоков, конфигурирует параметры каждого блока и соединения между ними. По нажатию кнопки запуска вычисления происходит обход графа и вычисление выходных данных каждого блока на основе входных данных и параметров блока.

Преимущества данной парадигмы – естественное визуальное представление (в виде графа вычислений) и поддержка параллелизма. В рамках САПР РЛС разработан визуальный функциональный редактор, обеспечивающий возможность создания и расчета графа потоковых вычислений. Графический интерфейс пользователя представляет собой классический *Simulink*-подобный интерфейс для визуального проектирования потоковой обработки данных,

состоящий из параметризуемых блоков, соединенных между собой (рис. 1).

1.2. Среда инженерных расчетов и моделирования

Одной из ключевых особенностей разработанной САПР является возможность не только автоматизации процесса разработки РЛС, но и достаточно широкого и объемлющего моделирования поведения РЛС в боевых условиях. В частности, при проектировании инженеру предоставляется возможность задать сценарий. При отправке сценария на расчет проводится полное, приближенное к реальности, моделирование поведения РЛС в боевых условиях. Производится имитация налета на РЛС, включающая в себя моделирование движения различных воздушных целей. При этом на основе построенной модели РЛС моделируется работа антенны РЛС, которая сканирует пространство. При взаимодействии электромагнитной волны, пришедшей от луча антенны локатора, и воздушной цели проводится моделирование отражения электромагнитной волны от данной цели, на основе чего рассчитываются параметры сигнала, пришедшего в приемный канал локатора, где далее моделируется его обработка. На пришедший сигнал накладываются шумы, возникающие, в т.ч. за счет отражения от поверхности Земли. Также при моделировании прохождения луча через атмосферу учитываются различного рода осадки.

Организацию процесса моделирования обеспечивает диспетчер имитационного моделирования (ДИМ). Создание и редактирование сценариев имитационного моделирования реализовано в среде инженерных расчетов и моделирования (рис. 2), входящей в состав САПР РЛС.

2. ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РЛС

2.1. Параметры имитационной модели РЛС

Для демонстрации возможностей САПР РЛС в части реализации и отработки алгоритмов обработки стохастических сигналов создана имитационная модель РЛС обзора воздушного

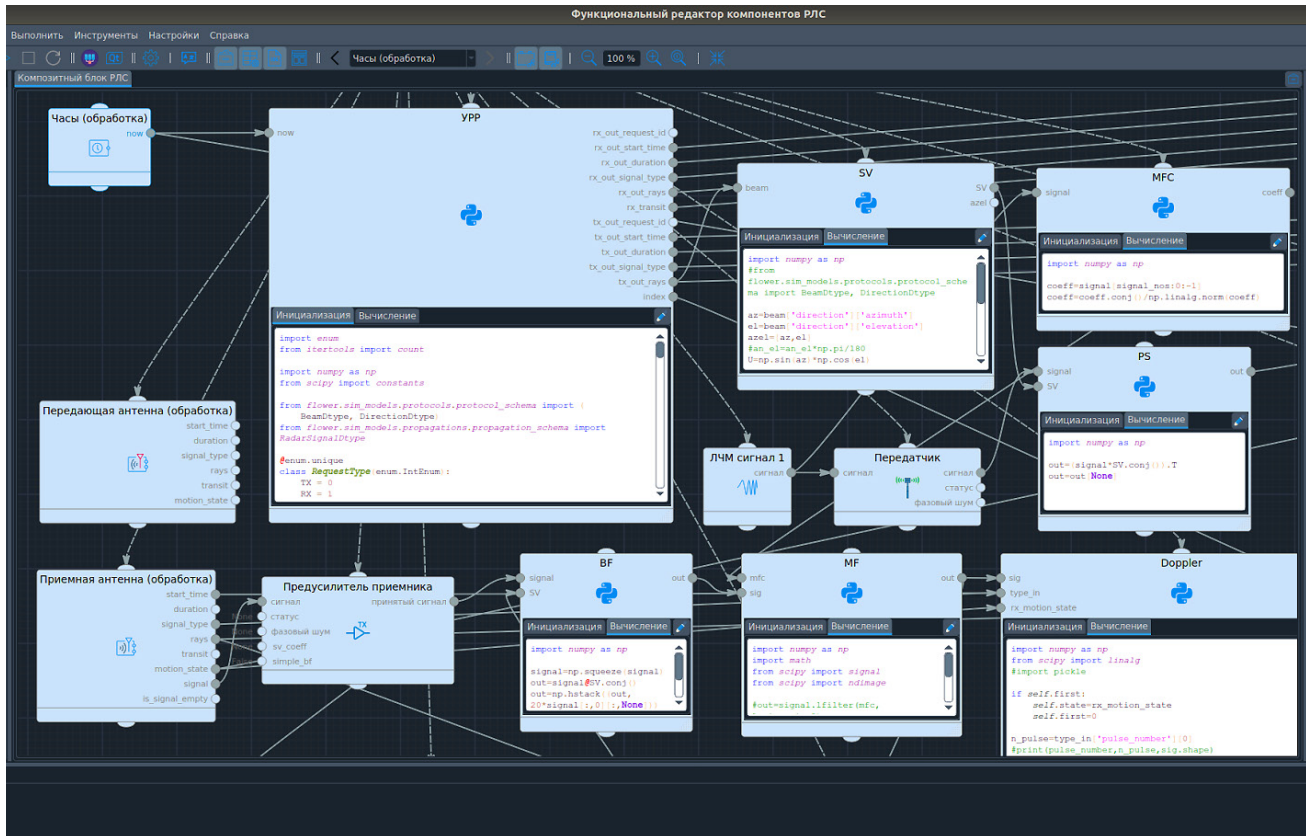


Рис. 1. Визуальный функциональный редактор и блоки модели РЛС

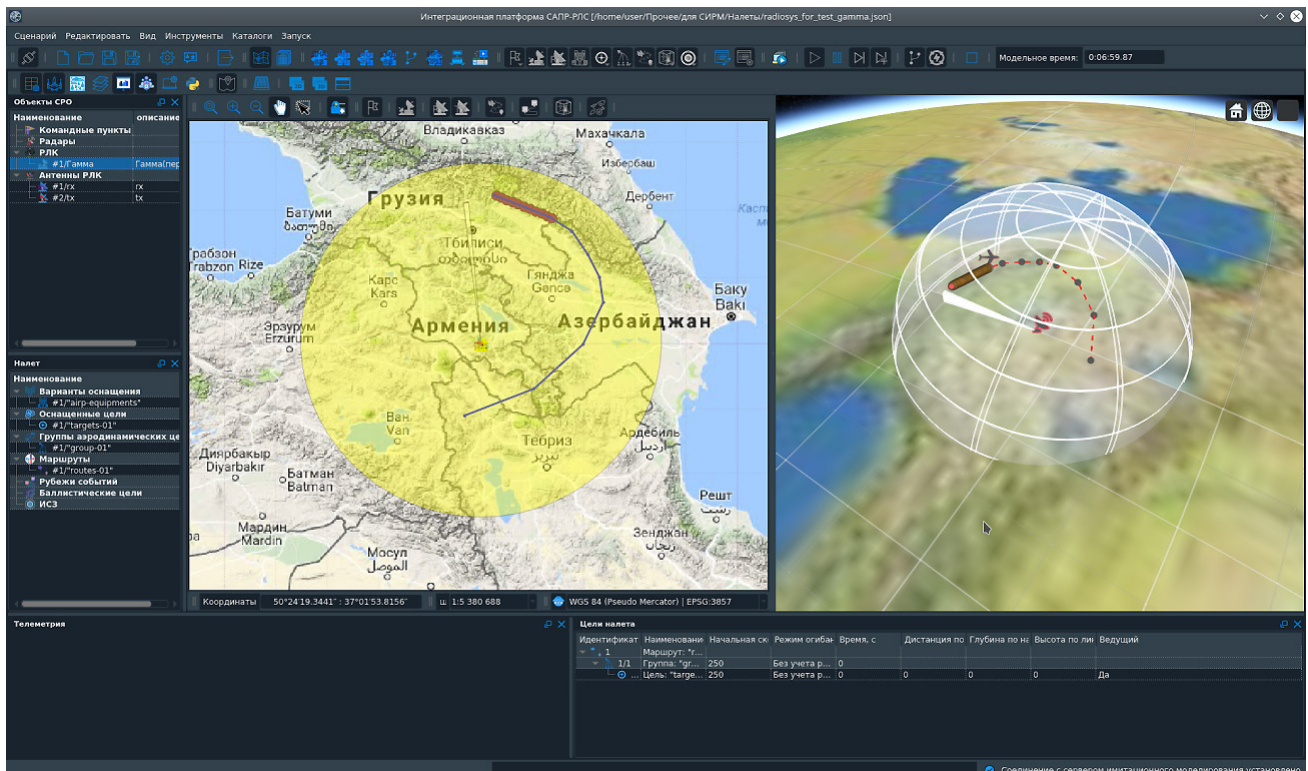


Рис. 2. Интерфейс среды инженерных расчетов и моделирования

пространства. На рис. 3 представлена ее структурная схема, включающая в себя передающую и приемную части: радиопередающее устройство генерирует импульсы с заданными параметрами модуляции, а радиоприемные устройства совместно с системой первичной обработки информации и пассивным каналом обеспечивают усиление, преобразование и оптимальную обработку принятых антенной сигналов на фоне внутренних шумов и внешних помех.

Тип РЛС – активная, однопозиционная, секторного обзора с электронным сканированием лучом.

Параметры сигнала выбраны типичными для РЛС управления воздушным движением [11]:

- тип сигнала – линейная частотная модуляция (ЛЧМ);
- несущая частота – 3 ГГц;
- полоса частот сигнала – 1 МГц;
- длительность импульса – 67 мкс;
- период следования импульсов – 0.67 мс;
- импульсная мощность – 2.3 кВт.

Параметры антенны:

- тип антенны – цифровая антенная решетка (ЦАР);
- размер в элементах – 12×12 ;
- шаг элементов – 0.5 длины волны;
- коэффициент усиления – 32 дБ;

- сектор сканирования по азимуту – $(-45^\circ) - (+45^\circ)$;
- сектор сканирования по углу места – $0^\circ - 30^\circ$;
- наклон антенны к горизонту – 15° .

В модели РЛС реализован пассивный канал для обработки стохастических сигналов от внешних источников. При этом используются обучающие данные с ЦАР длиной $K = 256$ временных отсчетов.

2.2. Алгоритмы модели

Алгоритм обнаружения стохастических сигналов

В модели реализован асимптотически оптимальный алгоритм обнаружения стохастических сигналов, использующий решающую статистику, полученную из обобщенного критерия отношения правдоподобия [12]:

$$Q_D = \frac{N\hat{\lambda}_1}{Tr\hat{\mathbf{R}}}, \quad (1)$$

где N – число элементов ЦАР; $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \mathbf{X}\mathbf{X}^H$ – выборочная оценка корреляционной матрицы; $\mathbf{X}$ – обучающий пакет данных; Tr – след матрицы; $\hat{\lambda}_1$ – максимальное собственное значение матрицы $\hat{\mathbf{R}}$.



Рис. 3. Структурная схема РЛС

Алгоритм оценивания числа стохастических сигналов

В модели реализован асимптотически оптимальный алгоритм оценивания числа стохастических сигналов

$$\hat{M} = \arg \min_n (Q_n < d_n(\alpha)) - 1, n = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где $d_n(\alpha)$ – порог, рассчитываемый по заданному уровню ложной тревоги α ; Q_n – решающая статистика, полученная из обобщенного критерия отношения правдоподобия [13]:

$$Q_n = \frac{(N - n + 1) \hat{\lambda}_n}{\sum_{i=n}^N \hat{\lambda}_i}, \quad (3)$$

где $\hat{\lambda}_i$ – i -е по величине собственное значение матрицы $\hat{\mathbf{R}}$.

Алгоритм пеленгации источников стохастических сигналов

Для пеленгации источников стохастических сигналов реализован алгоритм Кейпона, использующий расчет пространственного спектра [14, 15]:

$$Q_C = \frac{1}{\mathbf{V}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{V}}, \quad (4)$$

где $\mathbf{V}$ – вектор-гипотеза; $(\cdot)^H$ – символ эрмитовой сопряженности.

Алгоритм адаптивной пространственной фильтрации (АПФ)

В модели реализован расчет адаптивного весового вектора по формуле [14, 15]:

$$\mathbf{W} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}, \quad (5)$$

где $\mathbf{S}$ – управляющий вектор.

Все вышеперечисленные алгоритмы реализованы в блоках модели РЛС на языке Python с использованием модулей NumPy и SciPy.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Сценарий имитационного моделирования

Для проведения моделирования была создана модель РЛС секторного обзора с электронным сканированием лучом, которая включает пассивный канал, реализующий обработку стохастических

сигналов от внешних источников. Модель РЛС размещалась в районе г. Санкт-Петербург. Были заданы две разнесенные по азимуту аэродинамические цели (рис. 4) с возможностью установки на них источников стохастических сигналов. В части их наличия моделировались три сценария:

- 1) нет источников стохастических сигналов;
- 2) один источник стохастических сигналов;
- 3) два источника стохастических сигналов.

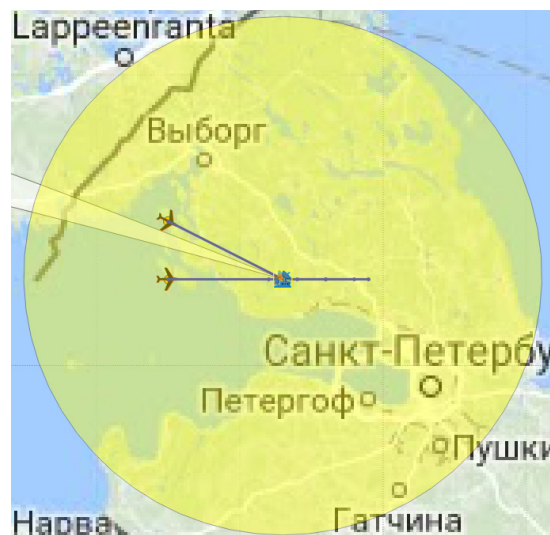


Рис. 4. Положение РЛС и целей

3.2. Результаты работы алгоритмов обнаружения и оценивания числа

В первом сценарии алгоритмы обнаружения и оценивания числа показали ожидаемые результаты – признак обнаружения и оценка числа равны нулю. На рис. 5 показан результат работы этих алгоритмов в течение нескольких тактов работы РЛС – циклов излучения и приема.

Во втором сценарии алгоритмы обнаружения и оценивания числа показали ожидаемые результаты – признак обнаружения и оценка числа равны единице (рис. 6).

В третьем сценарии алгоритмы обнаружения и оценивания числа также показали ожидаемые результаты – признак обнаружения равен единице, оценка числа – двум (рис. 7).

3.3. Результаты работы алгоритма пеленгации

В первом сценарии результаты отсутствуют, т.к. алгоритм пеленгации запускается только если признак обнаружения равен единице.

Во втором сценарии запеленгован один источник стохастических сигналов. На рис. 8 показан пеленгационный рельеф в обобщенной биконической

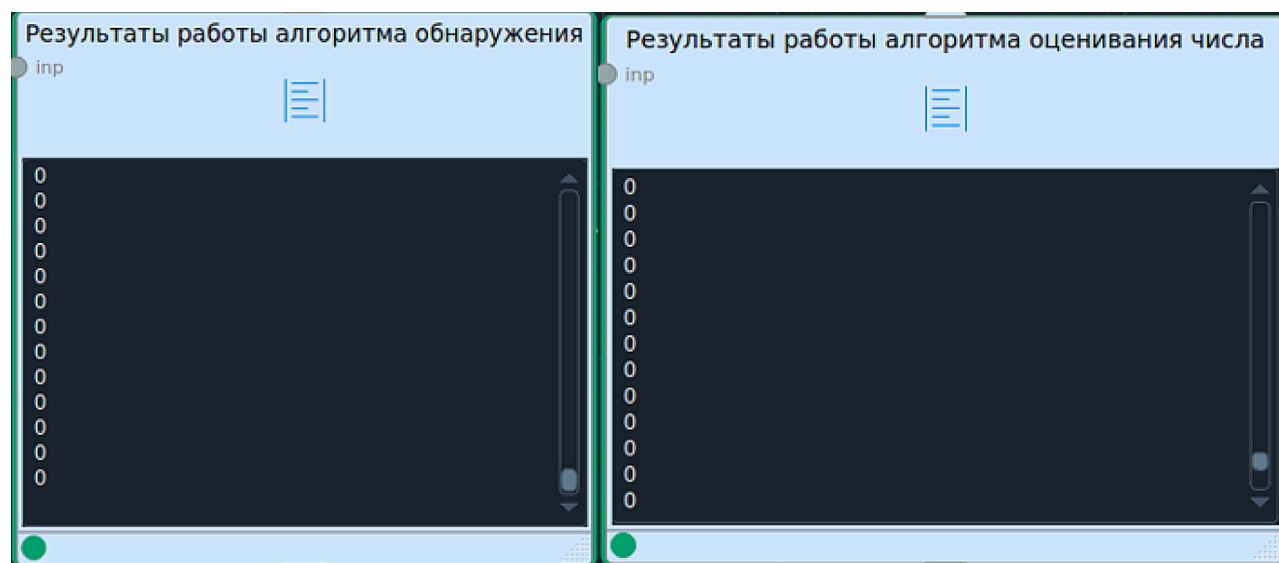


Рис. 5. Выход алгоритмов обнаружения и оценивания числа в сценарии 1

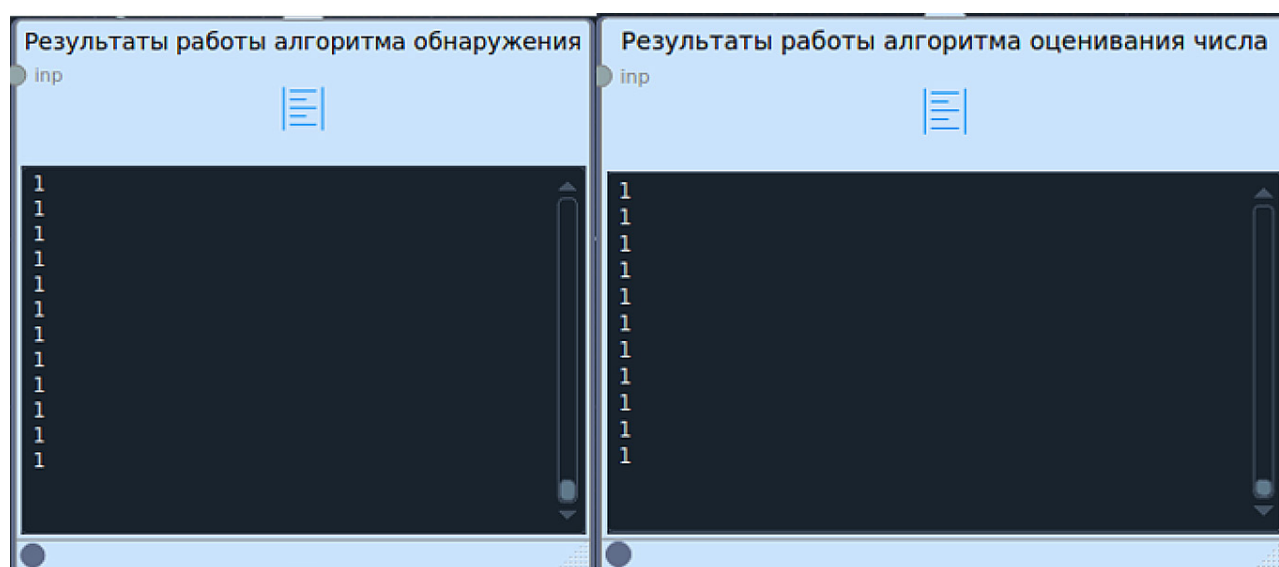


Рис. 6. Выход алгоритмов обнаружения и оценивания числа в сценарии 2

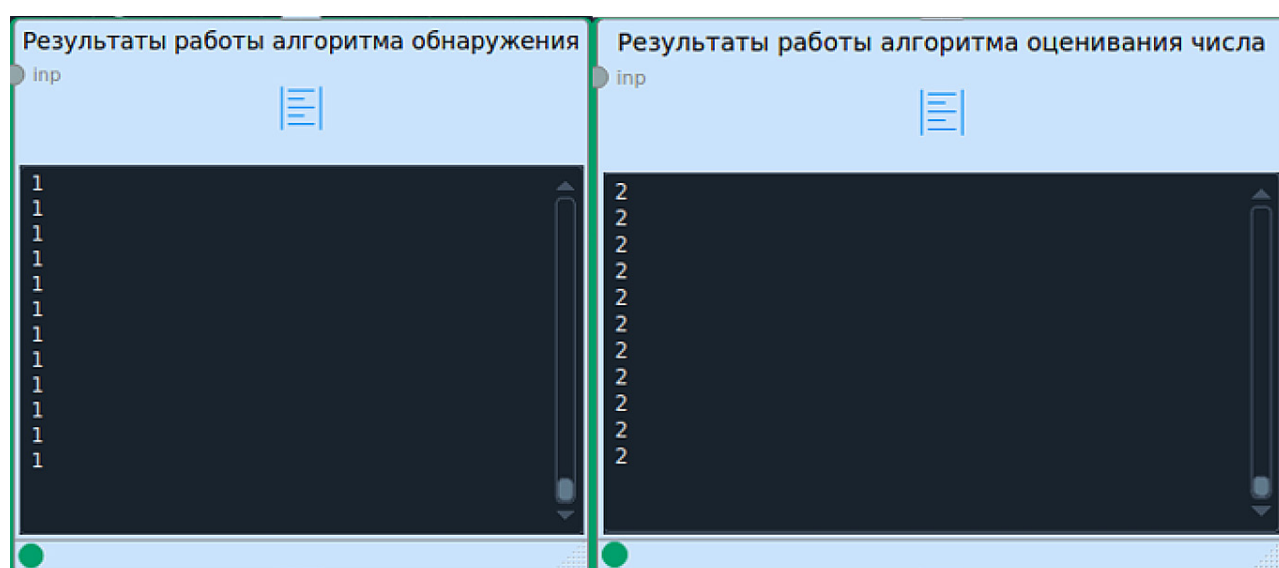


Рис. 7. Выход алгоритмов обнаружения и оценивания числа в сценарии 3

системе координат (ОБСК) (горизонтальная ось – азимут, вертикальная – угол места), построенный по результатам работы алгоритма.

В третьем сценарии запеленгованы два источника стохастических сигналов. На рис. 9 показан пеленгационный рельеф в ОБСК (горизонтальная ось – азимут, вертикальная – угол места), построенный по результатам работы алгоритма.

Оценки угловых координат источников стохастических сигналов в сферической системе координат следующие:

- 1-й источник – $(1.3^\circ; 0.3^\circ)$, истинное положение – $(1.8^\circ; -0.2^\circ)$;
- 2-й источник – $(27.5^\circ; 0.3^\circ)$, истинное положение – $(27.2^\circ; -0.2^\circ)$.

Как можно видеть, оценки совпадают с истинным положением источников с точностью до долей градуса. Дальнейшее повышение точности оценки возможно при использовании для построения пеленгационного рельефа сетки углов с меньшим дискретом.

3.4. Результаты работы алгоритма АПФ

В отсутствии мешающих сигналов обе цели были обнаружены, по ним выданы отметки (желтые маркеры на рис. 10). В этом сценарии при отсутствии мешающих сигналов (признак обнаружения равен нулю) алгоритм АПФ не задействовался, на прием формировался неадаптивный луч.

При наличии одного источника мешающего сигнала, размещенного на правой цели, была обнаружена центральная цель, по ней были выданы отметки (желтые маркеры на рис. 11, синие маркеры – истинное положение целей). Цель с источником мешающего сигнала обнаружена не была, т.к. алгоритм АПФ не может подавить мешающий сигнал, угловое направление на который совпадает с направлением на полезный сигнал.

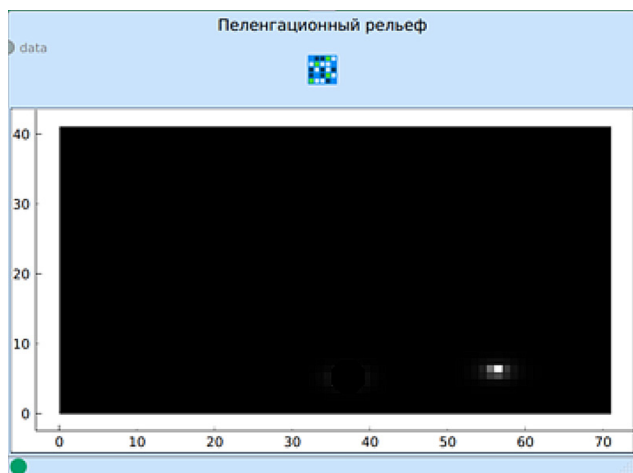


Рис. 8. Выход алгоритма пеленгации в сценарии 2

При наличии двух мешающих сигналов цели не были обнаружены.

Оценим эффективность работы алгоритма АПФ по результатам проведенного моделирования. Для этого необходимо найти значения следующих величин до и после адаптации [16]:

- мощности полезного сигнала на выходе решетки;
- выходного отношения помеха/шум по мощности (ОПШ);
- выходного отношения сигнал/(помеха + шум) по мощности (ОСПШ).

Для расчета указанных величин были вычислены следующие параметры:

- выходная мощность полезного сигнала

$$P_S = \sigma_S^2 \|\mathbf{W}^H \mathbf{V}_S\|^2, \quad (6)$$

где σ_S^2 – мощность сигнала в элементе решетки; $\mathbf{W}$ – весовой вектор; $\mathbf{V}_S$ – вектор амплитудно-фазового распределения поля от полезного сигнала в раскрыве решетки;

- выходная мощность помех и шумов

$$P_{JN} = \mathbf{W}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{W} = \frac{1}{K} \|\mathbf{W}^H \mathbf{X}\|^2, \quad (7)$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора;

- мощность собственных шумов на выходе решетки

$$P_N = \sigma_N^2 \|\mathbf{W}\|^2, \quad (8)$$

где σ_N^2 – мощность собственных шумов в элементе решетки.

Для получения более корректной оценки при расчете выходной мощности помех и шумов использовался пакет данных $\mathbf{X}$, отличный от пакета, по которому рассчитывался адаптивный весовой вектор. Результаты оценки приведены в таблице. Как следует из представленных результатов, помеха была подавлена практически полностью, до уровня ниже собственных шумов антенной решетки.

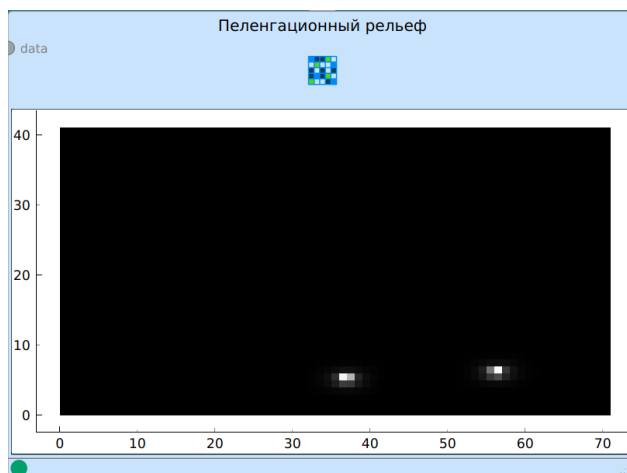


Рис. 9. Выход алгоритма пеленгации в сценарии 3

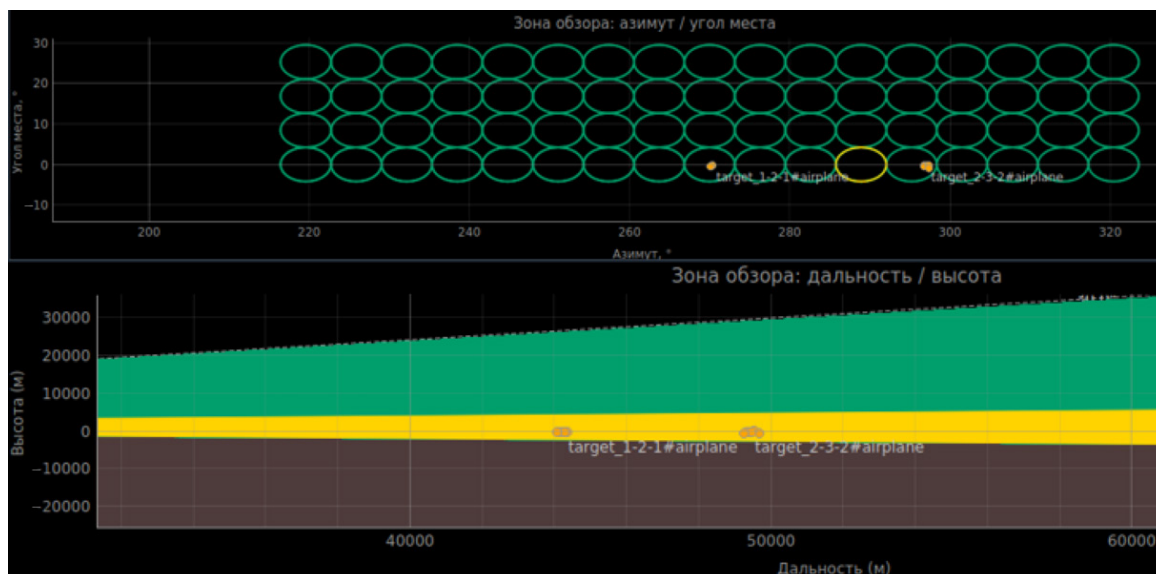


Рис. 10. Индикаторы «азимут – угол места» и «дальность – высота» в сценарии 1

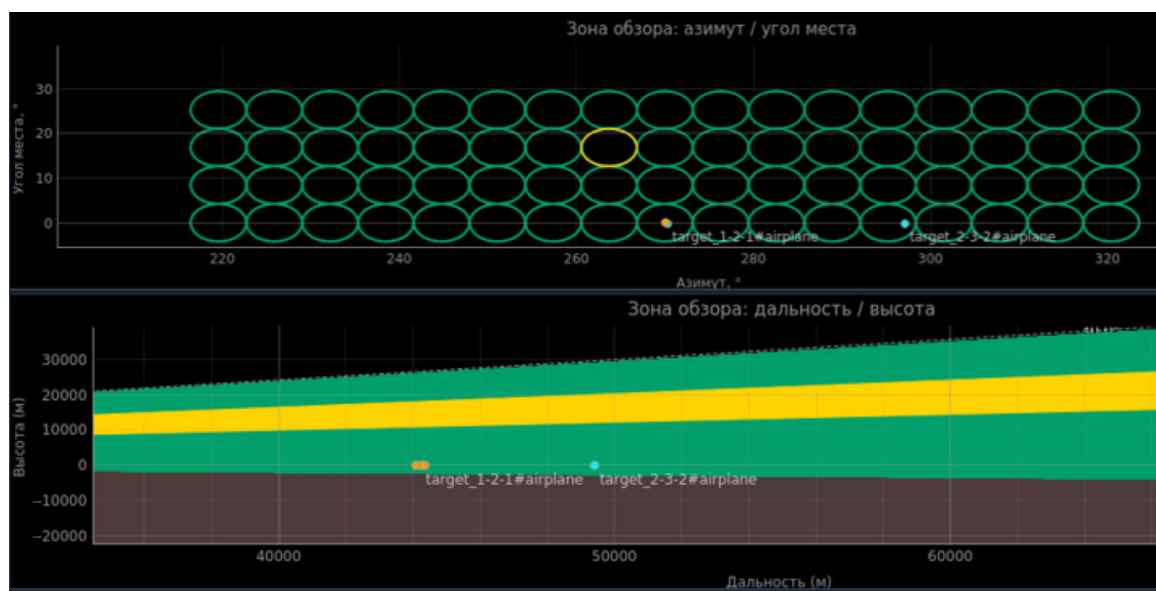


Рис. 11. Индикаторы «азимут – угол места» и «дальность – высота» в сценарии 2

Таблица. Результаты оценки эффективности АПФ

Оцениваемые величины	До АПФ	После АПФ
P_S , дБ	-94.4	-94.4
P_{JN} , дБ	-85.0	-118.0
P_N , дБ	-118.1	-118.1
ОПШ, дБ	33.1	-16.4
ОСПШ, дБ	-9.4	23.6

Для иллюстрации работы алгоритма на рис. 12 показан срез диаграммы направленности ФАР в сценарии 2. Как можно видеть, в диаграмме направленности в направлении на помеху сформировался глубокий провал, что подтверждает корректную работу алгоритма.

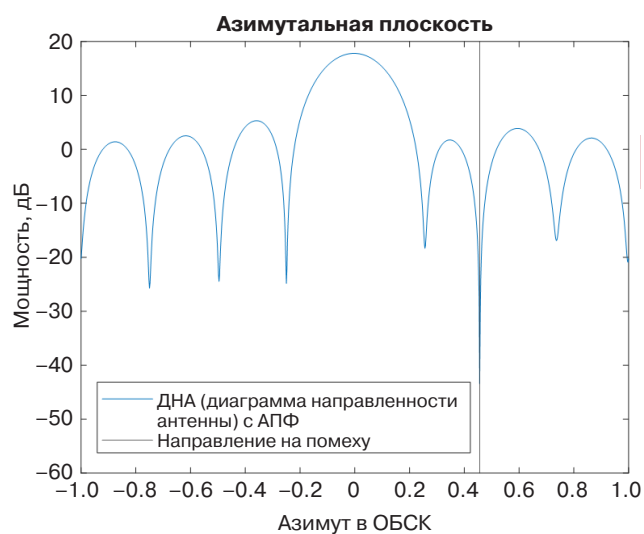


Рис. 12. Срез диаграммы направленности ФАР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В российской САПР РЛС имеются богатые возможности по разработке моделей функционирования РЛС, позволяющие детально моделировать процессы обработки различных видов сигналов. Для этого используется визуальный функциональный редактор, в котором модель РЛС собирается из набора блоков. Среда инженерных расчетов и моделирования позволяет разместить созданную модель РЛС на местности и задать сценарий налета. Для демонстрации этих возможностей была создана модель РЛС секторного обзора с электронным сканированием лучом, в которой реализован пассивный канал, реализующий обработку стохастических сигналов от внешних источников. Проведено имитационное моделирование в трех сценариях фоно-целевой обстановки. Результаты работы алгоритмов полностью соответствуют теоретическому прогнозу.

Вклад авторов

М.Ю. Конопелькин – проведение исследования, настройка шаблонов модели РЛС, постановка тактической задачи, настройка помехо-целевой обстановки, редактирование статьи.

С.В. Петров – адаптация алгоритмов для использования в САПР РЛС и их реализация, разработка сценариев и проведение имитационных экспериментов, подготовка текста статьи.

Д.А. Смирнягина – реализация алгоритмов, проведение имитационных экспериментов, анализ полученных результатов, подготовка текста статьи.

Authors' contributions

M.Yu. Konopel'kin – conducting research, configuring radar model templates, setting a tactical task, setting up a noise/signal environment, and editing the text of the article.

S.V. Petrov – adaptation of the algorithms for using in a CAR radar and their implementation, script development, conducting simulation experiments, and writing the text of the article.

D.A. Smirnyagina – implementing the algorithms, conducting simulation experiments, analyzing the results obtained, and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Созинов П.А., Коновальчик А.П., Саушкин В.П. Актуальные вопросы создания отечественной САПР для проектирования РЛС. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2019;3(23):106–119.
2. Созинов П.А., Коновальчик А.П. Основные подходы к разработке отечественной системы автоматизированного проектирования радиолокационных станций и текущие результаты. *Радиотехника*. 2020;84(7–13):62–74. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202007\(13\)-08](https://doi.org/10.18127/j00338486-202007(13)-08)
3. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Щирий А.О., Арутюнян А.А. Этапы проектирования перспективных радиолокационных станций в специализированной САПР. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2020;4(28):111–119.
4. Коновальчик А.П. Система автоматизированного проектирования радиолокационных станций: принципы построения процесса проектирования. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2021;2(30):52–64.
5. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Постановка задачи разработки и предварительная архитектура отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2017;20:127–130.
6. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Концепция многоуровневого проектирования РЛС в разрабатываемой САПР РЛС полного сквозного цикла. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2017;17(4):889–892.

REFERENCES

1. Sozinov P.A., Konoval'chik A.P., Saushkin V.P. Relevant questions of indigenous CAD development for radar engineering. *Vestnik vozduшно-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald*. 2019;3(23):106–119 (in Russ.).
2. Sozinov P.A., Konoval'chik A.P. Basic approaches to the development of a domestic system of automated design of radar stations and current results. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2020;84(7–13):62–74 (in Russ.). [https://doi.org/10.18127/j00338486-202007\(13\)-08](https://doi.org/10.18127/j00338486-202007(13)-08)
3. Konoval'chik A.P., Konopel'kin M.Yu., Shchiryi A.O., Arutyunyan A.A. Stages of designing advanced radar stations in specialized domestic CAD system. *Vestnik vozduшно-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald*. 2020;4(28):111–119 (in Russ.).
4. Konoval'chik A.P. Computer-aided design of radar stations: principles for constructing the design process. *Vestnik vozduшно-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald*. 2021;2(30):52–64 (in Russ.).
5. Konoval'chik A.P., Konopel'kin M.Yu., Plaksenko O.A., Shchiryi A.O. Statement of the task of development and preliminary architecture of the domestic CAD radar of a full end-to-end cycle. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New Information Technologies in Automated Systems*. 2017;20:127–130 (in Russ.).
6. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Shchiryi A.O. The concept of multi-level design of radars in the developed CAD radar of a full end-to-end cycle. *Fundamental'nyye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya = Fundamental Problems of Radio-Electronic Instrumentation*. 2017;17(4):889–892 (in Russ.).

7. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Отечественная система автоматизированного проектирования радиолокационных систем, комплексов и станций с учетом средств воздушно-космического нападения. *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2018;10(1):40–47.
8. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Функции имитации боевых действий в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. *Вопросы радиоэлектроники*. 2018;3:30–34.
9. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Реализация имитационного моделирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2018;21:290–293.
10. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Обоснование облика перспективных радиолокационных станций посредством разрабатываемой отечественной системы автоматизированного проектирования. *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2019;11(1):4–11.
11. Skolnik M.I. *Radar Handbook*. Third Edition. McGraw-Hill; 2008. 1328 p.
12. Петров С.В. Синтез и анализ алгоритмов обнаружения стохастических сигналов в системах с многоэлементной антенной решеткой. *Антенны*. 2015;7:29–36.
13. Петров С.В. Синтез и анализ алгоритма оценивания числа стохастических сигналов в системах с многоэлементной антенной решеткой. *Антенны*. 2015;9:15–22.
14. Ратынский М.В. *Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках*. М.: Радио и связь; 2003. 200 с.
15. Van Trees H.L. *Detection, estimation and modulation theory. Part IV. Optimum array processing*. Wiley; 2002. 1443 p.
16. Ратынский М.В. Оценка эффективности адаптивной пространственной фильтрации. *Радиотехника*. 2013;8:38–44.
7. Konoval'chik A.P., Konopel'kin M.Y., Plaksenko O.A., Shchiryy A.O. Domestic system for computer-aided design of radar systems, complexes and stations, taking into account the means of aerospace attack. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = H&ES Research*. 2018;10(1):40–47 (in Russ.).
8. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Shchiryy A.O. Functions of simulating combat actions in the developed domestic CAD radar of a full end-to-end cycle. *Voprosy radioelektroniki = Issues of Radio Electronics*. 2018;3:30–34 (in Russ.).
9. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Shchiryy A.O. Implementation of simulation modeling in the developed domestic CAD radar of a full end-to-end cycle. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New Information Technologies in Automated Systems*. 2018;21:290–293 (in Russ.).
10. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Shchiryy A.O. Substantiation of the appearance of promising radar stations using the developed domestic computer-aided design system. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = H&ES Research*. 2019;11(1):4–11 (in Russ.).
11. Skolnik M.I. *Radar Handbook*. Third Edition. McGraw-Hill; 2008. 1328 p.
12. Petrov S.V. Synthesis and analysis of stochastic signal detection algorithms in the multi-element antenna array systems. *Antenny = Antennas*. 2015;7:29–36 (in Russ.).
13. Petrov S.V. Synthesis and analysis of the algorithm for estimating the number of stochastic signals in systems with a multi-element antenna array. *Antenny = Antennas*. 2015;9:15–22 (in Russ.).
14. Ratynskii M.V. *Adaptatsiya i sverkhrazreshenie v antennoykh reshetkakh (Adaptation and Superresolution in Antenna Arrays)*. Moscow: Radio i svyaz'; 2003. 200 p. (in Russ.).
15. Van Trees H.L. *Detection, estimation and modulation theory. Part IV. Optimum array processing*. Wiley; 2002. 1443 p.
16. Ratynskiy M.V. On the evaluation of adaptive spatial filtering efficiency. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2013;8:38–44 (in Russ.).

Об авторах

Конопелькин Максим Юрьевич, начальник отдела, Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» (121471, Россия, Москва, ул. Вереysкая, 41). E-mail: m.konopelkin@almaz-antey.ru. SPIN-код РИНЦ 6660-4641, <https://orcid.org/0000-0002-0654-3845>

Петров Сергей Викторович, к.т.н., ведущий программист, Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» (121471, Россия, Москва, ул. Вереysкая, 41). E-mail: sv.petrov@almaz-antey.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5370-9898>

Смирнягина Дарья Алексеевна, техник, Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» (121471, Россия, Москва, ул. Вереysкая, 41). E-mail: ponyoo@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7237-2511>

About the authors

Maxim Yu. Konopel'kin, Head of Department, "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation (41, Vereyskaya ul., Moscow, 121471 Russia). E-mail: m.konopelkin@almaz-antey.ru. RSCI SPIN-code 6660-4641, <https://orcid.org/0000-0002-0654-3845>

Sergey V. Petrov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Programmer, "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation (41, Vereyskaya ul., Moscow, 121471 Russia). E-mail: sv.petrov@almaz-antey.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5370-9898>

Daria A. Smirnyagina, Technician, "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation (41, Vereyskaya ul., Moscow, 121471 Russia). E-mail: ponyoo@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7237-2511>

УДК 621.311.68
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-60-72>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разработка и исследование системы бесперебойного питания в сетях с напряжением до 24 В

И.М. Шаров[@], О.А. Демин, А.А. Судаков, А.Д. Ярлыков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. От эффективности и стабильности систем электропитания зависит время бесперебойной работы конечных потребителей. Такие системы должны иметь возможность распределения и накопления энергии от возобновляемых источников с различными параметрами и конфигурациями. Развитие источников возобновляемой энергии постоянно увеличивает требования к системам вторичного электропитания. Целями работы являются разработка научно-обоснованных технических решений и создание эффективной системы бесперебойного вторичного питания в низковольтных сетях постоянного тока.

Методы. Использованы современные схемотехнические решения для выполнения импульсных преобразований с высокой эффективностью. Для реализации системы контроля параметров применен гибкий программно-аппаратный комплекс.

Результаты. Разработана система бесперебойного питания для низковольтных сетей постоянного тока. Приведено описание работы блоков системы и расчеты основных элементов, в т.ч. и силовых. С применением современной элементной базы собран прототип системы, проведена настройка и измерение ее параметров. За счет представленных решений достигается универсальность комплекса по диапазону входных и выходных напряжений. Интегрирована поддержка современного протокола быстрой зарядки Power Delivery. Примененный контроллер зарядки Li+ аккумуляторов позволяет изменять количество заряжаемых ячеек и регулировать токи и напряжения заряда аккумуляторной батареи (АКБ). Блок мониторинга и управления отслеживает текущие параметры сети и управляет автоматикой системы. Использование микроконтроллера в качестве управляющего устройства дает возможность изменения параметров управления без конструктивных изменений благодаря редактированию программного обеспечения. Для безопасности функционирования системы применено двукратное резервирование модуля контроля параметров встроенной аккумуляторной батареи. Поддержка стандартизированного протокола обмена данными по шине I²C с отдельной шиной питания позволяет подключать любые необходимые датчики для отслеживания параметров системы. При необходимости могут быть добавлены сторонние устройства повышенной мощности, управляемые сигналом широко-импульсной модуляции (ШИМ). Приведен рекомендуемый производителем профиль заряда Li+ АКБ.

Выводы. Спроектированная система позволяет обеспечивать стабильное электропитание потребителей с энергопотреблением до 40 Вт в течение времени не менее 45 мин. Автоматика демонстрирует безотказное функционирование.

Ключевые слова: система бесперебойного питания, блок управления, контроллер заряда, протокол Power Delivery, профиль заряда, блок защиты, DC-DC преобразователь, модуль балансировки

• Поступила: 09.11.2021 • Доработана: 01.07.2022 • Принята к опубликованию: 26.08.2022

Для цитирования: Шаров И.М., Демин О.А., Судаков А.А., Ярлыков А.Д. Разработка и исследование системы бесперебойного питания в сетях с напряжением до 24 В. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):60–72. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-60-72>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Development and research of uninterruptible power supply system for networks with supply voltage up to 24 V

Igor M. Sharov[@], Oleg A. Demin, Alexander A. Sudakov, Alexey D. Yarlykov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Due to the continuous rapid development of renewable energy sources, requirements for secondary power supply systems keep increasing from year to year. Productive uptime for end users is dependent on the efficiency and stability of the power supply system. Such systems should be able to distribute and store energy from renewable sources having various parameters and configurations. Therefore, the present work is aimed at developing technical solutions for efficient uninterruptible secondary power supply systems in low voltage DC networks.

Methods. Advanced circuitry solutions are used for performing pulse conversions with high efficiency. The flexible hardware-software system is used for implementing the parameter control system.

Results. An uninterruptible power supply for low-voltage DC networks is developed. The description of subsystems and calculations for all main elements including the power ones are given. Using a contemporary component base, the system prototype is assembled, configured, and measured by parameters. The presented solutions allow achieving the universality of the system in terms of the input and output voltage range. Support for the fast-charging Power Delivery protocol is integrated. As well as regulating the battery charging current and voltage, the Li+ battery charging controller permits changes in the number of chargeable cells. The monitoring and control unit monitors network parameters and controls the system automation. Using a microcontroller as the control device, it is possible to easily change control parameters by changing software settings. Dual redundancy of the module monitoring the built-in battery parameters is used to ensure the reliability and safety of system functioning. Support for the standardized I²C communication protocol with a separate power bus allows any necessary sensors to be connected for monitoring system parameters. External high-power devices controlled by a PWM signal may be added, if required. In the paper, the Li+ battery charging profile recommended by the manufacturer is provided.

Conclusions. The designed system provides stable power supply to end users at a power consumption up to 40 W for at least 45 min. The automation demonstrates reliable operation.

Keywords: uninterruptible power supply, control unit, charge controller, Power Delivery standard, charging curve, battery protection system, DC-DC converter, battery balancing

• Submitted: 09.11.2021 • Revised: 01.07.2022 • Accepted: 26.08.2022

For citation: Sharov I.M., Demin O.A., Sudakov A.A., Yarlykov A.D. Development and research of uninterruptible power supply system for networks with supply voltage up to 24 V. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):60–72. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-60-72>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие источников возобновляемой энергии и увеличение их мощности требует решения множества проблем, связанных с преобразованием и накоплением энергии [1]. Системы автоматики, используемые для этих целей, должны разрабатываться с применением новых схемотехнических решений, направленных, в т.ч. на повышение эффективности работы, быстродействия и автономности; снижение тепловыделения; безопасное предотвращение нештатной работы; экономичность и т.д. Выходное напряжение систем питания 24 В является стандартным напряжением в промышленной автоматике и на автомобильном транспорте. С помощью этих систем питания может обеспечиваться электропитание мало-мощных устройств в случае аварийных ситуаций.

Прокладка сетей для аварийного оборудования совмещена с дополнительными затратами времени и материалов. Особенно это касается удаленных потребителей, например, таких как системы аварийного освещения [2]. Эти затраты можно сократить при использовании в качестве источника напряжения отдельных блоков питания в стационарном исполнении. Так как затраты электроэнергии на функционирование датчиков малы, время функционирования таких блоков в отсутствие подзарядки является удовлетворительным.

Сети питания 24 В используются в охранных системах, а также для обеспечения систем пожарной безопасности [3]. Очевидно, что эти системы требуют безотказного питания даже в условиях пропадания сети. Компании Штиль¹ и Бастион² выпускают источники бесперебойного питания в виде коробов настенного крепления. Также часто напряжение 24 В применяется для питания аудиосистем, например, его использует большое число элементов аппаратуры компании MONACOR^{3, 4}. Бесперебойные

системы в виде модулей могут быть интегрированы в устройства или же отдельным блоком обеспечивать непрерывность сети. Также имеется теоретическая возможность использования бесперебойных систем с напряжением 24 В для обеспечения безопасности грузовых автомобилей в случае пропадания напряжения сети⁵. Системы бесперебойного питания (СБП) в виде отдельных блоков – необходимый атрибут шкафов с аппаратурой. Эти системы должны обеспечивать безопасное стабильное функционирование в течение всего срока службы.

1. СИСТЕМА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Типовая СБП состоит из двух независимых устройств, которые могут работать как автономно, так и совместно, что расширяет возможности применения и реконфигурации конечного продукта. Структурная схема такой системы показана на рис. 1.

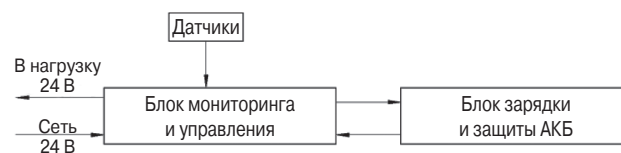


Рис. 1. Структурная схема СБП

СБП состоит из блока мониторинга и управления, блока зарядки и защиты аккумуляторной батареи (АКБ), внешних датчиков. Подобная система была реализована в [4], но с использованием электропитания от сети 220 В.

Блок мониторинга и управления предназначен для контроля параметров сети, параметров АКБ, температуры оборудования. В момент аварийного отключения сетевого напряжения блок коммутирует систему таким образом, чтобы в нагрузку было подано необходимое напряжение от блока зарядки и защиты АКБ. Тем самым обеспечивается бесперебойное питание подключенных устройств от источника резервного питания.

¹ <https://www.shtyl.ru/>, дата обращения 29.08.2022. [https://www.shtyl.ru/. Accessed August 29, 2022 (in Russ.).]

² <https://bast.ru/>, дата обращения 29.08.2022. [https://bast.ru/. Accessed August 29, 2022 (in Russ.).]

³ <https://www.monacor.com/>, дата обращения 29.08.2022. [https://www.monacor.com/. Accessed August 29, 2022.]

⁴ MONACOR INTERNATIONAL GmbH & Co. KG; 2016. 164 p. <https://www.blej24.com/catalogs/Monacor.pdf>, дата обращения 29.08.2022. [MONACOR INTERNATIONAL GmbH & Co. KG; 2016. 164 p. <https://www.blej24.com/catalogs/Monacor.pdf>. Accessed August 29, 2022.]

⁵ *MAN TGA с 2000 г. Руководство по ремонту и эксплуатации*. Монолит; 2015. 794 с. https://monolith.in.ua/catalog/rukovodstvo_po_remontu_man_tga_2000, дата обращения 29.08.2022. [MAN TGA с 2000 г. *Rukovodstvo po remontu i ekspluatatsii* (MAN TGA from 2000 y. *Repair and operation manual*). Monolit; 2015. 794 p. https://monolith.in.ua/catalog/rukovodstvo_po_remontu_man_tga_2000. Accessed August 29, 2022 (in Russ.).]

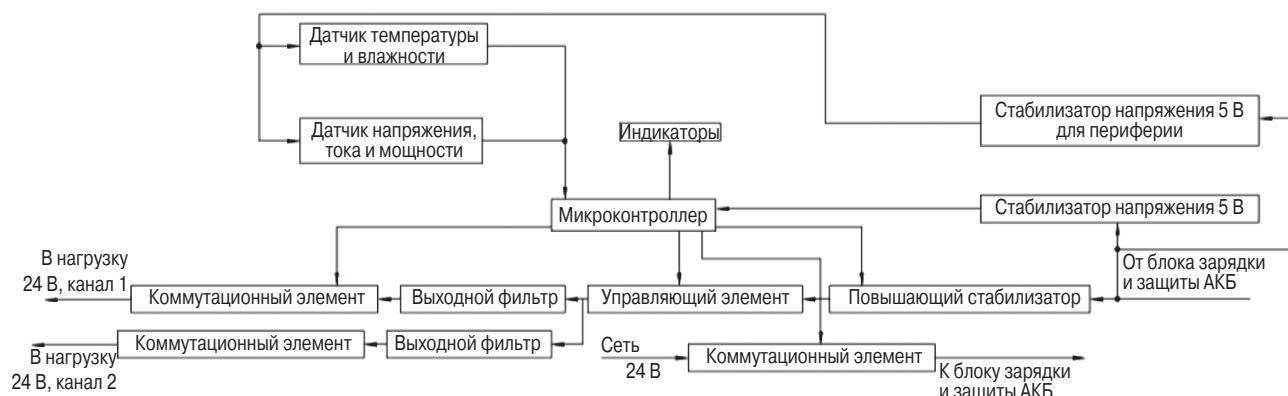


Рис. 2. Структурная схема блока мониторинга и управления

Помимо этого, осуществляется контроль выходных токов и мощности при работе от системы бесперебойного питания. Если происходит превышение допустимой потребляемой мощности от СБП, то нагрузка, подключенная к системе, автоматически отключается.

Блок зарядки и защиты АКБ предназначен для зарядки встраиваемых аккумуляторов и выравнивания потенциала между ячейками. Если встроенная литий-ионная батарея разряжена, то имеется возможность подачи резервного питания от любых аккумуляторов с напряжением больше 9 В, например, от широко распространенных свинцовых автомобильных АКБ. Также подача резервного питания возможна от потребительских портативных аккумуляторов с поддержкой протокола быстрой зарядки (Power Delivery). Блок предотвращает «перезаряд» и глубокий разряд АКБ, контролирует термистором температуру встроенного АКБ. Таким образом дублируются критически важные функции защиты системы.

2. БЛОК МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим блок мониторинга и управления, реализованный на микроконтроллере (МК) ATmega 168 (Amtel Corporation (Microchip), США) [5]. Используется версия МК с тактовой частотой 16 МГц, напряжением питания и логических уровней 5 В⁶. Эта версия выбрана из-за низкой себестоимости и доступности, что особенно актуально в условиях кризиса в полупроводниковой промышленности. При необходимости он может быть заменен без серьезных трудозатрат на более производительный

и энергоэффективный с незначительными доработками принципиальной схемы. Структурная схема блока мониторинга и управления приведена на рис. 2.

Рассмотрим принципиальную схему блока мониторинга и управления, представленную на рис. 3, 5, 6. Он содержит два линейных стабилизатора напряжения 5 В, МК, индикаторы состояния, повышающий стабилизатор, три коммутационных элемента, выходные фильтры, управляющий элемент, и разъем X1 для подключения датчиков по I²C шине с подачей питания.

Повышающий стабилизатор напряжения U1 (рис. 3) реализован на микросхеме XL6009 (XLSEMI, Китай). Его входное напряжение изменяется в пределах от 5 В до $U_{\text{вых}}$, КПД преобразования может достигать 94% в зависимости от разницы между входным и выходным напряжениями. Частота преобразования составляет 400 кГц. Максимальный коммутируемый ток – 4 А. Встроены функции плавного запуска, термозащиты, токоограничения⁷. Выходное напряжение рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{вых}} = 1.25 \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{14}} \right) = 1.25 \left(1 + \frac{18 \text{ кОм}}{1 \text{ кОм}} \right) = 23.75 \text{ В.} \quad (1)$$

Индуктивности L3 и L4 включены параллельно для обеспечения заданного максимального тока преобразования. Микросхема преобразователя имеет управляющий вход для ее включения, который подключен к выводу МК через токоограничивающий резистор R11. Резистор R12 соединяет вывод микросхемы с «землей», чтобы исключить самопроизвольное срабатывание.

В качестве управляющего элемента VT1 используется полевой транзистор PSMN4R3-30BL (Nexperia, Китай), который управляется ШИМ-сигналом, поступающим с МК, как в [6]. Данный транзистор подобран с учетом рассеиваемой мощности и требуемых выходных характеристик⁸, т.к. управляющее

⁷ Switching current boost / buck-boost / inverting DC/DC converter, XL6009. Xinlong Semiconductor Technology; 2017. 8 p.

⁸ N-channel MOSFET in D2PAK, PSMN4R3-30BL. Nexperia B.V.; 2017. 15 p.

⁶ High performance, low power AVR® 8-bit microcontroller, ATmega48/V/88/V/168/V, DS40002074A. Microchip Technology; 2018. 390 p. https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/ATmega48_88_168_megaAVR-Data-Sheet-40002074.pdf, дата обращения 29.08.2022. [High performance, low power AVR® 8-bit microcontroller, ATmega48/V/88/V/168/V, DS40002074A. Microchip Technology; 2018. 390 p. https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/ATmega48_88_168_megaAVR-Data-Sheet-40002074.pdf. Accessed August 29, 2022.]

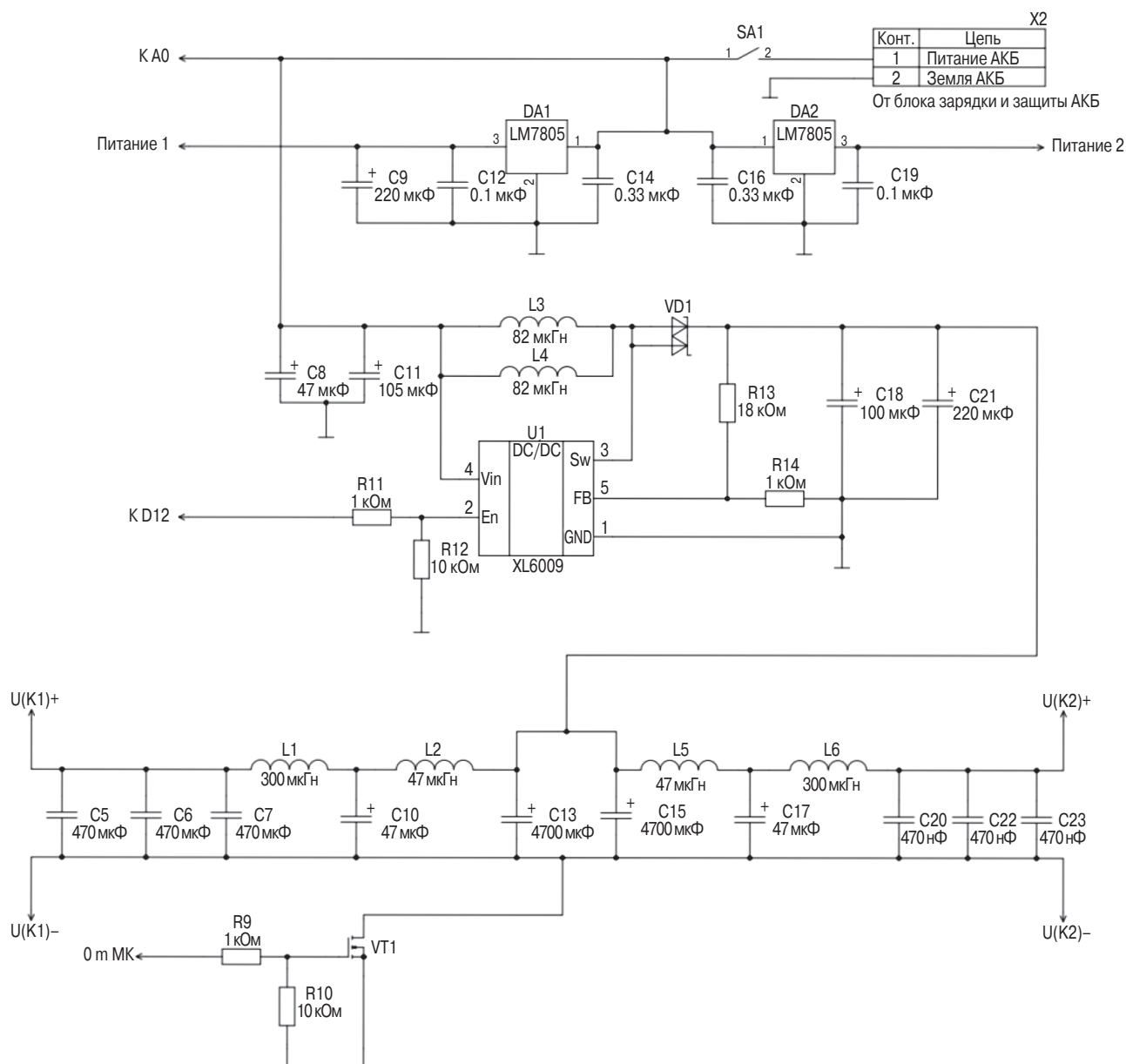


Рис. 3. Принципиальная схема питания блока мониторинга и управления. Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют ГОСТ 2.710-81⁹

напряжение, формируемое делителями R9, R10, составляет всего 4.5 В.

По выходной характеристике транзистора (рис. 4) видно, что при управляющем напряжении 4.5 В транзистор может коммутировать постоянный ток до 100 А.

Это значение намного выше необходимого для работы в установившемся режиме, однако при подаче питания на выходные фильтры возникают очень большие токи в цепи между элементами C13, C15 и C21, т.к. конденсаторы C13 и C15 имеют номинальные емкости 4700 мкФ. Эквивалентное

последовательное сопротивление данных конденсаторов составляет 55 мОм, пиковый ток при отпирании затвора транзистора¹⁰ составляет:

$$I_{\text{peak}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ESR}}} = \frac{23.75}{0.055} = 431.8 \text{ А}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ – напряжение источника, а R_{ESR} – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора. Здесь не учитываются последующие емкостные элементы фильтра, т.к. ток будет ограничен

⁹ ГОСТ 2.710-81. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1985 (in Russ.).]

¹⁰ Матвиенко В.А. Основы теории цепей: учебное пособие для вузов. Екатеринбург: УМЦ УПИ; 2016. 162 с. [Matvienko V.A. Fundamentals of electric circuit theory: Textbook for universities. Yekaterinburg: UMTs UPI; 2016. 162 p. (in Russ.).]

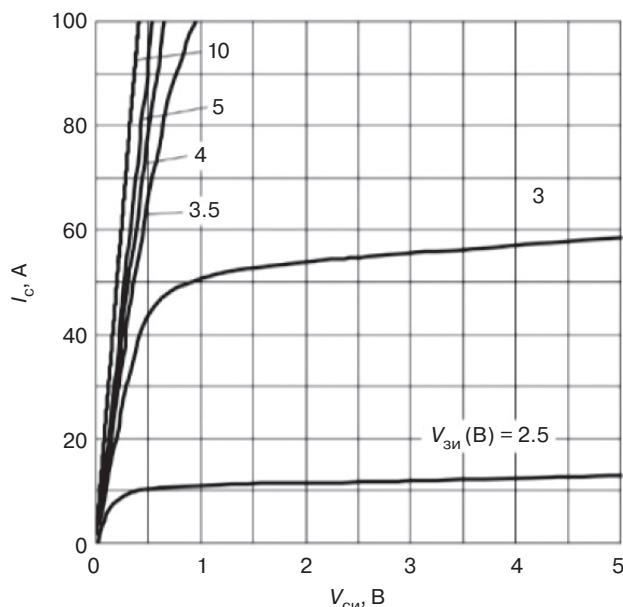


Рис. 4. Выходная характеристика транзистора PSMN4R3-30BL. Зависимость тока стока I_c от напряжения сток-исток $V_{си}$ при фиксированных напряжениях затвор-исток $V_{зи}$

повышающим стабилизатором напряжения U1, но только после того, как разрядятся его выходные емкости. Максимальный пиковый ток выбранного транзистора составляет 465 А, следовательно, его работоспособность не будет нарушена.

Каждый выходной фильтр представляет собой лестничный LC-фильтр, описанный в [7]. Они применяются для дополнительного сглаживания пульсаций после повышающего преобразователя¹¹.

Оба линейных стабилизатора напряжения 5 В выполнены на микросхемах LM7805 (Inchange Semiconductor Company, Китай). Конденсаторы C14 и C16 фильтруют входные пульсации, а C9, C12, C19 – выходные.

Коммутационные элементы K1–K3 (рис. 5) реализованы на реле HK19F-DC5V-SHG. (Ever-Way Industry Company, Китай). Заявленный ток коммутации – 2 А при постоянном напряжении 30 В¹². Реле управляется с МК через оптроны DA3–DA5. Резисторы R15–R17 ограничивают ток через оптрон и светодиод, служащий для индикации состояния элементов K1–K3. Такая реализация позволяет гальванически развязать вывод МК и реле для защиты МК от сетевого напряжения, как описано в [8].

Все используемые датчики подключены по шине I²C (рис. 6). В качестве датчика тока,

напряжения и мощности используется микросхема INA219 (Texas Instruments, США), которая определяет ток и напряжение с погрешностью $\pm 0.2\%$ ¹³. В роли датчика температуры и влажности используется микросхема SHT2 (Sensirion, Швейцария), обладающая погрешностью определения относительной влажности $\pm 2\%$, температуры $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹⁴.

В роли индикаторов выступают светодиоды HL1–HL4, которые отображают оставшийся процент заряда АКБ и режим работы системы; SB1 – кнопка сброса МК. Тактовые кнопки SB2 и SB3 служат для принудительного отключения выходных каналов СБП. Они подключены к аналоговому входу МК DD1 через резистивный делитель.

3. БЛОК ЗАРЯДКИ И ЗАЩИТЫ АКБ

Рассмотрим подробнее блок зарядки и защиты АКБ, структурная схема которого приведена на рис. 7.

Нагрузкой для этого блока в спроектированной системе выступает блок управления и мониторинга. Принципиальная схема блока зарядки и защиты АКБ представлена на рис. 8, 10, 11. Автономный импульсный контроллер заряда Li+ АКБ реализован на микросхеме MAX1737 (Maxim integrated, США) (рис. 8). Она контролирует входной ток от источника, выходной ток заряда и напряжение батареи. Допустимый диапазон напряжения зарядки одной ячейки: 4.0...4.4 В.

Внешний термистор подключается через разъем X1. Резистор R1 10 кОм устанавливается, если отсутствует необходимость в контроле температуры. При падении напряжения встроенной батареи ниже минимального порогового значения $U_{\min}$ (3), срабатывает система защиты от глубокого разряда, и нагрузка отключается транзисторами VT1 и VT2.

$$U_{\min} = 2.5N \text{ В}, \quad (3)$$

где N – количество подключенных ячеек.

Li+ аккумуляторы заряжаются по специальному профилю, отличному, например, от классических свинцовых АКБ. Это необходимо для увеличения срока службы аккумуляторов, что подробно изложено в [9], и рекомендуется для зарядки многими производителями Li+ батарей. Диаграмма напряжения и тока заряда, а также диаграммы напряжений инверсных выводов индикации этапа быстрой зарядки

¹¹ Output noise filtering for DC/DC power modules. <https://www.ti.com/lit/an/snva871/snva871.pdf>, дата обращения 29.08.2022. [Output noise filtering for DC/DC power modules. <https://www.ti.com/lit/an/snva871/snva871.pdf>. Accessed August 29, 2022.]

¹² Subminiature DIP Relay, HK19F. Ever-Way Industry Company Limited; 2011. 3 p.

¹³ Угрюмов Е.П. *Цифровая схемотехника*: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург; 2007. 800 с. [Ugryumov E.P. *Digital circuitry*: Textbook for universities. 2nd ed. BHV-Petersburg; 2007. 800 p. (in Russ.).]

¹⁴ Humidity and temperature sensor IC, SHT21. SENSIRION. CMOSens®; 2014. 15 p.

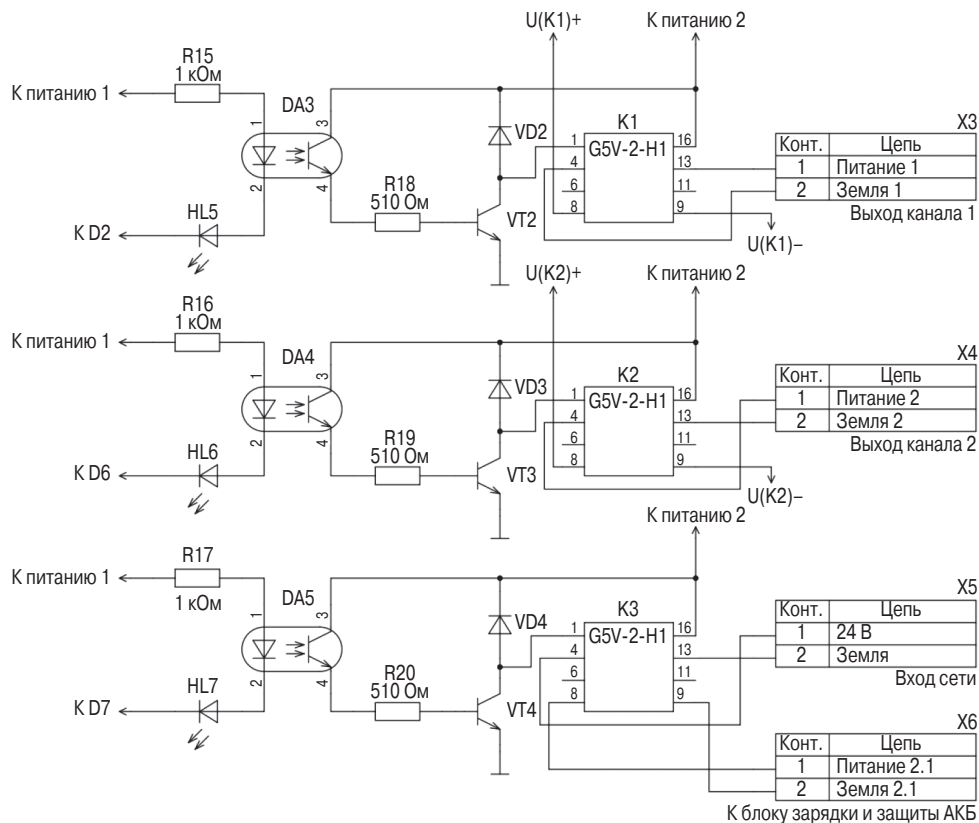


Рис. 5. Принципиальная схема коммутационных элементов блока мониторинга и управления

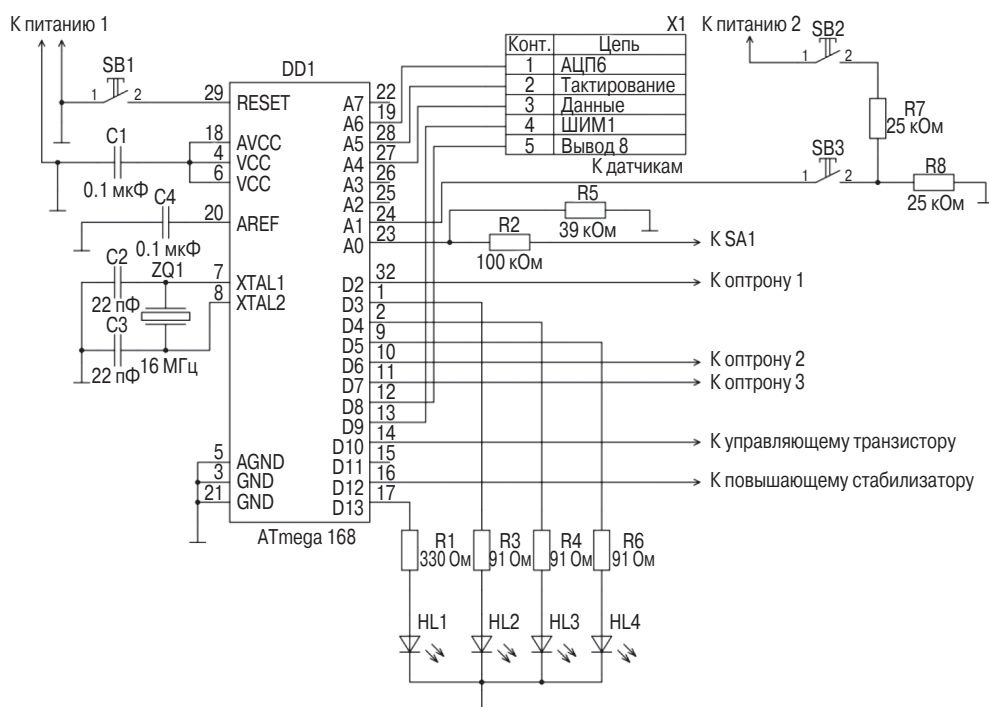


Рис. 6. Принципиальная схема микроконтроллера блока мониторинга и управления

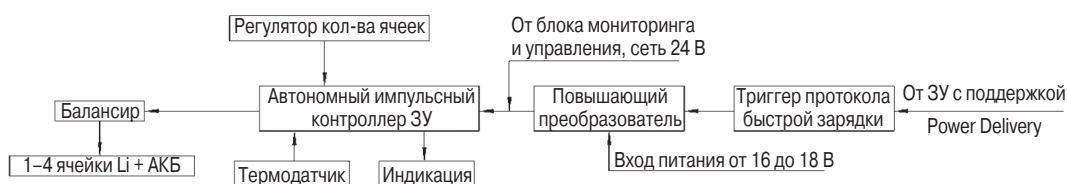


Рис. 7. Структурная схема блока зарядки и защиты АКБ

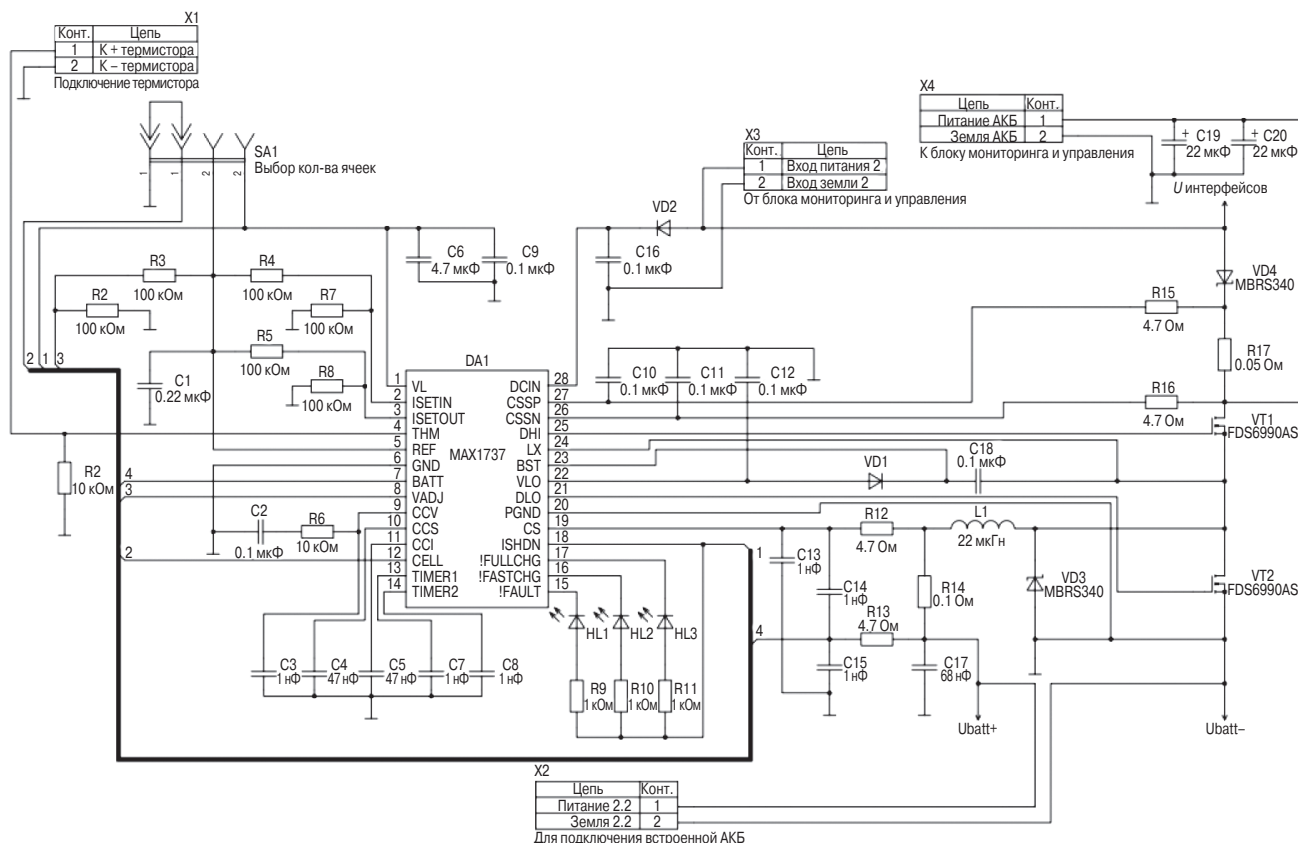


Рис. 8. Принципиальная схема контроллера блока зарядки и защиты АКБ

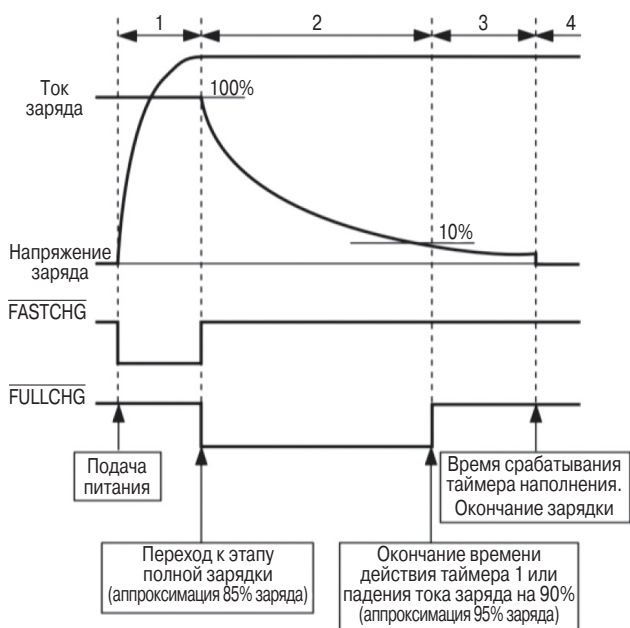


Рис. 9. Диаграммы напряжений
и токов профиля заряда

(FASTCHG) и этапа полной зарядки (FULLCHG) представлены на рис. 9.

Весь цикл зарядки разбит на 4 основных этапа:

- 1) этап быстрой зарядки, при котором напряжение на АКБ изменяется нелинейно, а ток остается постоянным;

- 2) этап полной зарядки, при котором напряжение на батарее достигает заданной величины и остается постоянным, а ток уменьшается;
- 3) этап наполнения, при котором начальное значение тока уменьшается на 90% и изменение тока становится практически линейным;
- 4) этап завершения, при котором ток заряда становится равным нулю.

Максимальная длительность каждого из циклов задается внутренними таймерами контроллера заряда. Номинал конденсатора C8 определяет время работы таймера 2, отвечающего за этап быстрой зарядки. Для значения 1 нФ это время составляет 90 мин. Если контроллер не успевает за отведенное таймером 2 время перейти к следующему этапу цикла зарядки, то микросхема отключает дальнейший заряд батареи и включает индикатор ошибки.

Номинал конденсатора C7 задает время работы таймера 1, отвечающего за этап полной зарядки и этап наполнения, а также за время предварительной подготовки. Для значения 1 нФ время этапа полной зарядки составляет 90 мин, этапа наполнения – 45 мин. В предварительную подготовку входит проверка напряжения ячеек на минимальное пороговое значение и проверка температуры. Время проверки составляет 7.5 мин. Если показания не соответствуют рабочему диапазону, контроллер выдает ошибку и цикл зарядки не начинается.

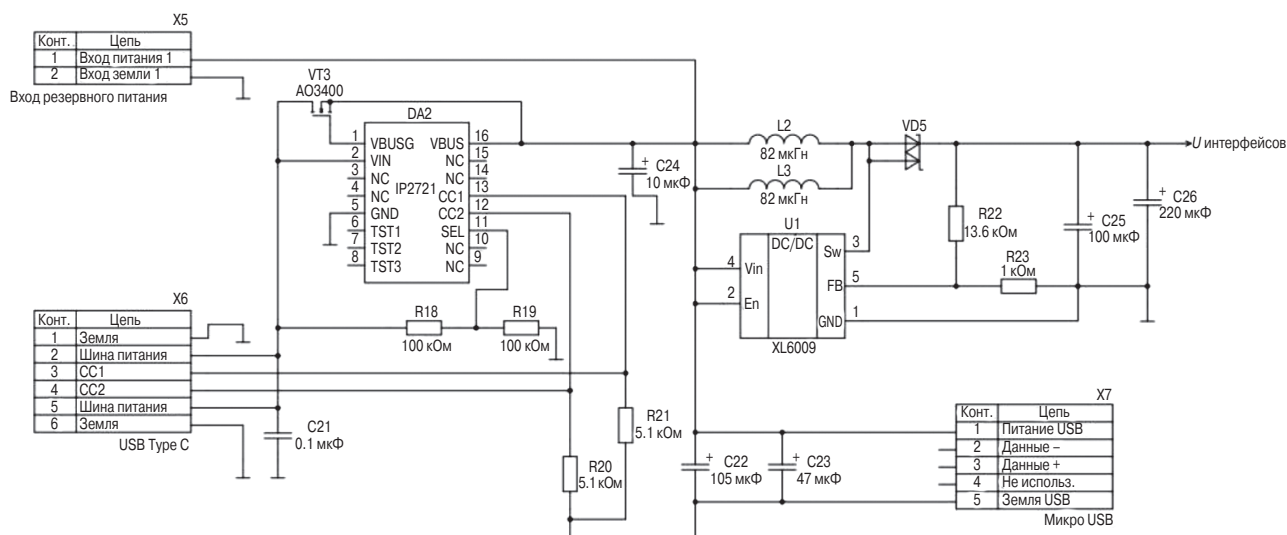


Рис. 10. Принципиальная схема повышающего преобразователя блока зарядки и защиты АКБ

Индикационные светодиоды HL1–HL3 подключены через токоограничивающие резисторы R9–R11 к инверсным выводам индикации состояния контроллера заряда FAULT, FASTCHG, FULLCHG.

Элементы VT1, VT2, C17, L1, VD3 образуют понижающий преобразователь постоянного напряжения. Затворами транзисторов управляет микросхема DA1 (Maxim integrated, США). Она генерирует ШИМ-сигнал с переменным коэффициентом заполнения, зависящим от входного напряжения и напряжения заряда батареи, и частотой 300 кГц. Заявленная эффективность преобразования находится в пределах от 85% до 90%¹⁵. Выходное напряжение находится в диапазоне от 6 до 28 В, но входное напряжение должно быть выше, чем минимальное напряжение питания контроллера заряда:

$$U_{\min \text{ chg}} = U_{\min} + 1.6 \text{ В.} \quad (4)$$

Падение напряжения на резисторе R17 задает входной ток контроллера заряда I_{in} , который рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{in}} = \frac{0.1}{R_{17}} \cdot \frac{U_{\text{ISETIN}}}{U_{\text{REF}}} = 1 \text{ А,} \quad (5)$$

где U_{ISETIN} – напряжение на выводе 2 (SETIN) DA1, задаваемое делителем напряжения на 2, образованного резисторами R4 и R7 с опорным напряжением на входе $U_{\text{REF}} = 4.166 \dots 4.242 \text{ В}$.

Падение напряжения на резисторе R14 регулирует ток заряда АКБ I_{chg} и рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{chg}} = \frac{0.2}{R_{14}} \cdot \frac{U_{\text{ISETOUT}}}{U_{\text{REF}}} = 1 \text{ А,} \quad (6)$$

¹⁵ Stand-alone switch-mode lithium-ion battery-charger controller, MAX1737, Data Sheet 19-1626. Maxim Integrated; 2017. 19 p.

где U_{ISETOUT} – напряжение на выводе I_{SETOUT} , задаваемое делителем напряжения на 2, образованного резисторами R5 и R8 с опорным напряжением на U_{REF} входе.

Повышающий преобразователь в блоке зарядки и защиты АКБ (рис. 10) используется для формирования напряжения питания контроллера заряда. За счет этого диапазон входных напряжений зарядки встроенного АКБ значительно расширяется и составляет от 5 до 28 В независимо от того, сколько ячеек подключено, т.к. образуется повышающий/понижающий преобразователь.

Поддержка протокола быстрой зарядки Power Delivery, реализованного во многих современных потребительских зарядных устройствах (ЗУ), осуществляется при помощи триггера протокола, реализованного на микросхеме IP2721 (Injoinc, Китай). Вывод SEL задает одно из стандартных значений выходного напряжения подключенного ЗУ при помощи обмена данными по протоколу. При подключении вывода SEL через резистор R18 к выводу питания на выходе ЗУ будет установлено напряжение 12 В, при подключении через резистор R19 к «земле» – 5 В¹⁶.

Балансировка встроенных ячеек осуществляется модулем балансировки при помощи операционных усилителей DA3, DA4, DA5 (рис. 11). Каждый из них управляет парой транзисторов, сравнивая сумму напряжений¹⁷ на двух ячейках АКБ с напряжением

¹⁶ TYPE-C/PD2.0/PD3.0 Physical Layer IC for USB TYPE-C input Interfaces, IP2721. Injoinc Corp.; 2017. 7 p.

¹⁷ Keep the balance – balancing of supercapacitors, ANP090. <https://www.we-online.com/catalog/media/o671684v410%20ANP090a%20EN.pdf>, дата обращения 29.08.2022. [Keep the balance – balancing of supercapacitors, ANP090. <https://www.we-online.com/catalog/media/o671684v410%20ANP090a%20EN.pdf>. Accessed August 29, 2022.]

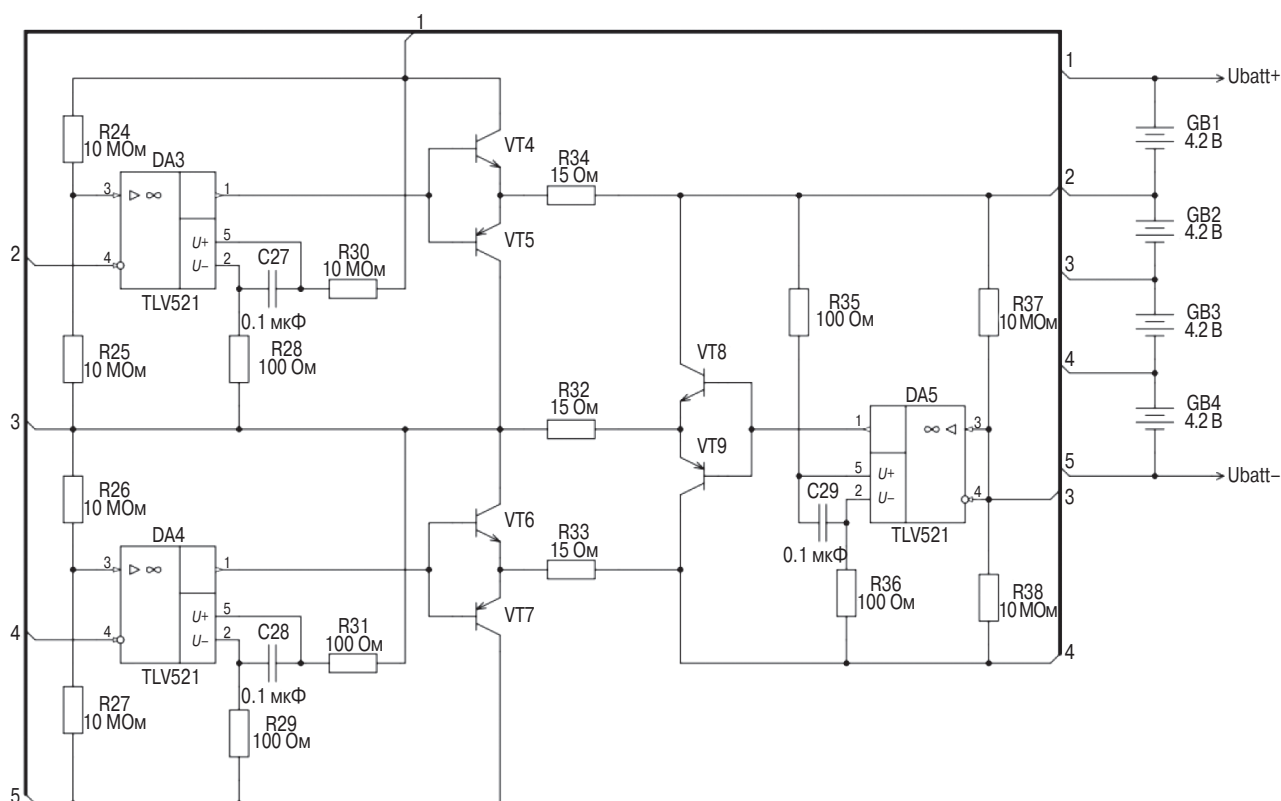


Рис. 11. Принципиальная схема модуля балансировки блока зарядки и защиты АКБ

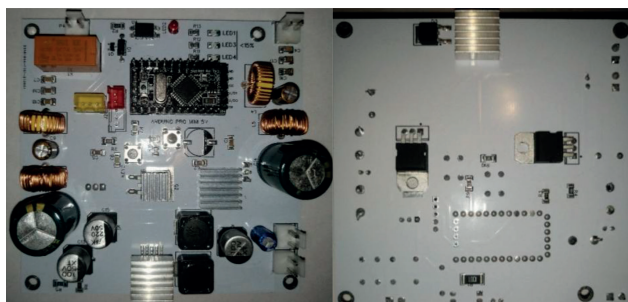


Рис. 12. Прототип блока мониторинга и управления: вид сверху и снизу



Рис. 13. Прототип блока зарядки и защиты АКБ: вид сверху и снизу

между двумя последовательно соединенным ячейками с учетом делителя напряжения, образованного парой резисторов R24–R25 для DA3, R26–R27 для DA4 и R37–R38 для DA5. Встроенная АКБ образована последовательно соединенными ячейками Li+ аккумуляторов GB1–GB4. Операционные усилители TLV521 (Texas Instruments, США) выбраны из-за низкого энергопотребления¹⁸, чем достигается увеличение энергоэффективности.

Внешний вид изготовленного прототипа блока мониторинга и управления представлен на рис. 12.

Внешний вид изготовленного прототипа блока зарядки и защиты АКБ представлен на рис. 13.

¹⁸ NanoPower, 350nA, RRIO, CMOS Input, operational amplifier, TLV521, Data Sheet SNOSD26. Texas Instruments; 2016. 27 p.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ

Для оценки выходной мощности двух каналов каждый канал был подключен к управляемой электронной нагрузке. Установлен режим работы по постоянной мощности с мощностью 20 Вт на каждый канал. Суммарная мощность, отдаваемая системой в электронную нагрузку при таком режиме работы, составила около 40 Вт. С помощью средств измерения, встроенных в блоки электронных нагрузок, получены временные диаграммы тока, напряжения и мощности.

Временные диаграммы напряжения, тока и мощности первого канала представлены на рис. 14 и 15.

Из рис. 14 видно, что изменение уровня выходного напряжения в процессе работы составляет 0.2 В.

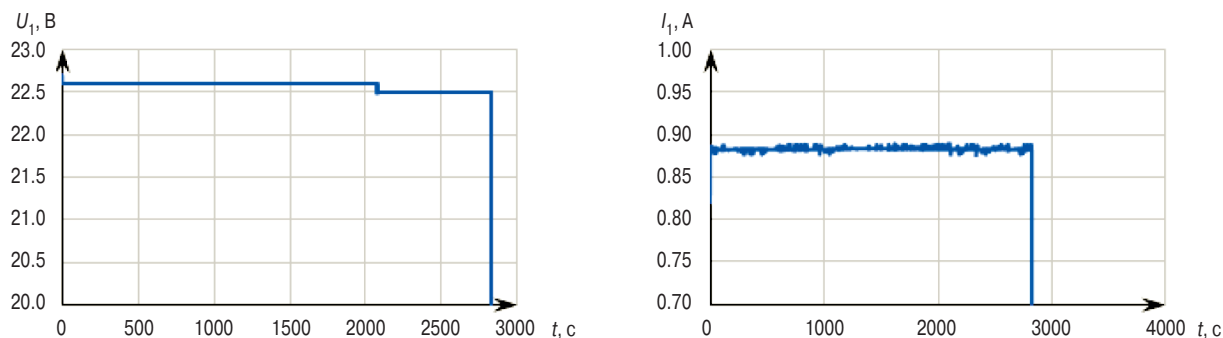


Рис. 14. Временные диаграммы напряжения и тока первого канала

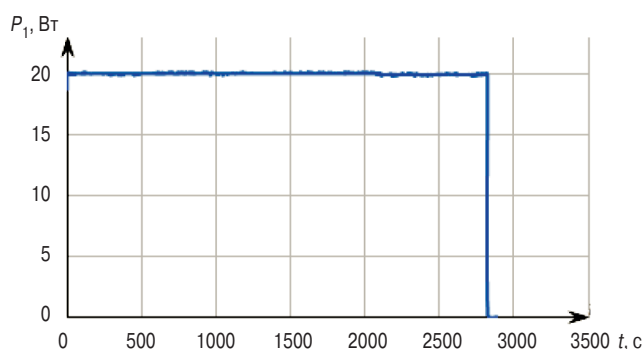


Рис. 15. Временная диаграмма мощности первого канала

Реальный уровень выходного напряжения составляет 22.6 В и отличается от расчетного значения $U_{\text{вых}}$. Это вызвано падением напряжения на выходных фильтрах и разбросом параметров резисторов R13, R14. Пульсации выходного тока обусловлены принципом работы управляемой электронной нагрузки.

Временные диаграммы второго канала практически совпадают с временными диаграммами первого канала с учетом незначительного разброса параметров выходных фильтров, поэтому на рис. 16 приведены временные диаграммы суммарного тока и мощности двух каналов.

Как можно заметить из рис. 14–16, в момент времени $t = 2800$ с происходит скачкообразное падение уровня выходного напряжения и мощности. Это связано с работой автоматики: напряжение встроенных АКБ падает ниже критического значения, они полностью разряжаются, и контроллер заряда отключает их от блока мониторинга и управления.

Из рис. 16 видно, что суммарная выходная мощность составляет около 40 Вт, и время работы системы с такой нагрузкой составляет не менее 45 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан прототип системы бесперебойного питания с возможностью изменения выходного напряжения под требуемые задачи. Проведено тестирование каждого блока по отдельности и их взаимодействия.

Система формирует стабильное выходное напряжение 22.6 В с мощностью 20 Вт в каждом канале. Блок мониторинга и управления корректно отображает оставшийся процент заряда встроенного АКБ с шагом 25% и обеспечивает отключение потребителей при значении напряжения встроенного АКБ ниже заданного порога, тем самым дублируя функцию защиты блока зарядки и защиты АКБ.

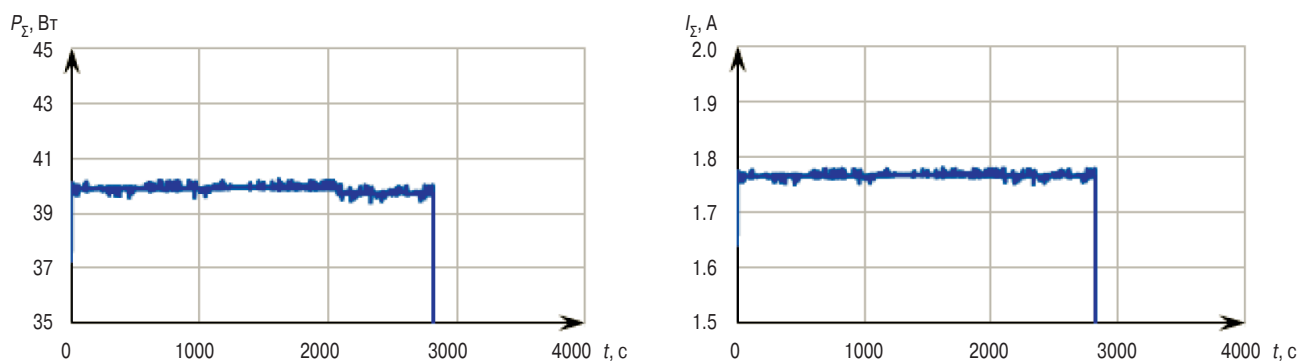


Рис. 16. Временные диаграммы суммарной мощности и тока двух каналов

Блок зарядки и защиты АКБ обеспечивает стабильное электропитание блока мониторинга и управления в течение не менее 45 мин, успешно активирует протокол быстрой зарядки при подключении к ЗУ и выполняет функцию защиты встроенных АКБ от «перезаряда».

В дальнейшем планируется улучшение разработанной системы, а именно:

- доработка выходных фильтров для снижения пульсаций выходного напряжения;
- доработка входных фильтров DC-DC преобразователя для снижения уровня шумов¹⁹;
- замена транзисторной группы в модуле балансировки для увеличения максимально допустимых

¹⁹ Design and application considerations of input filter to reduce conducted emissions caused by DC/DC converter, No. 62AN101E Rev.003. ROHM Co., Ltd.; 2020. 7 p.

токов балансировки или использование для этих же целей модуля балансировки²⁰;

- увеличение выходной мощности и разработка инвертора для обеспечения стандартного сетевого напряжения 220 В;
- реализация управления контроллером заряда с микроконтроллера.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

²⁰ Passive balancing allows all cells to appear to have the same capacity. <https://softei.com/passive-balancing-allows-all-cells-to-appear-to-have-the-same-capacity>, дата обращения 29.08.2022. [Passive balancing allows all cells to appear to have the same capacity. <https://softei.com/passive-balancing-allows-all-cells-to-appear-to-have-the-same-capacity>. Accessed August 29, 2022.]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. *Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями*: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2015. 128 с.
2. Даченко В.А., Сивков А.А., Герасимов Д.Ю. *Монтаж, ремонт и эксплуатация электрических распределительных сетей в системах электроснабжения промышленных предприятий*: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2007. 132 с.
3. Traister J.E., Kennedy T. *Low voltage wiring: Security/Fire alarm systems*. NY: The McGraw-Hill Companies; 2002. 408 p.
4. Битюков В.К., Лухт М.А., Михневич Н.Г., Петров В.А. Системная плата учебного лабораторного стенда с виртуальной передней панелью для исследований характеристик линейных стабилизаторов. *Российский технологический журнал*. 2017;5(4):22–31. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-4-22-31>
5. Ревич Ю.В. *Программирование микроконтроллеров AVR: от Arduino к ассемблеру*. СПб.: БХВ-Петербург; 2020. 448 с. ISBN 978-5-9775-4076-6
6. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Источники вторичного электропитания*. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия; 2020. 376 с. ISBN 978-5-9729-0471-6
7. Миленина С.А., Миленин Н.К. *Электротехника, электроника и схемотехника*: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт; 2021. 406 с. ISBN 978-5-534-04525-3
8. Гололобов В.Н. *Схемотехника с программой Multisim для любознательных*. СПб.: Наука и техника; 2019. 272 с. ISBN 978-5-94387-880-0
9. Methekar P.N., et al. Optimum charging profile for lithium-ion batteries to maximize energy storage and utilization. *ECS Trans*. 2010;25(35):139–146. <https://doi.org/10.1149/1.3414012>

REFERENCES

1. Lukutin B.V., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. *Sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami: uchebnoe posobie (Power supply systems with wind and solar power plants: textbook)*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2015. 128 p. (in Russ.).
2. Datsenko V.A., Sivkov A.A., Gerasimov D.Yu. *Montazh, remont i ekspluatatsiya elektricheskikh raspredelitel'nykh setei v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii: uchebnoe posobie (Installation, repair and operation of electrical distribution networks in power supply systems of industrial enterprises: textbook)*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2007. 132 p. (in Russ.).
3. Traister J.E., Kennedy T. *Low voltage wiring: Security/Fire alarm systems*. NY: The McGraw-Hill Companies; 2002. 408 p.
4. Bityukov V.K., Lukht M.A., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Mother board of trainer with virtual front panel for study of linear voltage regulator characteristics. *Russ. Technol. J*. 2017;5(4):22–31 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-4-22-31>
5. Revich Yu.V. *Programmirovaniye mikrokontrollerov AVR: ot Arduino k assembleru (Programming of AVR microcontrollers: from Arduino to Assembler)*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2020. 448 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9775-4076-6
6. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Istochniki vtorichnogo elektropitaniya (Secondary power sources)*. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya; 2020. 376 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-0471-6
7. Milenina S.A., Milenin N.K. *Elektrotehnika, elektronika i skhemotekhnika: uchebnik i praktikum dlya vuzov (Electrical engineering, electronics and circuit engineering: textbook and workshop for universities)*. Moscow: Yurait; 2021. 406 p. (in Russ.). ISBN 978-5-534-04525-3

8. Gololobov V.N. *Skhemotekhnika s programmoi Multisim dlya lyuboznatel'nykh (CIRCUIT DESIGN with the Multisim program for the curious)*. St. Petersburg: Nauka i tekhnika; 2019. 272 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94387-880-0
9. Methekar P.N., et al. Optimum charging profile for lithium-ion batteries to maximize energy storage and utilization. *ECS Trans.* 2010;25(35):139–146. <https://doi.org/10.1149/1.3414012>

Об авторах

Шаров Игорь Михайлович, студент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ctosworld@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3391-3266>

Демин Олег Александрович, студент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: coin12@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9864-5338>

Судаков Александр Анатольевич, ассистент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sudakov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4225-2792, <https://orcid.org/0000-0001-6958-8111>

Ярлыков Алексей Дмитриевич, ассистент, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: yarlykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57290652000, SPIN-код РИНЦ 3450-1587, <https://orcid.org/0000-0002-7232-8588>

About the authors

Igor M. Sharov, Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ctosworld@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3391-3266>

Oleg A. Demin, Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: coin12@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9864-5338>

Alexander A. Sudakov, Assistant, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sudakov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4225-2792, <https://orcid.org/0000-0001-6958-8111>

Alexey D. Yarlykov, Assistant, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: yarlykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57290652000, RSCI SPIN-code 3450-1587, <https://orcid.org/0000-0002-7232-8588>



ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Технология формирования сегнетоэлектрических регулярных доменных структур с использованием интерферирующих упругих волн

В.В. Крутов[@], А.С. Сигов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Работы в области доменной инженерии в сегнетоэлектриках ведутся во многих лабораториях мира. На протяжении ряда лет в РТУ МИРЭА проводятся исследования по созданию высокопроизводительной технологии формирования сегнетоэлектрических фотонных и фононных кристаллов. Технология характеризуется малой продолжительностью технологического цикла и обеспечивает необходимую глубину пространственно-периодического инвертирования доменов. Ключевым звеном технологии является комбинированное воздействие однородного электрического поля и интерферирующих упругих волн высоких частот, создающих температурную решетку. Технология имеет универсальный характер в отношении сегнетоэлектриков различной степени акустической прозрачности, что достигается путем использования сильно диссипативных жидких электродов определенной толщины. При этом энергия упругих волн практически не проникает в сегнетоэлектрик, что исключает проявление нежелательных эффектов. Цель настоящей статьи – анализ результатов работ, выполненных в РТУ МИРЭА, в области технологии формирования сегнетоэлектрических регулярных доменных структур (РДС) в период с 2008 г. по настоящее время.

Методы. Использованы положения теории распространения, преломления и интерференции упругих волн в конденсированных средах, в частности ньютоновская модель жидкости применительно к сдвиговым волнам, а также компьютерное моделирование. При рассмотрении основных этапов биимпульсной гетеротермальной технологии формирования РДС применялись методы анализа и синтеза.

Результаты. Показана возможность формирования не только микро-, но также субмикронных РДС. Даны рекомендации по выбору типа и конкретных свойств жидких электродов, углов между направлением распространения интерферирующих волн, а также их частоты. Показано, что использование в качестве жидких электродов сильно диссипативных ионных жидкостей создает благоприятные условия для формирования РДС с малым периодом при комнатной температуре. Так, на сдвиговых волнах с электродами на основе $\text{LiPF}_6\text{-PC}$ на частоте 300 МГц могут быть созданы РДС с периодом около 2 мкм. Определены основные технологические параметры, как для случая воздействия продольных упругих волн, так и для случая сдвиговых волн с горизонтальной поляризацией. Результаты применимы к таким сегнетоэлектрикам как ниобат лития, титанил-фосфат калия, цирконат-титанат свинца.

Выводы. Предложенные и исследованные методы ориентированы на массовое производство устройств на основе РДС, в т.ч. на изготовление оптических параметрических генераторов, устройств акустоэлектроники, а также генераторов терагерцовых волн и генераторов второй оптической гармоники. Технология обладает малой продолжительностью технологического цикла, сопоставимой с временем переключения поляризации в используемом сегнетоэлектрике.

Ключевые слова: доменная инженерия, сегнетоэлектрики, температурные решетки, биимпульсная гетеротермальная технология, упругие волны, акустоинтерференционный метод

• Поступила: 11.05.2022 • Доработана: 04.07.2022 • Принята к опубликованию: 12.09.2022

Для цитирования: Крутов В.В., Сигов А.С. Технология формирования сегнетоэлектрических регулярных доменных структур с использованием интерферирующих упругих волн. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):73–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-73-91>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Technology for the creation of ferroelectric regular domain structures using interfering elastic waves

Vladislav V. Krutov[@], Alexander S. Sigov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. In many laboratories around the world, work is underway in the field of domain engineering of ferroelectrics. For a number of years, RTU MIREA has been conducting research on the creation of a high-performance technology for the formation of ferroelectric photonic and phononic crystals. The technology is characterized by a short duration of the technological cycle and provides the necessary depth of spatially periodic domain inversion. The key element of the technology is the combined effect of a uniform electric field and interfering high-frequency elastic waves that create a temperature grating. The technology is universal in relation to ferroelectrics of varying degrees of acoustic transparency, which is achieved by using highly dissipative liquid electrodes of a certain thickness. In this case, the energy of elastic waves practically does not penetrate into the ferroelectric, so the manifestation of undesirable effects is excluded. The purpose of this review article is to analyze the results of work carried out at RTU MIREA in the field of technology for the formation of ferroelectric regular domain structures (RDSs) during the period from 2008 to the present.

Methods. Provisions of the theory of propagation, refraction and interference of elastic waves in condensed media are used, in particular, the Newtonian model of a liquid as applied to shear waves, as well as computer simulation. When considering the main stages of the Double Pulse heterothermal technology for the formation of RDSs, methods of analysis and synthesis were applied.

Results. The possibility of forming not only micro-, but also submicron RDSs is shown. Recommendations are given on the choice of the type and specific properties of liquid electrodes, the angles between the direction of propagation of interfering waves, and their frequency. It is shown, in particular, that the use of highly dissipative ionic liquids as liquid electrodes creates favorable conditions for the formation of an RDS with a short period at room temperature. Thus, on shear waves with electrodes based on LiPF₆–PC at a frequency of 300 MHz, RDS with a period of about 2 μm can be created. The main technological parameters are determined both for the case of the action of longitudinal elastic waves and for the case of shear waves with horizontal polarization. The results are applicable to ferroelectrics such as lithium niobate, potassium titanyl phosphate, and lead zirconate titanate.

Conclusions. The proposed and studied methods are focused on the mass production of devices based on RDSs, in particular, on the manufacturing of optical parametric oscillators, acoustoelectronic devices, as well as terahertz wave generators and second harmonic oscillators. The technology has a short duration of the technological cycle, comparable to the polarization switching time in the used ferroelectric.

Keywords: domain engineering, ferroelectrics, temperature gratings, double pulse heterothermal technology, elastic waves, acoustic interference method

• Submitted: 11.05.2022 • Revised: 04.07.2022 • Accepted: 12.09.2022

For citation: Krutov V.V., Sigov A.S. Technology for the creation of ferroelectric regular domain structures using interfering elastic waves. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):73–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-73-91>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно исследуются методы создания фотонных и фононных кристаллов на основе сегнетоэлектриков и мультиферроиков. Разновидностью фотонных и фононных кристаллов являются регулярные доменные структуры (РДС). Сегнетоэлектрическая РДС типа «голова к хвосту» («side-by-side») схематично изображена на рис. 1.

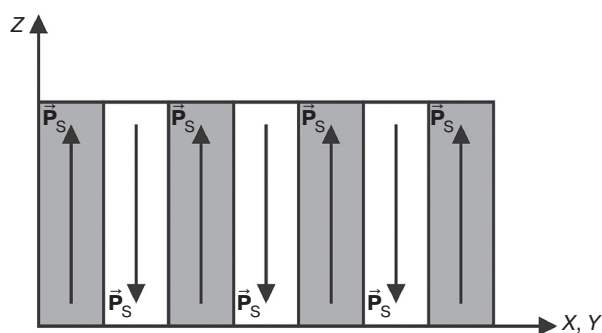


Рис. 1. РДС типа «голова к хвосту». Стрелками показан вектор спонтанной поляризации

Интерес к РДС обусловлен их способностью выполнять различные функции и возможностью их применения в акустоэлектронике [1], фотонике [2, 3], в устройствах фильтрации и модуляции сигналов [4, 5].

Разработка различных методов формирования РДС в сегнетоэлектриках ведется во многих лабораториях мира на протяжении более четверти века (см., например, обзор [6]). В частности, широко распространен метод [3], основанный на использовании неоднородного электрического поля, создаваемого с помощью структурированных электродов, нанесение которых требует применения фотолитографии. Методы «вычерчивания доменного рисунка» путем последовательного сканирования поверхности сегнетоэлектрика фокусированным лазерным или электронным лучом [7] малоприменимы для массового производства устройств на базе РДС из-за больших временных затрат и неглубокого прорастания доменов. Метод [8], основанный на перемещении зонда атомного силового микроскопа по поверхности, также требует большой продолжительности технологического цикла и обеспечивает лишь неглубокое прорастание доменов. Метод непосредственного воздействия интерферирующих лазерных пучков

на монодоменный сегнетоэлектрик [9] не позволяет сформировать РДС высокого качества. Лазерное облучение сопровождается генерацией фотоиндуцированных носителей заряда, что приводит к таким нежелательным эффектам, как, например, деструкция температурной решетки за счет тепловыделения рекомбинирующими носителями за пределами пучностей интерференционной картины. Кроме того, эффект двойного лучепреломления не позволяет создавать контрастную температурную решетку.

Перспективными следует считать методы с минимальной продолжительностью технологического цикла, обеспечивающие заданную глубину прорастания доменов и РДС высокого качества.

В последние годы ведется поиск «быстрых» индустриально-ориентированных методов формирования РДС, не требующих применения фотолитографии [10–13]. В частности, в [10] продемонстрирован метод, позволяющий формировать поверхностные квазипериодические доменные структуры при воздействии инфракрасных лазерных импульсов без использования фотолитографии. Преимущество этого метода – возможность в короткие сроки формировать доменные структуры без применения фотолитографии. Однако метод пока не позволяет создавать периодические доменные структуры с заданным пространственным периодом.

Исследуются также методы формирования РДС с помощью температурной решетки, индуцированной интерферирующими упругими волнами [13–16]. В основу этих методов положен термоинтерференционный принцип, согласно которому локальное стимулирование переключения доменов достигается с помощью воздействия импульса однородного электрического поля и температурной решетки, создаваемой воздействием интерферирующих волн. Рис. 2 иллюстрирует импульс волнового воздействия (интерферирующих волн) с плотностью мощности P , а также импульс напряженности E инвертирующего однородного электрического поля. Соответствующая технология комбинированного воздействия получила название биимпульсной гетеротермальной (БИГ) технологии [14]. Селективное переключение доменов при наложении однородного электрического поля обеспечивается благодаря феномену уменьшения коэрцитивного поля сегнетоэлектриков с ростом температуры [6]. Такой подход позволяет сократить

(по сравнению с аналогами) время формирования РДС до значений, сопоставимых с временем переключения поляризации сегнетоэлектрика.

Перечислим основные этапы БИГ-технологии.

1. Формирование интерференционной картины с помощью импульса волнового воздействия (создание температурной решетки).
2. Переключение поляризации в нагретых участках температурной решетки однородным электрическим полем с напряженностью $E \geq E_C$, где E_C – коэрцитивное поле.
3. Своевременное отключение электрического поля при достижении заданной глубины прорастания доменов, а также с целью предотвращения латерального прорастания доменов.

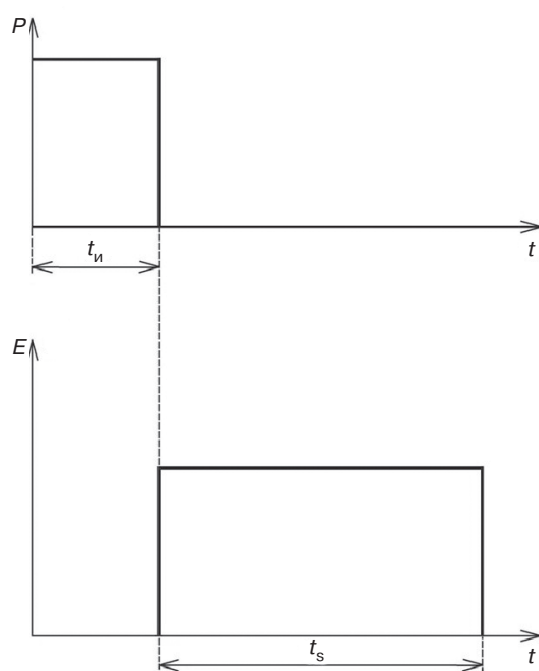


Рис. 2. Импульсы плотности мощности P волнового воздействия и напряженности E инвертирующего электрического поля. t_n – длительность термоинтерференционного импульса, t_s – длительность воздействия однородного электрического поля

Импульсный характер гетеротермального нагрева является принципиальным и продиктован необходимостью предотвращения деструкции температурной решетки за счет диффузии тепла.

Известно, что процесс инвертирования доменов начинается на $+Z$ полярной грани сегнетоэлектрика [17, 18]. Поэтому температурную решетку целесообразно создавать именно на $+Z$ -поверхности сегнетоэлектрика.

В то же время, для создания контрастной температурной решетки, индуцированной интерферирующими волнами, необходимо учитывать эффективность поглощения волн в сегнетоэлектриках.

В частности, в ниобате и танталате лития поглощение весьма мало в широком диапазоне частот [19]. Следовательно, войдя в пластину сегнетоэлектрика, волны могут многократно отражаться от ее граней, снижая контрастность температурной решетки. Поэтому для предотвращения многократных отражений необходим поглощающий слой вблизи $+Z$ полярной грани. Кроме того, при наклонном падении ультразвука на поверхность как изотропного, так и анизотропного твердого тела имеет место эффект двойного лучепреломления [19–22]. Разумеется, расщепление преломленной волны на продольную и поперечную крайне нежелательно при создании контрастной температурной решетки.

Очевидно, что более технологичным является использование поглощающего слоя в качестве электрода для подачи инвертирующего напряжения. Поэтому в качестве поглощающего слоя целесообразно использовать слой электропроводящей жидкости или металлическую пленку. Однако нанесение металлической пленки требует значительных временных затрат, и, кроме того, металлы обладают высокой теплопроводностью, что препятствует созданию долгоживущих температурных решеток.

В настоящей статье рассматриваются варианты технологии, основанной на использовании температурной решетки, наведенной интерферирующими упругими волнами, падающими на жидкий электрод, контактирующий с $+Z$ -поверхностью сегнетоэлектрика (акустоинтерференционный метод). Результаты применимы к таким сегнетоэлектрикам, как, например, ниобат лития, титанил-фосфат калия, цирконат-титанат свинца.

1. ФОРМИРОВАНИЕ РДС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ УПРУГИХ ВОЛН

1.1. Технологическая установка.

Расчет основных параметров.

Дилемма частот упругих волн

Рабочий участок технологической установки показан на рис. 3 (электрическая схема описана в [6]). Работа технологической установки основана на комбинированном воздействии двух импульсов: интерференционного и инвертирующего (см. раздел «Введение»).

Как показано на рис. 3, в сегнетоэлектрике 1 на участке, прилегающем к интерференционной картине, формируется РДС за счет локального переключения доменов однородным электрическим полем. При этом используется жидкая электропроводящая поглощающая пленка 6, контактирующая с $+Z$ -поверхностью 9 сегнетоэлектрика. Пленка 6 выполняет функцию электрода для подачи напряжения U_c ,

быть много меньше времени релаксации температурной решетки и может оцениваться по формуле [12]:

$$t_p \approx 0.1 \cdot d^2/\chi, \quad (1.7)$$

где χ – коэффициент температуропроводности сегнетоэлектрика.

Падающая на поглощающую пленку-электрод мощность акустического импульса (обеспечивающая адиабатический нагрев в пучностях) вычисляется с помощью выражения [23]:

$$P_1 \approx \frac{\rho_a C_a \chi \Delta T S}{1.6(1-R)d} \left(1 + \frac{8zC\rho}{dC_a \rho_a} \right), \quad (1.8)$$

где C_a , ρ_a , C , ρ – удельная теплоемкость и плотность соответственно поглощающей пленки-электрода и сегнетоэлектрика; z – толщина зародышеобразующего слоя сегнетоэлектрика; R – коэффициент отражения от поглощающей пленки; ΔT – приращение температуры в температурной решетке; S – площадь РДС на Z-поверхности.

Данное выражение учитывает затраты энергии на локальный нагрев поглощающей пленки-электрода, а также на трансляцию температурной решетки в зародышеобразующий слой сегнетоэлектрика (за счет теплопередачи).

Импульсная мощность P_G генератора СВЧ колебаний, подаваемая на вход пьезоизлучателей, вычисляется по формуле:

$$P_G \approx \frac{P_1 \exp(2A_S f^2 L)}{\eta \left[1 - \left(\frac{K_{SW} - 1}{K_{SW} + 1} \right)^2 \right]}, \quad (1.9)$$

где K_{SW} , η – коэффициент стоячей волны в радиотракте и эффективность преобразования электрической энергии в акустическую, соответственно; A_S – коэффициент пропорциональности частотной зависимости показателя поглощения ультразвука для материала звукопровода [11].

Данное выражение учитывает потери акустической энергии в звукопроводе, а также потери преобразования электрической энергии в акустическую (как диссипативные, так и потери на отражение электромагнитной волны от пьезоизлучателей).

Порядок расчета был использован для определения основных технологических параметров формирования РДС в эпитаксиальных Z-ориентированных пленках цирконат-титаната свинца (ЦТС), нанесенных на проводящую подложку. РДС, сформированные в указанных пленках, находят применение, например, в акустоэлектронике для создания акустических фильтров СВЧ [1]. Результаты расчетов для РДС шириной $b = 25$ мкм с числом периодов $N = 20$ представлены в табл. 1 для двух значений пространственного периода $d = 0.8; 1.2$ мкм (данные значения соответствуют РДС, сформированной авторами [1] методом сканирования зонда атомного силового микроскопа в пленках ЦТС толщиной 0.2 мкм). В качестве материала жидкой поглощающей пленки-электрода использован водный раствор LiCl, обладающий низким коэффициентом температуропроводности ($0.14 \cdot 10^{-6}$ м²/с), который значительно превышает значение данного параметра для сегнетоэлектриков. Материал звукопровода ЭА модуля – плавленый кварц. В расчетах использовались следующие значения параметров [24, 25]: $A \approx 29.9 \cdot 10^{-15}$ с²/м; $v_S \approx 5.96 \cdot 10^3$ м/с; $A_S \approx 0.015 \cdot 10^{-15}$ с²/м; $\chi \approx 0.7 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $C = 300$ Дж · кг⁻¹ · К⁻¹; $\rho = 7.6 \cdot 10^3$ кг · м⁻³; $C_a = 3800$ Дж · кг⁻¹ · К⁻¹; $\rho_a = 1.05 \cdot 10^3$ кг · м⁻³; $R = 0.5$; $\Delta T = 5$ К.

Из табл. 1 видно, что мощность радиоимпульса P_G на входе пьезоизлучателей не превышает 0.1 Вт. Необходимо отметить, что мощность P_G во избежание пробоя не должна превышать порогового значения. Это особенно важно для пьезоизлучателей гигагерцового диапазона, толщина пьезослоя которых весьма мала. Пороговое значение мощности пробоя зависит от материала пьезослоя, его толщины и других параметров, что является предметом специальных исследований.

Из (1.8) и (1.9) следует, что уменьшение P_G возможно, в частности, за счет уменьшения приращения температуры ΔT . Малые значения ΔT допустимы на участках с сильной зависимостью коэрцитивного поля от температуры. Как показывают результаты исследования ЦТС [26], радикальное уменьшение ΔT возможно вблизи точки Кюри, где скорость падения коэрцитивного поля с ростом температуры максимальна.

Уменьшение мощности P_G , как следует из (1.9), возможно также путем уменьшения рабочей частоты f , длины L и коэффициента поглощения A_S

Таблица 1. Основные технологические параметры формирования РДС в пленках ЦТС

Период РДС d , мкм	Частота f , ГГц	Длительность импульса t_p , мкс	Длина звукопровода L , мкм	Эффективность преобразования η	КСВ K_{SW}	Мощность на входе в жидкий электрод P_1 , Вт	Мощность на входе излу- чателей P_G , Вт
$d = 1.2$	14.9	0.2	71	0.4	1.3	0.015	0.063
$d = 0.8$	18.3	0.09	38	0.3	1.4	0.019	0.094

в звукопроводе ЭА модуля. Кроме того, уменьшение мощности P_G возможно с помощью повышения эффективности преобразования η , уменьшения площади S , а также уменьшения потерь на отражение радиоимпульса от пьезоизлучателя (с помощью уменьшения коэффициента стоячей волны K_{SW} путем согласования импеданса).

Как видно из (1.2), уменьшение частоты f (при заданном периоде d) возможно за счет увеличения коэффициента A поглощающей пленки (путем выбора соответствующего раствора электролита, концентрации растворенного вещества и рабочей температуры).

Время релаксации температурной решетки равно $\tau_d \approx d^2/\chi$. В наших расчетах для периода $d \approx 0.8\text{--}1.2$ мкм оно составляет $\tau_d \approx 1\text{--}2$ мкс, т.е. значительно превышает длительность инвертирующего импульса t_s , которая для пленки ЦТС составляет около 50 нс. Следовательно, температурная решетка сохраняется на протяжении всего инвертирующего импульса. При этом продолжительность технологического цикла (комбинированного воздействия интерференционного и инвертирующего импульсов) по данным табл. 1 равна $t_c \approx t_p + t_s \leq 0.25$ мкс.

Оценим удлинение образца за счет теплового расширения. Для ЦТС коэффициент теплового расширения $k \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [25]. Тогда для температурной решетки с приращением температуры $\Delta T = 5 \text{ K}$ относительное удлинение равно $\Delta a/a \approx k \cdot \Delta T / 2 \approx 0.47 \cdot 10^{-5}$. Для РДС длиной $a \approx 20$ мкм (используемой в расчетах) удлинение составляет $\Delta a \approx 10^{-10}$ м. Полученная величина на четыре порядка меньше значений периода РДС, приведенных в таблице.

Таким образом, с помощью разработанной модели оценены основные технологические параметры формирования РДС применительно к Z-ориентированным пленкам ЦТС и жидким электродам на основе водного раствора LiCl. Расчеты показали, что при комнатной температуре (293 K) для формирования РДС с периодом порядка одного микрометра требуются интерферирующие упругие волны гигагерцового диапазона, для генерации которых необходимы весьма дорогостоящие ЭА модули.

Отметим, что результаты оценочных расчетов получены для малых углов преломления и в предположении, что толщина слоя жидкого электрода приблизительно равна толщине скин-слоя $\delta \approx d/8$.

Отметим также, что, как показано в [27], для создания РДС с малым пространственным периодом, в т.ч. субмикронных структур, целесообразно использовать образцы сегнетоэлектриков малой толщины (пленки), что связано с особенностями теплопереноса в тонких пленках.

Амплитуда звукового давления упругой волны спадает в e раз на расстоянии $1/\alpha$. Формула (1.2) для несущей частоты упругих волн была получена в предположении малых углов преломления (для жидкого электрода, толщиной равной $1/\alpha$). В то же время, после преломления волны на границе «звукопровод-жидкость» под углом γ проекция пройденного волной расстояния на нормаль к границе равна $\delta_0 = (1/\alpha)\cos\gamma$ («приведенный» скин-слой). В [15] для жидкого электрода, толщиной равной «приведенному» скин-слою, получены решения для несущей частоты (конструктивная дилемма частот), а также для углов преломления. Решения для углов преломления имеют следующий вид:

$$\gamma_1 = \arccos\left(1.15 \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \frac{Av^2}{12.3d}\right)\right), \quad (1.10)$$

$$\gamma_2 = \arccos\left(1.15 \cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos \frac{Av^2}{12.3d}\right)\right), \quad (1.11)$$

где v – скорость ультразвука в жидком электроде.

Соответствующие решения для частоты интерферирующих волн определяются формулами:

$$f_1 \approx \sqrt{\frac{8 \cos \gamma_1}{dA}}, \quad (1.12)$$

$$f_2 \approx \sqrt{\frac{8 \cos \gamma_2}{dA}}. \quad (1.13)$$

На основе результатов моделирования даны рекомендации по выбору частоты с учетом современного уровня развития техники ультразвуковых пьезоизлучателей высоких частот. Как видно из формул (1.12) и (1.13), для работы на более низких частотах целесообразно использовать жидкие электроды с большим значением коэффициента A частотной зависимости показателя поглощения упругих волн $\alpha = Af^2$.

Отметим, что значения «нижней» и «верхней» частот упругих волн зависят только от свойств жидких электродов и периода доменной структуры.

Таким образом, формирование РДС (с заданным периодом d) возможно в двух случаях:

- 1) на «нижней» частоте f_1 с углом преломления γ_1 (формулы (1.10), (1.12));
- 2) на «верхней» частоте f_2 с углом преломления γ_2 (формулы (1.11), (1.13)).

Полученные результаты могут быть применены при создании подобных экспериментальных установок, требующих учета современного уровня развития техники высокочастотных пьезоизлучателей.

1.2. Работа в условиях пониженных температур

Как известно, стоимость ЭА модулей резко возрастает при увеличении рабочей частоты пьезоизлучателя упругих волн. Учитывая высокую стоимость изготовления пьезоизлучателей гигагерцового диапазона, рассмотрим экономичное технологическое решение – использование ультразвуковых волн на частотах, близких к нижней границе СВЧ диапазона ($f \approx 300$ МГц). Как будет показано ниже, БИГ-технология позволяет создавать РДС с параметрами, соответствующими ключевым элементам устройств акустоэлектроники с улучшенными характеристиками [28], а также генераторов и детекторов терагерцового излучения [2].

Можно показать, что для жидкого электрода толщиной δ , равной $1/2$ толщины «приведенного» скин-слоя, т.е. $\delta = (1/2\alpha)\cos\gamma$, формулы для угла преломления и частоты f упругих волн имеют вид:

$$\gamma = \arccos\left(1.154\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\arccos\frac{Av^2}{6.15d}\right)\right), \quad (1.14)$$

$$f \approx \sqrt{\frac{4\cos\gamma}{dA}}, \quad (1.15)$$

где d – пространственный период РДС.

Решая систему уравнений (1.14), (1.15), получим формулы для расчета периода РДС и коэффициента A :

$$d \approx \frac{0.81v}{f} \sqrt{\cos\gamma / \cos(\pi - 3\arccos(0.867\cos\gamma))}, \quad (1.16)$$

$$A \approx \frac{5}{vf} \sqrt{\cos\gamma \cdot \cos(3\arccos(0.867\cos\gamma) - \pi)}. \quad (1.17)$$

Как известно, угол преломления связан с углом падения законом Снеллиуса

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{v}{v_s} \sin\beta\right). \quad (1.18)$$

С целью предотвращения разнонаправленности фазовой и групповой скоростей упругой волны целесообразно выбирать в качестве звукопровода ЭА модуля изотропный материал. Наименьшим затуханием упругих волн среди изотропных материалов обладает плавленый кварц.

Рассмотрим использование ЭА модуля из плавленого кварца ($v_s \approx 5.96 \cdot 10^3$ м/с) в сочетании с жидким электродом со скоростью ультразвука $v \approx 1.7 \cdot 10^3$ м/с. В [16] получены частотные зависимости периода d и коэффициента A жидкого электрода согласно выражениям (1.16), (1.17)

и (1.18). Зависимости периода d от частоты f представлены на рис. 4 для трех ЭА модулей: $\beta = 10^\circ$, $\beta = 12^\circ$, $\beta = 17^\circ$. Например, на частоте $f \approx 300$ МГц при угле падения $\beta \approx 17^\circ$ возможно создание РДС с периодом $d \approx 38.0$ мкм. РДС с таким периодом применяются, в частности, при изготовлении оптических параметрических генераторов ИК диапазона [29, 30]. Однако для создания РДС с таким периодом необходим соответствующий жидкий электрод. Зависимость коэффициента A жидкого электрода от частоты f представлена на рис. 5 для тех же ЭА модулей. Видно, что для создания РДС с таким периодом необходим жидкий электрод с весьма высоким значением коэффициента $A \approx 1060 \cdot 10^{-15}$ с²/м. Одной из хорошо изученных и доступных проводящих жидкостей является водный раствор хлористого лития LiCl. Однако на частоте $f \approx 300$ МГц у раствора LiCl даже при его охлаждении до $T \approx 223$ К значение коэффициента A недостаточно велико и составляет $A \leq 550 \cdot 10^{-15}$ с²/м [31]. Поэтому для создания РДС с периодом $d \leq 40$ мкм на частоте, близкой к $f \approx 300$ МГц, водный раствор LiCl неприменим.

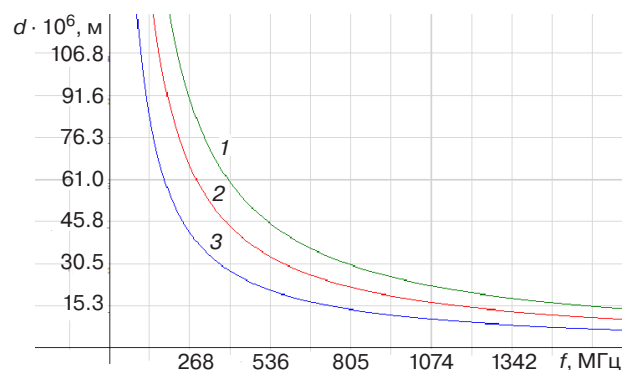


Рис. 4. Зависимость периода d от частоты f для трех значений угла падения β : (1) 10° , (2) 12° , (3) 17°

Как отмечалось выше, РДС с периодом $d \approx 40$ – 100 мкм – это ключевой элемент акустических фильтров [28], обладающих улучшенными характеристиками, а также генераторов и детекторов терагерцового излучения [2]. В [16] показано, что создание РДС с такими значениями периода РДС на частоте $f \approx 300$ МГц с жидким электродом на основе раствора LiCl возможно, однако при углах падения $\beta < 17^\circ$. Например, при $\beta \approx 10^\circ$ на данной частоте (как следует из рис. 4 и 5) период РДС составляет $d \approx 80$ мкм при использовании жидкого электрода с коэффициентом $A \approx 230 \cdot 10^{-15}$ с²/м. Указанное значение коэффициента A реализуемо при охлаждении водного раствора LiCl до температуры $T \approx 241$ К [31].

В [16] приведены также результаты моделирования для случая ЭА модуля с более высокой частотой $f \approx 670$ МГц. Показано, что на данной частоте возможно создание РДС с периодом $d \approx 16$ мкм, если

применить жидкий электрод на основе раствора LiCl при более низкой температуре $T \approx 233$ К [31].

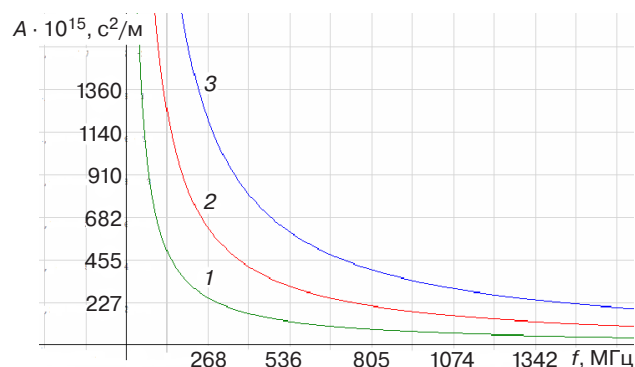


Рис. 5. Зависимость коэффициента жидкого электрода от частоты для трех значений угла падения β : (1) 10° , (2) 12° , (3) 17°

Более доступными с экономической точки зрения являются ЭА модули, работающие на более низких частотах. Например, на частоте $f \approx 270$ МГц при $\beta \approx 10^\circ$ можно создавать доменные структуры с периодом $d \approx 90$ мкм, используя жидкий электрод с коэффициентом $A \approx 250 \cdot 10^{-15} \text{ c}^2/\text{м}$ (например, водный раствор LiCl (7.7 моль) при температуре $T \approx 238$ К [31]).

Важно отметить, что с одним и тем же ЭА модулем (с фиксированным значением угла падения β) путем перестройки частоты в определенных пределах можно создавать РДС с различным периодом d , используя при этом соответствующие жидкие электроды и/или разную температуру.

2. ФОРМИРОВАНИЕ РДС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ УПРУГИХ ВОЛН И ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ RTIL

2.1. Основные параметры некоторых сильно диссипативных RTIL при комнатной температуре

В предыдущем разделе показано, что применение акустоинтерференционного метода позволяет создавать РДС при использовании жидких электродов на основе водного раствора хлористого лития. Однако предложенное технологическое решение требует охлаждения до температур 233–243 К.

В настоящем разделе исследованы возможности создания РДС при комнатной температуре на частотах вблизи $f \approx 300$ МГц с учетом новых данных об акустических свойствах жидких электродов на основе ионных жидкостей. Как известно, соли, которые плавятся при комнатной температуре, называются «Room-Temperature Ionic Liquids» (RTIL). Ниже будет показано, что использование сильно

диссипативных электропроводящих RTIL таких как, например, 1-бутил-3-метилимидазолий бис(трифторметилсульфонил)имид (синоним – $[\text{C}_4\text{mim}][\text{NTf}_2]$) и 1-гексил-3-метилимидазолий бис(трифторметилсульфонил)имид (синоним – $[\text{C}_6\text{mim}][\text{NTf}_2]$) создает благоприятные условия для формирования РДС акустоинтерференционным методом и позволяет реализовать технологическое решение [16], не прибегая к охлаждению ниже комнатных температур. Результаты применимы к таким сегнетоэлектрикам, как LiNbO_3 , KTiOPO_4 , PZT.

Рассмотрим использование жидких электродов на основе RTIL в сочетании с звукопроводом из плавленого кварца. Экспериментальная установка формирования РДС с помощью интерферирующих упругих волн описана в разделе 1.1, а также в [12]. На рис. 6 представлен фрагмент данной установки (1 – сегнетоэлектрик, 2 – звукопровод ЭА модуля, 3 – пьезоизлучатель продольных волн, 4 – жидкий электрод, 5 – +Z-поверхность сегнетоэлектрика, P_S – спонтанная поляризация, β – угол падения на границу «кварц-жидкость», γ – угол преломления, P_G – мощность на входе пьезоизлучателей).

Необходимо отметить, что в [15] толщина жидкого электрода принималась равной «приведенному» скин-слою $\delta_0 = (1/\alpha)\cos\gamma$. В то же время, с целью снижения чрезмерно высоких значений коэффициента A толщину жидкого электрода целесообразно выбирать несколько меньше, чем «приведенный» скин-слой. Эта величина должна быть приблизительно равна $1/2$ – $3/4$ толщины «приведенного» скин-слоя, т.к. более значительное уменьшение толщины может привести к снижению контрастности температурной решетки из-за отражения заметной доли энергии ультразвука от +Z-поверхности сегнетоэлектрика. Например, если принять толщину жидкого электрода равной $1/2$ толщины «приведенного» скин-слоя, т.е. $\delta = (1/2\alpha)\cos\gamma$, то выражения для угла преломления γ , частоты f , периода d и коэффициента A определяются формулами (1.14), (1.15), (1.16) и (1.17), соответственно.

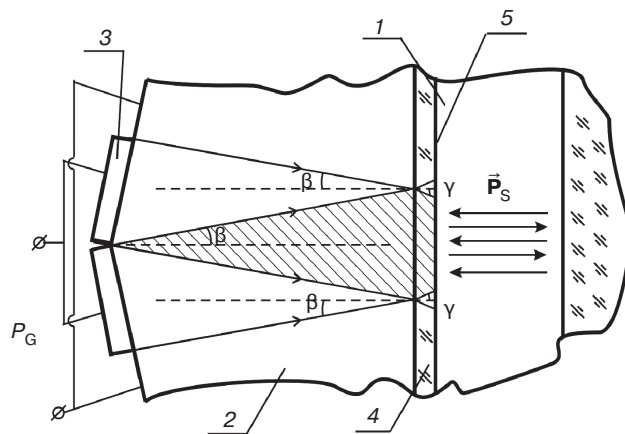


Рис. 6. Фрагмент экспериментальной установки

Таблица 2. Параметры RTIL с высокими значениями коэффициента A на частоте ультразвука $f \approx 300$ МГц при температуре 293 К

Тип RTIL	Коэффициент A , $\text{с}^2/\text{м}$	Скорость ультразвука v , м/с	Удельная проводимость σ , См/м	Источник
$[\text{C}_2\text{mim}][\text{NTf}_2]$	$450 \cdot 10^{-15}$	1260	0.9	[32]
$[\text{C}_4\text{mim}][\text{NTf}_2]$	$650 \cdot 10^{-15}$	1260	0.3	[32]
$[\text{C}_6\text{mim}][\text{NTf}_2]$	$800 \cdot 10^{-15}$	1260	0.2	[32]
$[\text{C}_4\text{C}_1\text{pyr}][\text{NTf}_2]$	$870 \cdot 10^{-15}$	1260	0.2	[33]

В табл. 2 представлены некоторые параметры четырех RTIL с высокими значениями коэффициента A при температуре 293 К [32, 33]. Из табл. 2 видно, что значения коэффициента A более чем на порядок превышают значения данного коэффициента для водного раствора хлористого лития при комнатной температуре, что позволяет, как следует из (1.15), создавать РДС на значительно более низких частотах ультразвука.

Важно отметить также, что коэффициент термодиффузии RTIL, указанных в таблице, весьма мал (более чем в два раза ниже, чем у воды) и составляет $\chi \approx 0.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Это позволяет создавать «долгоживущие» температурные решетки в жидких электродах на основе RTIL.

2.2. Результаты компьютерного моделирования формирования РДС при комнатной температуре с ионными жидкостями

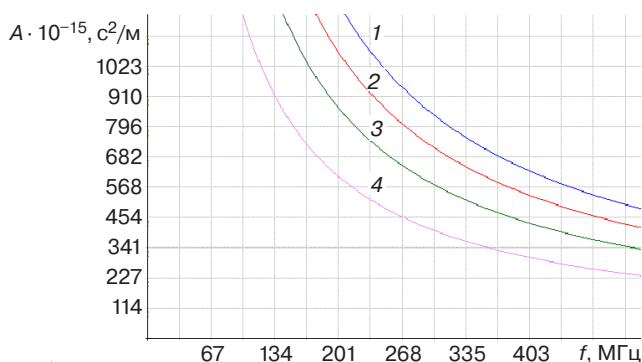
Зависимость коэффициента жидкого электрода от частоты f , согласно выражениям (1.17) и (1.18), представлена на рис. 7 для ЭА модулей с углами падения $\beta = 17^\circ, 16^\circ, 15^\circ, 14^\circ$.

Из рис. 7 видно, что для заданной частоты f при уменьшении угла падения β на границу «кварц-RTIL» требуемый коэффициент жидкого электрода уменьшается.

Анализ подкоренных выражений (1.16) и (1.17) показал, что минимально возможный угол падения на границу «кварц-RTIL» приблизительно равен $\beta \approx 13^\circ$ (для жидкостей со скоростью звука $v \approx 1260$ м/с). Для углов, равных $\beta \approx 13^\circ$ и менее, действительное решение отсутствует. При этом данное значение угла не зависит от выбора толщины жидкого электрода и зависит только от отношения v/v_s . В то же время, выбор углов падения, значительно превышающих $\beta = 17^\circ$, сопряжен (как следует из рис. 7) с необходимостью использования RTIL с весьма высоким значением коэффициента A , что не всегда возможно при комнатных температурах [32, 33].

График зависимости периода d от частоты f согласно (1.16) и (1.15) представлен на рис. 8 для тех же ЭА модулей с фиксированными углами падения $\beta = 17^\circ, 16^\circ, 15^\circ, 14^\circ$. Видно, что для ЭА модуля с фиксированной частотой f при уменьшении угла падения β на границу «кварц-RTIL» период d формируемой

РДС увеличивается. Очевидно, что выбор слишком низкой частоты ультразвука сопряжен (как следует из рис. 7) с необходимостью нахождения RTIL с весьма высоким значением коэффициента A , что, как отмечалось выше, не всегда возможно при комнатных температурах.

**Рис. 7.** Зависимость коэффициента A жидкого электрода от частоты f ультразвука для четырех значений угла β : (1) 17° , (2) 16° , (3) 15° , (4) 14°

Например, с помощью ЭА модуля, работающего на частоте $f \approx 300$ МГц, как следует из рис. 8, при угле падения $\beta \approx 15.5^\circ$ возможно создание РДС с периодом $d \approx 48$ мкм. При этом, как следует из рис. 7, для создания такой РДС необходим соответствующий жидкий электрод с коэффициентом $A \approx 650 \cdot 10^{-15} \text{ с}^2/\text{м}$. Как видно из табл. 2, в качестве такого жидкого электрода можно использовать ионную жидкость $[\text{C}_4\text{mim}][\text{NTf}_2]$ при температуре 293 К (с удельной проводимостью $\sigma \approx 0.3$ См/м). Используя другую RTIL, например, ионную жидкость $[\text{C}_6\text{mim}][\text{NTf}_2]$ (с коэффициентом $A \approx 800 \cdot 10^{-15} \text{ с}^2/\text{м}$ при той же температуре), как видно из рис. 7 и 8, на той же частоте возможно создание РДС с периодом $d \approx 42$ мкм (с углом падения $\beta \approx 16.7^\circ$).

Другие примеры создания РДС с использованием RTIL при комнатной температуре приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что на частоте $f \approx 300$ МГц с указанными RTIL диапазон разброса значений угла падения β составляет приблизительно 3 градуса.

С практической точки зрения наиболее интересным является случай, когда имеются один тип RTIL и один ЭА модуль с фиксированным углом β . В этом случае возможно создание РДС с различным периодом d путем перестройки частоты ультразвука с использованием температурных зависимостей коэффициента A , полученных в [32, 33].

Таблица 3. Оценочные значения параметров создания РДС с использованием ультразвука с частотой $f \approx 300$ МГц и некоторых RTIL при температуре 293 К

Тип RTIL	Коэффициент A , $\text{с}^2/\text{м}$	Угол падения β , град	Период РДС d , мкм	Длительность импульса t_p , мкс (для ниобата лития)
$[\text{C}_2\text{mim}][\text{NTf}_2]$	$450 \cdot 10^{-15}$	14.3	59	226
$[\text{C}_4\text{mim}][\text{NTf}_2]$	$650 \cdot 10^{-15}$	15.5	48	150
$[\text{C}_6\text{mim}][\text{NTf}_2]$	$800 \cdot 10^{-15}$	16.7	42	115
$[\text{C}_4\text{C}_1\text{pyr}][\text{NTf}_2]$	$870 \cdot 10^{-15}$	17.2	40	104

В крайнем правом столбце табл. 3 представлены оценочные значения длительности интерференционного импульса t_p , рассчитанные для ниобата лития ($\chi \approx 1.54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) по формуле (1.7). Для сегнетоэлектриков с меньшим, чем у ниобата лития, значением коэффициента термодиффузии, таких, например, как PZT [34], соответствующие значения длительности импульса t_p в несколько раз больше.

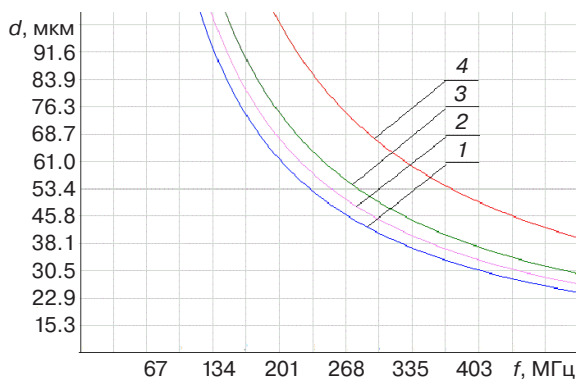


Рис. 8. Зависимость периода d от частоты f для четырех значений угла падения β :
(1) 17° , (2) 16° , (3) 15° , (4) 14°

Полученные результаты могут быть применены, например, при разработке и изготовлении акустических фильтров, обладающих улучшенными характеристиками [28], генераторов терагерцовых волн [2], а также актюаторов с гигантской деформацией [35, 36], особенно при их массовом производстве.

3. ФОРМИРОВАНИЕ РДС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СДВИГОВЫХ УПРУГИХ ВОЛН

3.1. Расчет параметров сдвиговых волн и некоторых жидких электродов в рамках ньютоновской модели жидкости

В предыдущем разделе показана эффективность использования сильно диссипативных электропроводящих жидкостей RTIL в качестве электродов при формировании РДС при комнатных температурах [37]. Важно отметить, что использование указанных жидкостей открывает более широкие возможности с точки зрения выбора типа упругих волн, т.к.

в них могут распространяться не только продольные, но и сдвиговые волны (shear waves). Особенностью сдвиговых волн является очень малая глубина их проникновения в жидкость [38]. Эта особенность может существенно повысить эффективность технологии.

Результаты, полученные в [15], показали, что высокие значения коэффициента A для жидких электродов позволяют существенно снижать частоту ультразвука. Очевидно, что использование сдвиговых волн может снижать рабочую частоту. В пользу использования сдвиговых волн указывает также следующий факт. Отражение и преломление сдвиговых волн с горизонтальной поляризацией (SH), как известно, не приводят к расщеплению волны на продольную и сдвиговую компоненты (при любых углах падения). В то же время при наклонном падении продольных волн на границу имеет место трансформация типа волны, в результате чего потери энергии могут быть значительными.

В литературе имеются многочисленные публикации по использованию продольных волн в жидкостях. Подобные исследования по использованию сдвиговых волн в жидкостях, в частности волн SH, не столь многочисленны [39, 40].

Как будет показано ниже, в некоторых проводящих жидкостях для сдвиговых волн получены гигантские значения коэффициента $A \approx (0.482-4.28) \cdot 10^{-10} \text{ с}^2/\text{м}$ при комнатных температурах. Отметим, что при формировании РДС на продольных волнах в [37] использовались ионные жидкости с коэффициентом $A \approx (0.2-0.8) \cdot 10^{-12} \text{ с}^2/\text{м}$ (т.е. на два порядка ниже).

Экспериментальная установка формирования РДС акустоинтерференционным методом с помощью упругих волн описана в разделе 1 настоящей статьи, а также в [12, 15]. В то же время, в установке, описываемой в данном разделе, используются пьезоизлучатели не продольных, а сдвиговых волн.

Амплитуда волны спадает в e раз на расстоянии $1/\alpha$. При использовании сдвиговых волн величина $1/\alpha$ – это глубина проникновения этих волн в жидкость, которую можно оценить по формуле [38]:

$$1/\alpha = \sqrt{\frac{2\eta_0}{\rho\omega}}, \quad (3.1)$$

где η_0 – вязкость жидкости на низких частотах, ρ – ее плотность, ω – круговая частота сдвиговых волн.

Например, при значениях вязкости $0.1 \text{ Па} \cdot \text{с}$, плотности 1400 кг/м^3 и частоты $f = 200 \text{ МГц}$ глубина проникновения $1/\alpha$ сдвиговой волны в жидкость весьма мала и равна 324 нм . Величину $1/\alpha$ часто называют скин-слоем. Отметим, что после преломления волны на границе «звукпровод-жидкость» под углом γ амплитуда волны спадает в e раз на расстоянии $1/\alpha$, а проекция пройденного волной расстояния на нормаль к этой границе равна $\delta_0 = (1/\alpha)\cos\gamma$ («приведенный» скин-слой).

Формула для скорости сдвиговых волн, распространяющихся в ньютоновской жидкости ($\omega\tau \ll 1$, где τ – время сдвиговой релаксации), имеет следующий вид [40]:

$$v \approx \sqrt{2\eta_0\omega/\rho}. \quad (3.2)$$

Коэффициент пропорциональности A для сдвиговых волн в жидкости легко найти, используя (3.1):

$$A \approx \sqrt{\frac{\pi\rho}{\eta_0 f^3}}. \quad (3.3)$$

Используя условие $\omega\tau \ll 1$ модели ньютоновской жидкости [40], а также значения времен сдвиговой релаксации τ жидкостей, приведенные в табл. 4, можно оценить максимальную частоту сдвиговых волн f_N используемой модели по формуле

$$f_N \approx 1/(4\pi\tau). \quad (3.4)$$

В табл. 4 приведены значения максимальной частоты f_N сдвиговых волн (модели ньютоновской жидкости), рассчитанные по формуле (3.4), а также некоторые параметры жидкостей, используемых в качестве электродов: раствора электролита $\text{LiPF}_6\text{-PC}$ и ионной жидкости 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate (синонимы: $[\text{C4mim}][\text{PF}_6]$, $[\text{bmim}][\text{PF}_6]$).

Для многих материалов на частотах, превышающих приблизительно $f \approx 300 \text{ МГц}$, звукпровод ЭА модуля имеет значительное затухание упругих волн, что требует (при прочих равных условиях) большей мощности ультразвука, а также более трудоемкой технологии изготовления пьезоизлучателей. Исходя из этого, а также удовлетворяя условию $f < f_N$ применительно к каждой жидкости, для предварительной оценки скорости сдвиговых волн v и коэффициента A выбираем частоты $f \approx 70 \text{ МГц}$ и $f \approx 300 \text{ МГц}$. Рассчитанные в рамках ньютоновской модели по формулам (3.2) и (3.3) значения скорости сдвиговых волн v и коэффициента A представлены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что для сдвиговых волн указанные жидкости имеют гигантские значения коэффициента $A \approx (0.482\text{--}4.28) \cdot 10^{-10} \text{ с}^2/\text{м}$ при комнатных температурах. Отметим также, что скорость сдвиговых волн в несколько раз ниже скорости продольных волн.

С целью определения углов падения сдвиговых волн на границу «звукпровод-жидкость» для заданных значений периода РДС, а также выработки рекомендаций по выбору частоты с учетом вышеизложенных ограничений, проведено компьютерное моделирование, результаты которого обсуждаются в следующем разделе.

3.2. Результаты компьютерного моделирования для жидких электродов на основе $[\text{C4mim}][\text{PF}_6]$ и $\text{LiPF}_6\text{-PC}$ при комнатной температуре

Математическая модель воздействия интерферирующих упругих волн на сегнетоэлектрик через слой жидкости толщиной δ , меньше полупериода РДС ($\delta \approx d/8$) и равной «приведенному» скин-слою $\delta_0 = (1/\alpha)\cos\gamma$, рассмотрена в [15].

Согласно [15], если выполняется условие

$$d \geq 0.081Av^2, \quad (3.5)$$

Таблица 4. Значения f_N и параметры жидких электродов при комнатной температуре

№	Жидкость	Вязкость η_0 , Па·с	Плотность ρ , кг/м ³	Время релаксации τ , с	f_N , МГц	Удельная проводимость σ , См/м
1	$\text{LiPF}_6\text{-PC}$ (2 моль/кг)	0.06 [41]	$1.2 \cdot 10^3$ [41]	$0.2 \cdot 10^{-9}$ [42]	400	0.2 [45]
2	$[\text{C4mim}][\text{PF}_6]$	0.27 [43]	$1.38 \cdot 10^3$ [43]	$1.1 \cdot 10^{-9}$ [44]	72	0.1 [46]

Таблица 5. Значения скорости сдвиговых волн v и коэффициента A на частотах, не превышающих максимальную частоту f_N ньютоновской модели

№	Жидкость	$f < f_N$, МГц	v , м/с	A , с ² /м
1	$\text{LiPF}_6\text{-PC}$ (2 моль/кг)	300	434.2	$0.482 \cdot 10^{-10}$
2	$[\text{C4mim}][\text{PF}_6]$	70	414.9	$2.18 \cdot 10^{-10}$
3	$\text{LiPF}_6\text{-PC}$ (2 моль/кг)	70	209.7	$4.28 \cdot 10^{-10}$

то для заданного периода РДС угол преломления и частота сдвиговых волн определяются формулами

$$\gamma = \arccos \left(1.15 \cos \left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos \frac{Av^2}{12.3d} \right) \right), \quad (3.6)$$

$$f \approx \sqrt{\frac{8 \cos \gamma}{dA}}. \quad (3.7)$$

Отметим, что скорость упругих волн v и коэффициент A , входящие в формулы (3.6), (3.7), в случае сдвиговых волн зависят от частоты согласно (3.2) и (3.3) соответственно.

Из (3.6) и (3.7), получим формулу для расчета коэффициента

$$A \approx \frac{9.92}{vf} \sqrt{\cos \gamma \cos(3 \arccos(0.867 \cos \gamma) - \pi)}. \quad (3.8)$$

Подкоренное выражение неотрицательно, если $\gamma \geq 0.0475$.

Приравняв правые части (3.3) и (3.8) и учитывая (3.2), получим уравнение для угла преломления сдвиговых волн на границе «звукпровод-жидкость»:

$$2.4927 \cos \gamma \cos(3 \arccos(0.867 \cos \gamma) - \pi) = 1.$$

Решение данного уравнения дает два значения угла преломления

$$\gamma_1 = 0.455; \gamma_2 = 1.119. \quad (3.9)$$

Угол преломления γ связан с углом падения β законом Снеллиуса (1.18).

С учетом (1.18) и (3.2) получим частотные зависимости углов падения β на границу «звукпровод-жидкость»

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \arcsin \left(v_S \sin \gamma_1 \sqrt{\frac{\rho}{4\pi\eta_0 f}} \right), \\ \beta_2 &= \arcsin \left(v_S \sin \gamma_2 \sqrt{\frac{\rho}{4\pi\eta_0 f}} \right). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Отсюда следуют условия

$$v_S \sin \gamma_1 \sqrt{\frac{\rho}{4\pi\eta_0 f}} \leq 1, \quad v_S \sin \gamma_2 \sqrt{\frac{\rho}{4\pi\eta_0 f}} \leq 1. \quad (3.11)$$

Очевидно, наибольший практический интерес представляет случай с меньшим углом падения β_1 , реализуемый на более низкой частоте, т.к. $\gamma_1 = 0.455 < \gamma_2 = 1.119$. Кроме того, для выполнения условия (3.11) на более низких частотах целесообразно использовать ЭА модуль из материала с малой скоростью v_S

сдвиговых волн. Таким материалом является, например, парателлури́т (paratellurite α -TeO₂), в котором самая низшая скорость сдвиговых волн (slowest shear sound wave) равна $v_S = 0.61 \cdot 10^3$ м/с [47]. Тогда условие (3.11) для жидкости LiPF₆-PC (2 моль/кг) выполняется при $f > f_{\min 1} \approx 113$ МГц, а для жидкости [C4mim][PF₆] – при $f > f_{\min 1} \approx 26$ МГц.

График частотной зависимости углов падения β_1 и β_2 для жидкости LiPF₆-PC (2 моль/кг) при использовании ЭА модуля на основе парателлурита представлен на рис. 9. Из рис. 9 видно, что для жидкости LiPF₆-PC (2 моль/кг) частота $f_{\min 2}$ (для углов β_2) приблизительно равна 481 МГц. Для используемой здесь ньютоновской модели формирование РДС возможно на частотах сдвиговых волн, превышающих частоту $f_{\min 1}$, но меньших максимальной частоты ньютоновской модели f_N . Поэтому интерес представляют только углы β_1 , т.к. для жидкости LiPF₆-PC (2 моль/кг) должно выполняться условие $f < f_N = 400$ МГц.

Аналогичные частотные зависимости углов падения β_1 и β_2 при использовании ЭА модуля на основе парателлурита получены также для жидкости [C4mim][PF₆]. Значения минимальных частот $f_{\min 1}, f_{\min 2}$, а также углов β_1 для указанных двух жидкостей представлены в табл. 6.

Необходимо также определить пространственный период формируемой РДС. С учетом (3.3), (3.7) и двух значений угла преломления (3.9) получим формулы для частотной зависимости периода РДС

$$d_1 = 8 \cos \gamma_1 / \sqrt{\pi \rho f / \eta_0}, \quad d_2 = 8 \cos \gamma_2 / \sqrt{\pi \rho f / \eta_0}. \quad (3.12)$$

Графики частотных зависимостей периода РДС для жидкости LiPF₆-PC (2 моль/кг), а также жидкости [C4mim][PF₆] представлены на рис. 10. Полученные зависимости позволяют определить значение периода формируемой РДС для частот, входящих в диапазон от $f_{\min 1}$ до f_N . В частности, для жидкости LiPF₆-PC (2 моль/кг) – для частот в диапазоне от $f_{\min 1} = 113$ МГц до $f_N = 400$ МГц. Для жидкости [C4mim][PF₆] – для частот в диапазоне от $f_{\min 1} = 26$ МГц до $f_N = 72$ МГц.

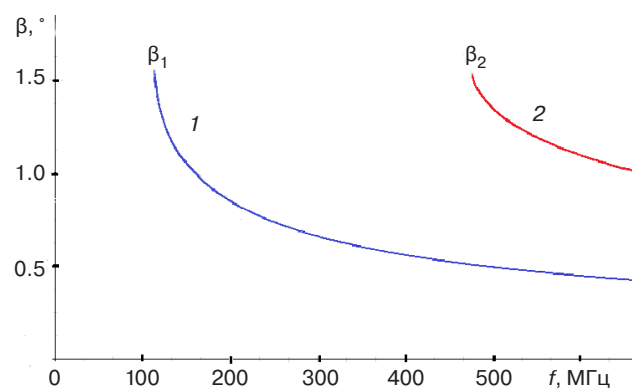
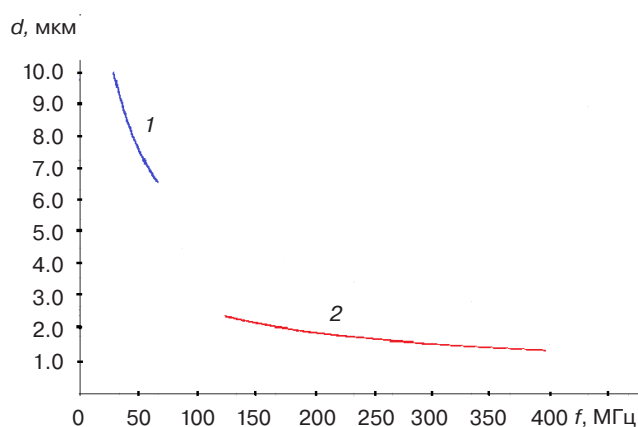


Рис. 9. Частотная зависимость углов падения β на границу «парателлури́т-жидкость» для жидкости LiPF₆-PC (2 моль/кг)

Таблица 6. Значения минимальных частот, диапазона рабочих частот Δf , угла падения β_1 и периода РДС d_1 , рассчитанные для звукопровода из α -TeO₂

№	Жидкость	$f_{\min 1}$, МГц	$f_{\min 2}$, МГц	Диапазон рабочих частот Δf , МГц	Угол падения β_1	Период РДС d_1 , мкм	f_N , МГц
1	[C4mim][PF ₆]	26	123	30–70	1.41–0.703	10.4–6.8	72
2	LiPF ₆ -PC (2 моль/кг)	113	481	125–400	1.27–0.564	2.6–1.4	400

В табл. 6 для двух жидкостей представлены результаты расчетов значений минимальных частот сдвиговых волн, диапазона рабочих частот Δf , углов падения β_1 и периода РДС d_1 (для ЭА модуля из α -TeO₂). Очевидно, что на практике диапазон рабочих частот Δf несколько меньше, чем разность $f_N - f_{\min 1}$ (т.к. рабочая частота выбирается не слишком близко к частотам $f_{\min 1}$ и f_N).

**Рис. 10.** Частотная зависимость периода РДС для жидкостей: 1 – [C4mim][PF₆]; 2 – LiPF₆-PC (2 моль/кг)

Из табл. 6 видно, что при использовании жидкого электрода на основе LiPF₆-PC (2 моль/кг) возможно формирование РДС с периодом 1.4–2.6 мкм на частотах 400–125 МГц соответственно.

Таким образом, акустоинтерференционный метод с использованием сдвиговых волн позволяет формировать РДС с весьма малым пространственным периодом при комнатной температуре с ЭА модулем из парателлурита, что является существенным преимуществом по сравнению с технологией [37], использующей продольные волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже перечислены основные результаты в области технологии формирования сегнетоэлектрических РДС с использованием интерферирующих упругих волн, полученные в РТУ МИРЭА.

1. Предложена технология формирования РДС с использованием интерферирующих упругих волн высоких и сверхвысоких частот. При этом ультразвук практически полностью поглощается в жидких электродах определенной толщины

и не проникает в сегнетоэлектрик, что исключает многократные отражения от противоположных граней, повышает контрастность акустоиндуцированной температурной решетки и придает универсальность технологии (независимость от степени акустической прозрачности сегнетоэлектрика).

2. Установлено, что с жидкими электродами на основе хлористого лития для формирования РДС с пространственным периодом несколько десятков микрон на частотах ультразвука около 300 МГц требуется охлаждение до температур 233–243 К. Установлено также, что при комнатной температуре для формирования РДС необходимы жидкие электроды с коэффициентом пропорциональности частотной зависимости показателя поглощения ультразвука на порядок больше, чем у раствора хлористого лития.
3. Показано, что использование в качестве жидких электродов таких сильно диссипативных ионных жидкостей, как [C₄mim][NTf₂] и [C₆mim][NTf₂], создает благоприятные условия для формирования РДС с малым периодом при комнатной температуре. Даны рекомендации по выбору типа ионной жидкости, значений несущей частоты, длительности и угла падения упругих волн на границу «плавленный кварц-жидкость».
4. В рамках ньютоновской модели жидкости создана математическая модель формирования РДС в условиях воздействия сдвиговых интерферирующих волн на сегнетоэлектрик через слой жидкого электрода. Даны рекомендации по выбору типа жидкого электрода, его толщины, угла падения сдвиговых волн на границу «парателлурит-жидкость», а также значений несущей частоты и длительности импульса при комнатной температуре. Для предотвращения эффекта расщепления сдвиговой волны на границе «звукопровод-жидкость» на две компоненты (продольную и сдвиговую) целесообразно использовать сдвиговые волны с горизонтальной поляризацией (SH).
5. Показано, что при одинаковой несущей частоте использование сдвиговых волн позволяет создавать РДС с пространственным периодом на порядок меньше, чем при использовании продольных волн. Например, если на продольных волнах с электродами на основе жидкости [C₆mim][NTf₂]

на частоте 300 МГц могут быть созданы РДС с периодом около 40 мкм, то на сдвиговых волнах с электродами на основе LiPF_6 -РС на той же частоте могут быть созданы РДС с периодом около 2 мкм.

6. Технология обладает рекордно малой продолжительностью технологического цикла и, в то же время, обеспечивает необходимую глубину инвертирования доменов. При этом время

формирования РДС сопоставимо с временем переключения поляризации в используемом сегнетоэлектрике. Технология может быть использована при массовом производстве устройств на основе сегнетоэлектрических РДС.

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. Sarin Kumar A.K., Paruch P., Marré D., Pellegrino L., Tybell T., Ballandras S., Triscone J.M. A novel high frequency surface acoustic wave device based on piezoelectric interdigital transducers. *Integr. Ferroelectr.* 2004;63(1):55–62. <https://doi.org/10.1080/10584580490458621>
2. Kitaeva G.K., Kovalev S.P., Naumova I.I., Tuchak A.N., Yakunin P.V., Huang Y.C., Mishina E.D., Sigov A.S. Terahertz wave generation in periodically poled lithium niobate crystals fabricated using two alternative techniques. *Laser Phys. Lett.* 2013;10(5):055404–055409. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/10/5/055404>
3. Yamada M., Nada N., Saitoh M., Watanabe K. First-order quasi-phase matched LiNbO_3 waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation. *Appl. Phys. Lett.* 1993;629(5):435–437. <https://doi.org/10.1063/1.108925>
4. Krutov V.V., Shchuka A.A., Mikhalevich V.G. Acoustic dispersive filters and acoustic microwave emitters based on ferroelectrics with spatial modulation of piezoelectric modulus. *Physics of Vibrations.* 2001;9(4):274–279.
5. Есин А.А., Ахматханов А.Р., Павел'ев В.С., Шур В.Я. Скоростная модуляция поперечно-модового состава лазерных пучков с помощью дифракционных оптических элементов на основе LiNbO_3 . *Компьютерная оптика.* 2021;45(2):222–226. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-786>
6. Крутов В.В., Сигов А.С., Шука А.А. Технология создания сегнетоэлектрических фотонных и фононных кристаллов. *Russ. Technol. J.* 2017;5(2):3–21. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-2-3-21>
7. Коханчик Л.С., Иржак Д.В. Формирование регулярных доменных структур и особенности переключения спонтанной поляризации в кристаллах танталата лития при дискретном облучении электронами. *Физика твердого тела.* 2010;52(2):285–289.
8. Volk T., Gainutdinov R., Zhang H. Domain patterning in ion-sliced LiNbO_3 films by atomic force microscopy. *Crystals.* 2017;7(5):137–145. <https://doi.org/10.3390/cryst7050137>
9. Sones C.L., Muir A.C., Ying Y.J., et al. Precision nanoscale domain engineering of lithium niobate via UV laser induced inhibition of poling. *Appl. Phys. Lett.* 2008;92(7):072905-3. <https://doi.org/10.1063/1.2884185>

REFERENCES

1. Sarin Kumar A.K., Paruch P., Marré D., Pellegrino L., Tybell T., Ballandras S., Triscone J.M. A novel high frequency surface acoustic wave device based on piezoelectric interdigital transducers. *Integr. Ferroelectr.* 2004;63(1):55–62. <https://doi.org/10.1080/10584580490458621>
2. Kitaeva G.K., Kovalev S.P., Naumova I.I., Tuchak A.N., Yakunin P.V., Huang Y.C., Mishina E.D., Sigov A.S. Terahertz wave generation in periodically poled lithium niobate crystals fabricated using two alternative techniques. *Laser Phys. Lett.* 2013;10(5):055404–055409. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/10/5/055404>
3. Yamada M., Nada N., Saitoh M., Watanabe K. First-order quasi-phase matched LiNbO_3 waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation. *Appl. Phys. Lett.* 1993;629(5):435–437. <https://doi.org/10.1063/1.108925>
4. Krutov V.V., Shchuka A.A., Mikhalevich V.G. Acoustic dispersive filters and acoustic microwave emitters based on ferroelectrics with spatial modulation of piezoelectric modulus. *Physics of Vibrations.* 2001;9(4):274–279.
5. Esin A.A., Akhmatkhanov A.R., Pavel'ev V.S., Shur V.Ya. Tunable LiNbO_3 -based diffractive optical element for the control of transverse modes of a laser beam. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics.* 2021;45(2):222–226 (in Russ.). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-786>
6. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. Techniques for formation of ferroelectric photonic and phononic crystals. *Russ. Technol. J.* 2017;5(2):3–21 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-2-3-21>
7. Kokhanchik L.S., Irzhak D.V. Formation of regular domain structures and peculiarities of switching of the spontaneous polarization in lithium tantalate crystals during discrete electron irradiation. *Phys. Solid State.* 2010;52(2):306–310. <https://doi.org/10.1134/S1063783410020137> [Original Russian Text: Kokhanchik L.S., Irzhak D.V. Formation of regular domain structures and peculiarities of switching of the spontaneous polarization in lithium tantalate crystals during discrete electron irradiation. *Fizika Tverdogo Tela.* 2010;52(2):285–289 (in Russ.).]

10. Shur V.Ya., Mingaliev E.A., Kosobokov M.S., Makaev A.V. Domain structure evolution under multiple pulse heating of lithium niobate by infrared laser. *Ferroelectrics*. 2020;560(1):79–85. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1722886>
11. Крутов В.В., Сигов А.С., Щука А.А., Косинов А.А. Технологические параметры формирования сегнетоэлектрических микро- и нанодоменных структур акустоинтерференционным методом. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2013»*. 2013. Ч. 1. С. 139–142.
12. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. Quick formation of micro- and nanodomain structures in ferroelectrics by microwave ultrasound interference. *Ferroelectrics*. 2015;476(1):69–74. <https://doi.org/10.1080/00150193.2015.998522>
13. Крутов В.В., Засовин Э.А., Михалевич В.Г., Сигов А.С., Щука А.А., Кабин Д.В. Технология создания фотонных кристаллов с помощью интерференции упругих волн СВЧ диапазона. 18-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммун. технологии». Сб. науч. статей. Севастополь, Украина: 8–12 сент. 2008 г. С. 793–794.
14. Крутов В.В., Засовин Э.А., Михалевич В.Г., Сигов А.С., Щука А.А. Биимпульсная гетеротермальная технология формирования доменных структур в сегнетоэлектриках. *Физика твердого тела*. 2012;54(5):908–910.
15. Крутов В.В., Сигов А.С., Щука А.А. Образование регулярных доменных структур в сегнетоэлектриках при воздействии однородного электрического поля и упругих волн: дилемма несущих частот. *Прикладная физика*. 2018;3:53–57. URL: <https://applphys.orion-ir.ru/appl-18/18-3/PF-18-3-53.pdf>
16. Крутов В.В., Сигов А.С., Щука А.А. Создание сегнетоэлектрических доменных структур с использованием ультразвука вблизи нижней границы СВЧ-диапазона. *Прикладная физика*. 2018;6:60–63. URL: <https://applphys.orion-ir.ru/appl-18/18-6/PF-18-6-60.pdf>
17. Shur V.Y., Rumyantsev E.L., Batchko R.G., Miller G.D., Fejer M.M., Byer R.L. Domain kinetics in the formation of a periodic domain structure in lithium niobate. *Phys. Solid State*. 1999;41(10):1681–1687. <https://doi.org/10.1134/1.1131068>
18. Huang L., Jaeger N. Discussion of domain inversion in LiNbO₃. *Appl. Phys. Lett.* 1994;65(14):1763–1765. <https://doi.org/10.1063/1.112911>
19. Кайно Г. *Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов*. М.: Мир; 1990. 652 с. ISBN 5-03-001434-9
20. Waterman P.C., Teutonico L.J. Ultrasonic double refraction in single crystals. *J. Appl. Phys.* 1957;28(2):266–270. <https://doi.org/10.1063/1.1722721>
21. Mott G. Reflection and refraction coefficients at a fluid-solid interface. *J. Acoust. Soc. Am.* 1971;50(3B):819–829. <https://doi.org/10.1121/1.1912706>
22. Ergin K. Energy ratio of the seismic waves reflected and refracted at a rock-water boundary. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1952;42(4):349–372. <https://doi.org/10.1785/BSSA0420040349>
8. Volk T., Gainutdinov R., Zhang H. Domain patterning in ion-sliced LiNbO₃ films by atomic force microscopy. *Crystals*. 2017;7(5):137–145. <https://doi.org/10.3390/cryst7050137>
9. Sones C.L., Muir A.C., Ying Y.J., et al. Precision nanoscale domain engineering of lithium niobate via UV laser induced inhibition of poling. *Appl. Phys. Lett.* 2008;92(7):072905-3. <https://doi.org/10.1063/1.2884185>
10. Shur V.Ya., Mingaliev E.A., Kosobokov M.S., Makaev A.V. Domain structure evolution under multiple pulse heating of lithium niobate by infrared laser. *Ferroelectrics*. 2020;560(1):79–85. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1722886>
11. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A., Kosinov A.A. Technological parameters of the formation of ferroelectric micro- and nanodomain structures by the acoustic interference method. In: *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction INTERMATIC 2013: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 2013. Part 1. P. 139–142.
12. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. Quick formation of micro- and nanodomain structures in ferroelectrics by microwave ultrasound interference. *Ferroelectrics*. 2015;476(1):69–74. <https://doi.org/10.1080/00150193.2015.998522>
13. Krutov V.V., Zasovin E.A., Sigov A.S., Shchuka A.A., Kabin D.V., Mikhalevich V.G. Technology for formation of photonic crystals using UHF elastic wave interference. In: *2008 CriMiCo – 18th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, Sevastopol, Crimea: 2008; 793–794*.
14. Krutov V.V., Zasovin E.A., Mikhalevich V.G., Sigov A.S., Shchuka A.A. Double pulse heterothermal technology for the formation of domain structures in ferroelectrics. *Phys. Solid State*. 2012;54(5):965–967. <https://doi.org/10.1134/S1063783412050216>
[Original Russian Text: Krutov V.V., Zasovin E.A., Mikhalevich V.G., Sigov A.S., Shchuka A.A. Double pulse heterothermal technology for the formation of domain structures in ferroelectrics. *Fizika Tverdogo Tela*. 2012;54(5):908–910 (in Russ.).]
15. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. Phenomenon of formation of regular domain structures in ferroelectrics by uniform electric field and elastic waves: the dilemma of carrier frequencies. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*. 2018;3:53–58 (in Russ.). Available from URL: <https://applphys.orion-ir.ru/appl-18/18-3/PF-18-3-53.pdf>
16. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. Creation of ferroelectric domain structures using ultrasound near the bottom of the UHF band. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*. 2018;6:60–63. Available from URL: <https://applphys.orion-ir.ru/appl-18/18-6/PF-18-6-60.pdf>
17. Shur V.Y., Rumyantsev E.L., Batchko R.G., Miller G.D., Fejer M.M., Byer R.L. Domain kinetics in the formation of a periodic domain structure in lithium niobate. *Phys. Solid State*. 1999;41(10):1681–1687. <https://doi.org/10.1134/1.1131068>
18. Huang L., Jaeger N. Discussion of domain inversion in LiNbO₃. *Appl. Phys. Lett.* 1994;65(14):1763–1765. <https://doi.org/10.1063/1.112911>

23. Крутов В.В., Сигов А.С., Щука А.А. Акустоинтерференционный метод формирования микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектриках. В сб.: *Методы создания, исследования микро-, наносистем и экономические аспекты микро-, нанoeлектроники*. IV Международная научно-техническая конференция: сборник статей. Пенза; 2013. С. 5–8.
24. Kasper G., Tamm K. Sound propagation at GHz frequencies in aqueous LiCl solutions. *J. Chem. Phys.* 1980;72(9):5279–5289. <https://doi.org/10.1063/1.439767>
25. Каллаев С.Н., Омаров З.М., Билалов А.Р., Рабаданов М.Х., Садыков С.А., Борманис К. Особенности теплофизических свойств релаксорной керамики на основе цирконата-титаната свинца. *Физика твердого тела*. 2009;51(7):1436–1438.
26. Сидоркин А.С., Нестеренко Л.П., Рябцев С.В., Сидоркин А.А. Частотная зависимость коэрцитивного поля и внутреннего поля смещения в тонких сегнетоэлектрических пленках. *Физика твердого тела*. 2009;51(7):1277–1279.
27. Крутов В.В., Сигов А.С., Щука А.А. Создание микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектрических пленках с использованием интерферирующего гиперзвука. *Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки*. 2016;469(2):173–176. <https://doi.org/10.7868/S0869565216200093>
28. Bassignot F., Haye G., Henrot F., Ballandras S., Courjon E., Lesage J.-M. New radio-frequency resonators based on periodically poled lithium niobate thin film and ridge structures. In: *2016. IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)*. 2016:16302911. <https://doi.org/10.1109/IFCS.2016.7546793>
29. Andreeva M.S., Andreeva N.P., Barashkov M.S., Mitin K.V., Shchebetova N.I., Krymskii M.I., Rogalin V.E., Akhmatkhanov A.R., Chuvakova M.A., Shur V.Ya. Optical parametric oscillator based on the periodically poled MgO:LN crystal with 4.1 μm wavelength and varied pulse duration. *Ferroelectrics*. 2016;496(1):128–134. <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1155029>
30. Myers L.E., Eckardt R.C., Fejer M.M., Byer R.L., Bosenberg W.R., Pierce J.W. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃. *J. Opt. Soc. Am. B*. 1995;12(11):2102–2111. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.12.002102>
31. Kasper G., Tamm K. Sound propagation at GHz frequencies in aqueous LiCl solutions. *J. Chem. Phys.* 1980;72(9):5279–5280. <https://doi.org/10.1063/1.439767>
32. Zorębski M., Zorębski E., Dzida M., Skowronek J., Jęzak S., Goodrich P., Jacquemin J. Ultrasonic relaxation study of 1-alkyl-3-methylimidazolium-based room-temperature ionic liquids: probing the role of alkyl chain length in the cation. *J. Phys. Chem. B*. 2016;120(14):3569–3581. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12635>
33. Zorębski E., Zorębski M., Musiał M., Dzida M. Ultrasonic relaxation spectra for pyrrolidinium bis(trifluoromethylsulfonyl)imides: A comparison with imidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imides. *J. Phys. Chem. B*. 2017;121(42):9886–9894. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b07433>
34. Malyshkina O.V., Movchikova A.A., Kalugina O.N., Daineko A.V. Determination of thermal diffusivity coefficient of thin films by thermal square wave method. *Ferroelectrics*. 2011;424(1):28–35. <https://doi.org/10.1080/00150193.2011.623637>
19. Kaino G. *Akusticheskie volny. Ustroistva, vizualizatsiya i analogovaya obrabotka signalov (Acoustic waves. Devices, visualization and analog signal processing)*. Moscow: Mir; 1990. 652 p. (in Russ.). ISBN 5-03-001434-9
[Kino G.S. *Acoustic waves. Devices, Imaging and Analog Signal Processing*. Prentice-Hall; 1988. 601 p.]
20. Waterman P.C., Teutonico L.J. Ultrasonic double refraction in single crystals. *J. Appl. Phys.* 1957;28(2):266–270. <https://doi.org/10.1063/1.1722721>
21. Mott G. Reflection and refraction coefficients at a fluid-solid interface. *J. Acoust. Soc. Am.* 1971;50(3B):819–829. <https://doi.org/10.1121/1.1912706>
22. Ergin K. Energy ratio of the seismic waves reflected and refracted at a rock-water boundary. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1952;42(4):349–372. <https://doi.org/10.1785/BSSA0420040349>
23. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. Acoustic interference method for the formation of micro- and nanodomain structures in ferroelectrics. In: *Metody sozdaniya, issledovaniya mikro-, nanosistem i ekonomicheskie aspekty mikro-, nanoelektroniki: IV Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya: sbornik statei (Methods of Creation, Research of Micro-, Nanosystems and Economic Aspects of Micro-, Nanoelectronics: IV International Scientific and Technical Conference: Collection of Papers)*. Penza; 2013. P. 5–8 (in Russ.).
24. Kasper G., Tamm K. Sound propagation at GHz frequencies in aqueous LiCl solutions. *J. Chem. Phys.* 1980;72(9):5279–5289. <https://doi.org/10.1063/1.439767>
25. Kallaev S.N., Omarov Z.M., Bilalov A.R., Rabadanov M.Kh., Sadykov S.A., Bormanis K. Specific features of the thermal physical properties of relaxor ceramics based on lead zirconate titanate. *Phys. Solid State*. 2009;51(7):1524–1526. <https://doi.org/10.1134/S106378340907052X>
[Original Russian Text: Kallaev S.N., Omarov Z.M., Bilalov A.R., Rabadanov M.Kh., Sadykov S.A., Bormanis K. Specific features of the thermal physical properties of relaxor ceramics based on lead zirconate titanate. *Fizika Tverdogo Tela*. 2009;51(7):1436–1438 (in Russ.).]
26. Sidorkin A.S., Nesterenko L.P., Ryabtsev S.V., Sidorkin A.A. Frequency dependence of the coercive field and the internal bias field in ferroelectric thin films. *Phys. Solid State*. 2009;51(7):1348–1350. <https://doi.org/10.1134/S1063783409070075>
[Original Russian Text: Sidorkin A.S., Nesterenko L.P., Ryabtsev S.V., Sidorkin A.A. Frequency dependence of the coercive field and the internal bias field in ferroelectric thin films. *Fizika Tverdogo Tela*. 2009;51(7):1277–1279 (in Russ.).]
27. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. Formation of micro- and nanodomain structures in ferroelectric films by interfering hypersound. *Doklady Physics*. 2016;61(7):332–334. <https://doi.org/10.1134/S1028335816070077>
[Original Russian Text: Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. Formation of micro- and nanodomain structures in ferroelectric films by interfering hypersound. *Doklady Akademii Nauk*. 2016;469(2):173–176 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565216200093>]

35. Li F., Wang Q., Miao H. Giant actuation strain nearly 0.6% in a periodically orthogonal poled lead titanate zirconate ceramic *via* reversible domain switching. *J. Appl. Phys.* 2017;122(7):074103–074109. <https://doi.org/10.1063/1.4997940>
36. Wang Q., Li F. A low-working-field (2 kV/mm), large-strain (>0.5%) piezoelectric multilayer actuator based on periodically orthogonal poled PZT ceramics. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018;272:212–219. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.042>
37. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. A technique for the formation of ferroelectric regular domain structures using highly dissipative electrically conductive liquids at room temperature. *Ferroelectrics*. 2020;559(1):120–127. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1722013>
38. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Fluid Mechanics*. London: Pergamon Press; 1959. § 24.
39. Greenwood M.S., Bamberger J.A. Measurement of viscosity and shear wave velocity of a liquid or slurry for on-line process control. *Ultrasonics*. 2002;39(9):623–630. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00372-4](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00372-4)
40. Kielczyński P., Pajewski W. Transmission of SH plane waves obliquely incident at a plane interface between an elastic solid and a viscoelastic liquid. *Acta Acust. United Acust.* 1990;71(1):21–27.
41. Yamaguchi T., Yonezawa T., Yoshida K., Yamaguchi T., Nagao M., Faraone A., Seki S. Relationship between structural relaxation, shear viscosity, and ionic conduction of LiPF₆/propylene carbonate solutions. *J. Phys. Chem. B*. 2015;119(51):15675–15682. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08701>
42. Yamaguchi T., Yoshida K., Yamaguchi T., Nagao M., Faraone A., Seki S. Decoupling between the temperature-dependent structural relaxation and shear viscosity of concentrated lithium electrolyte. *J. Phys. Chem. B*. 2017;121(37):8767–8773. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04633>
43. Yamaguchi T., Miyake S., Koda S. Shear relaxation of imidazolium-based room-temperature ionic liquids. *J. Phys. Chem. B*. 2010;114(24):8126–8133. <https://doi.org/10.1021/jp1024137>
44. Yamaguchi T., Nakahara E., Koda S. Quantitative analysis of conductivity and viscosity of ionic liquids in terms of their relaxation times. *J. Phys. Chem. B*. 2014;118(21):5752–5759. <https://doi.org/10.1021/jp502631q>
45. Kondo K., Sano M., Hiwara A., Omi T., Fujita M., Kuwae A., Yokoyama H. Conductivity and solvation of Li⁺ ions of LiPF₆ in propylene carbonate solutions. *J. Phys. Chem. B*. 2000;104(20):5040–5044. <https://doi.org/10.1021/jp000142f>
46. Umecky T., Kanakubo M., Makino T., Aizawa T., Suzuki A. Effect of CO₂ dissolution on electrical conductivity and self-diffusion coefficients of 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ionic liquid. *Fluid Phase Equilib.* 2013;357:76–79. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2013.05.023>
47. Ohmachi Y., Uchida N. Temperature dependence of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in TeO₂ single crystals. *J. Appl. Phys.* 1970;41(6):2307–2311. <https://doi.org/10.1063/1.1659223>
28. Bassignot F., Haye G., Henrot F., Ballandras S., Courjon E., Lesage J.-M. New radio-frequency resonators based on periodically poled lithium niobate thin film and ridge structures. In: *2016. IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)*. 2016:16302911. <https://doi.org/10.1109/IFCS.2016.7546793>
29. Andreeva M.S., Andreeva N.P., Barashkov M.S., Mitin K.V., Shchebetova N.I., Krymskii M.I., Rogalin V.E., Akhmatkhanov A.R., Chuvakova M.A., Shur V.Ya. Optical parametric oscillator based on the periodically poled MgO:LN crystal with 4.1 μm wavelength and varied pulse duration. *Ferroelectrics*. 2016;496(1):128–134. <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1155029>
30. Myers L.E., Eckardt R.C., Fejer M.M., Byer R.L., Bosenberg W.R., Pierce J.W. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃. *J. Opt. Soc. Am. B*. 1995;12(11):2102–2111. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.12.002102>
31. Kasper G., Tamm K. Sound propagation at GHz frequencies in aqueous LiCl solutions. *J. Chem. Phys.* 1980;72(9):5279–5280. <https://doi.org/10.1063/1.439767>
32. Zorębski M., Zorębski E., Dzida M., Skowronek J., Jęzak S., Goodrich P., Jacquemin J. Ultrasonic relaxation study of 1-alkyl-3-methylimidazolium-based room-temperature ionic liquids: probing the role of alkyl chain length in the cation. *J. Phys. Chem. B*. 2016;120(14):3569–3581. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12635>
33. Zorębski E., Zorębski M., Musiał M., Dzida M. Ultrasonic relaxation spectra for pyrrolidinium bis(trifluoromethylsulfonyl)imides: A comparison with imidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imides. *J. Phys. Chem. B*. 2017;121(42):9886–9894. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b07433>
34. Malysheva O.V., Movchikova A.A., Kalugina O.N., Daineko A.V. Determination of thermal diffusivity coefficient of thin films by thermal square wave method. *Ferroelectrics*. 2011;424(1):28–35. <https://doi.org/10.1080/00150193.2011.623637>
35. Li F., Wang Q., Miao H. Giant actuation strain nearly 0.6% in a periodically orthogonal poled lead titanate zirconate ceramic *via* reversible domain switching. *J. Appl. Phys.* 2017;122(7):074103–074109. <https://doi.org/10.1063/1.4997940>
36. Wang Q., Li F. A low-working-field (2 kV/mm), large-strain (>0.5%) piezoelectric multilayer actuator based on periodically orthogonal poled PZT ceramics. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018;272:212–219. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.042>
37. Krutov V.V., Sigov A.S., Shchuka A.A. A technique for the formation of ferroelectric regular domain structures using highly dissipative electrically conductive liquids at room temperature. *Ferroelectrics*. 2020;559:1:120–127. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1722013>
38. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Fluid Mechanics*. London: Pergamon Press; 1959. § 24.
39. Greenwood M.S., Bamberger J.A. Measurement of viscosity and shear wave velocity of a liquid or slurry for on-line process control. *Ultrasonics*. 2002;39(9):623–630. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00372-4](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00372-4)

40. Kielczyński P., Pajewski W. Transmission of SH plane waves obliquely incident at a plane interface between an elastic solid and a viscoelastic liquid. *Acta Acust. United Acust.* 1990;71(1):21–27.
41. Yamaguchi T., Yonezawa T., Yoshida K., Yamaguchi T., Nagao M., Faraone A., Seki S. Relationship between structural relaxation, shear viscosity, and ionic conduction of LiPF₆/propylene carbonate solutions. *J. Phys. Chem. B.* 2015;119(51):15675–15682. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08701>
42. Yamaguchi T., Yoshida K., Yamaguchi T., Nagao M., Faraone A., Seki S. Decoupling between the temperature-dependent structural relaxation and shear viscosity of concentrated lithium electrolyte. *J. Phys. Chem. B.* 2017;121(37):8767–8773. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04633>
43. Yamaguchi T., Miyake S., Koda S. Shear relaxation of imidazolium-based room-temperature ionic liquids. *J. Phys. Chem. B.* 2010;114(24):8126–8133. <https://doi.org/10.1021/jp1024137>
44. Yamaguchi T., Nakahara E., Koda S. Quantitative analysis of conductivity and viscosity of ionic liquids in terms of their relaxation times. *J. Phys. Chem. B.* 2014;118(21):5752–5759. <https://doi.org/10.1021/jp502631q>
45. Kondo K., Sano M., Hiwara A., Omi T., Fujita M., Kuwae A., Yokoyama H. Conductivity and solvation of Li⁺ ions of LiPF₆ in propylene carbonate solutions. *J. Phys. Chem. B.* 2000;104(20):5040–5044. <https://doi.org/10.1021/jp000142f>
46. Umecky T., Kanakubo M., Makino T., Aizawa T., Suzuki A. Effect of CO₂ dissolution on electrical conductivity and self-diffusion coefficients of 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ionic liquid. *Fluid Phase Equilib.* 2013;357:76–79. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2013.05.023>
47. Ohmachi Y., Uchida N. Temperature dependence of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in TeO₂ single crystals. *J. Appl. Phys.* 1970;41(6):2307–2311. <https://doi.org/10.1063/1.1659223>

Об авторах

Крутов Владислав Викторович, к.т.н., доцент, кафедра наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: v_krutov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1909-1435>

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. ResearcherID L-4103-2017, Scopus Author ID 35557510600, SPIN-код РИНЦ 2869-5663, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

About the authors

Vladislav V. Krutov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: v_krutov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1909-1435>

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

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

УДК 621.793.182
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-92-99>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ источников магнетронного распыления для осаждения толстых слоев меди с высокой скоростью для изделий микроэлектроники

М.В. Назаренко^{1, 2, @}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² ООО «РМТ», Москва, 115230 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: m.v.makarova@list.ru

Резюме

Цели. При проектировании производственного оборудования для реализации процессов осаждения металлических пленок актуальной задачей является выбор технологических источников, которые должны обеспечивать требуемое качество (структуру, внешний вид), максимальные эффективность процесса и производительность. Однако в реальных производственных условиях сделать этот выбор сложно в связи с недостаточностью сравнительных материалов источников. Лабораторные результаты нередко отличаются от результатов на производстве. Цель работы – сравнить методы магнетронного осаждения в реальных промышленных условиях (планарном протяженном магнетроне, жидкофазном магнетроне и цилиндрическом магнетроне с вращающимся катодом), выявить их преимущества, недостатки и особенности формирования металлических пленок, проанализировать экономическую целесообразность выбора каждого из них и дать практические рекомендации выбора источника при реализации требуемого процесса.

Методы. Для осаждения пленок применены методы ионного распыления в магнетронных системах. Измерение шероховатости проводилось с помощью профилометра MarSurf PS1. Структура пленок изучалась с помощью растрового электронного микроскопа Hitachi SU1510. Толщины пленок измерялись методом рентгено-флуоресцентного анализа с помощью прибора Fisherscope X-RAY XDV-SDD.

Результаты. Рассмотрены источники магнетронного распыления для скоростного осаждения слоев металлизации в промышленных условиях. Проведено сравнение полученных образцов по критериям: скорость осаждения и сохранением требуемого качества, поверхностные дефекты, размер зерна пленки, шероховатость, равномерность осажденного слоя, эффективность осаждения (отношение металла, осажденного непосредственно на подложку, к количеству выработанного металла во время процесса). Сравнение характеристик показало, что скорость осаждения для жидкофазного магнетрона соизмерима с аналогичным параметром для цилиндрического магнетрона и превосходит примерно в 4 раза скорость для классического планарного магнетрона при сохранении единого внешнего вида образцов. Самой высокой шероховатостью и самым крупным размером зерна обладают образцы, осажденные жидкофазным магнетроном. Самой низкой эффективностью распыления обладает метод жидкофазного магнетронного распыления, который является самым дешевым.

Выводы. Выбор метода осаждения зависит от решаемой задачи. Оптимальным по стоимости, скорости осаждения и качеству осаждаемых слоев можно считать магнетрон с цилиндрическим вращающимся катодом. Жидкофазное магнетронное распыление рекомендовано использовать для дешевого скоростного осаждения, при котором нет жестких требований к внешнему виду, или в случае эксплуатации малогабаритного оборудования.

Ключевые слова: магнетрон, жидкофазный магнетрон, планарный магнетрон, цилиндрический магнетрон, осаждение металлических пленок, эффективность осаждения, производительные методы, скорость осаждения, выбор метода осаждения

• Поступила: 07.02.2022 • Доработана: 07.07.2022 • Принята к опубликованию: 22.08.2022

Для цитирования: Назаренко М.В. Анализ источников магнетронного распыления для осаждения толстых слоев меди с высокой скоростью для изделий микроэлектроники. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):92–99. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-92-99>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Comparison of magnetron sputtering systems for high-rate deposition of thick copper layers for microelectronic applications

Mariia V. Nazarenko ^{1, 2, @}

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² RMT, Moscow, 115230 Russia

@ Corresponding author, e-mail: m.v.makarova@list.ru

Abstract

Objectives. When designing production equipment for the implementation of metal film deposition processes, the selection of technological sources for providing the required quality (structure, appearance), maximum process efficiency, and productivity, poses a challenging task. Since laboratory results often differ from issues faced in production processes, this choice becomes even more difficult under real production conditions due to a lack of sources for comparison. The purpose of the present work is therefore to compare magnetron deposition methods under real industrial conditions (planar extended magnetron, liquid-phase magnetron and cylindrical magnetron with a rotating cathode), identify their advantages and disadvantages along with features of thus-formed metal films, analyze the economic feasibility of each variant, and give practical recommendations for selecting a source when implementing the described process.

Methods. Films were deposited using magnetron sputtering system. Roughness was measured using a MarSurf PS1 profilometer. The structure of the films was studied using a Hitachi SU1510 scanning electron microscope. Film thicknesses were measured by X-ray fluorescence analysis using a Fisherscope X-RAY XDV-SDD measuring instrument.

Results. Sources of magnetron sputtering for the high-rate deposition of metallization layers under industrial conditions are considered. Obtained samples were compared according to the following criteria: deposition rate while maintaining the required quality, surface defects, film grain size, roughness, uniformity of the deposited layer, deposition efficiency (the ratio of the metal deposited directly onto the substrate to the amount of metal produced during the process). A comparison of the characteristics showed that the deposition rate for the liquid-phase magnetron is commensurate with the similar parameter for the cylindrical magnetron, exceeding the rate for the

classical planar magnetron by about 4 times while maintaining the uniform appearance of the samples. The samples deposited with a liquid-phase magnetron had the highest roughness and the largest grain size. Although the cheapest method, liquid-phase magnetron sputtering achieved the lowest sputtering efficiency.

Conclusions. The choice of the deposition method depends on the problem to be solved. The rotatable magnetron system can be considered optimal in terms of cost, deposition rate, and quality of the deposited layers. Liquid-phase magnetron sputtering is recommended for low-cost high-speed deposition where there are no strict requirements for appearance, or in case of operation of small-sized equipment.

Keywords: magnetron, liquid phase magnetron, planar magnetron, rotatable magnetron, metal film deposition, deposition efficiency, productive methods, deposition rate, choice of deposition method

• Submitted: 07.02.2022 • Revised: 07.07.2022 • Accepted: 22.08.2022

For citation: Nazarenko M.V. Comparison of magnetron sputtering systems for high-rate deposition of thick copper layers for microelectronic applications. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):92–99. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-92-99>

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

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В быстро развивающейся сфере микроэлектроники постоянно повышаются требования к создаваемым устройствам, неотъемлемой частью которых стали платы на керамическом основании с проводящим медным слоем. Медные проводящие слои на керамических подложках используются в таких устройствах, как коммутационные платы, термоэлектрические модули, силовые диоды, силовые транзисторы и интегральные схемы [1–6]. Возрастают требования к качеству и надежности изделий, их габаритам и внешнему виду, производительности и себестоимости, что, в свою очередь, изменяет требования к материалам и технологическим процессам изготовления отдельных элементов изделий. Это ведет, в т.ч. к необходимости поиска более производительных методов осаждения металлизационных покрытий (медь, алюминий, титан и др.) по сравнению с применяющимися традиционно.

Однако выбор оптимального метода затруднителен, т.к. в литературе отсутствует анализ по таким критериям сравнения, как шероховатость поверхности, размер зерна, структура поверхности, скорость осаждения, стоимость осажденного слоя.

Целью данной работы является анализ методов осаждения проводящих слоев по обозначенным выше критериям на примере медных слоев.

СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ

На сегодняшний день наиболее высокими скоростями осаждения и при этом удовлетворительным качеством осаждаемых покрытий среди методов магнетронного распыления обладают методы:

- ионного распыления в магнетронных системах с жидкой мишенью (жидкофазного магнетронного распыления, ЖФМР) [6–9] (рис. 1а);

- с протяженной планарной мишенью [10] (рис. 1б);
- с цилиндрической вращающейся мишенью [11, 12] (рис. 1в).

Под высоким качеством покрытия понимается покрытие с минимальным количеством поверхностных дефектов (капельная фаза, различные вкрапления, кратеры) и с минимальным количеством внутренних дефектов (поры), но при этом – с адгезией, достаточной для обеспечения работоспособности изделия.

В табл. 1 для сравнения приведены значения скорости осаждения описанными методами. Данные получены экспериментально. Расстояние от поверхности магнетрона до подложек – 100 мм. В качестве подложек использовался нитрид алюминия (AlN) с шероховатостью $Ra = 10$ нм.

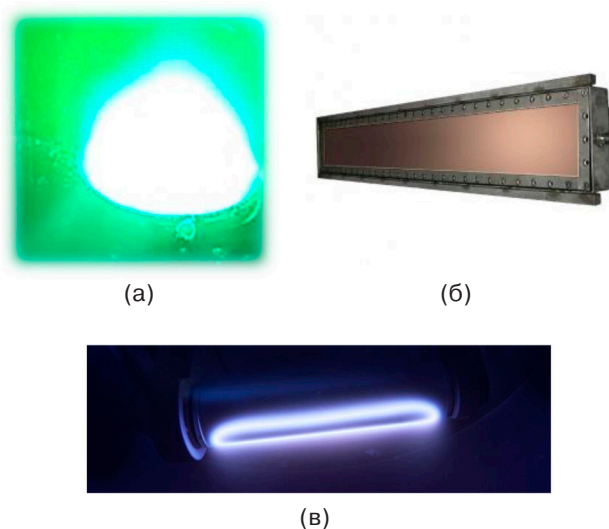


Рис. 1. Внешний вид технологических источников: (а) жидкофазный магнетрон, (б) планарный протяженный магнетрон, (в) цилиндрический магнетрон с вращающимся катодом [7]

Таблица 1. Сравнение максимально достигнутых скоростей осаждения на неподвижную подложку

Система магнетронного распыления	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
Скорость осаждения	40 мкм/мин	10 мкм/мин	41 мкм/мин

Таблица 2. Сравнение шероховатости поверхности

Номер образца	Система магнетронного распыления		
	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
1	68	31	51
2	70	28	44
3	98	26	51
4	89	29	42
Среднее значение	81	28	42

Таблица 3. Размер зерна медной поверхности

Размер зерна, мкм	Система магнетронного распыления		
	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
Минимальный	3	3	3
Максимальный	20	6	11

Для протяженного планарного магнетрона из-за его перегрева нельзя достигнуть такой же удельной мощности на катоде при сохранении необходимого качества осаждаемых пленок, как при цилиндрическом магнетроне с вращающейся мишенью. Этим объясняется такая разница в скоростях осаждения.

Как видно из табл. 1, методы осаждения с жидкой и с цилиндрической вращающейся мишенями имеют сопоставимые результаты. Классический магнетрон с протяженной планарной мишенью не обеспечивает таких высоких скоростей.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Значения шероховатости медной поверхности (R_a , нм), которая измерялась с помощью профилометра MarSurf PS1 (Mahr GMBH, Германия), представлены в табл. 2.

Как видно, самой низкой шероховатостью обладает классический магнетрон с протяженной планарной мишенью, что объясняется невысокой скоростью осаждения. Метод с вращающейся цилиндрической мишенью имеет шероховатость в 1.5 раза выше. Метод с жидкой мишенью имеет шероховатость

почти в 4 раза выше, что может стать критичным для некоторых производственных задач [13–15]¹.

СТРУКТУРА ПЛЕНОК

Структура поверхности и размер зерна представлены на рис. 2. Исследования проведены на растровом электронном микроскопе Hitachi SU1510 (HITACHI, Япония). Размер зерна указан в табл. 3.

Самым мелким зерном обладает классическое распыление с планарной протяженной мишенью. Всего лишь в 2 раза больше размер зерна, обеспечиваемый магнетроном с цилиндрической вращающейся мишенью. Самым большим зерном обладает метод с жидкой мишенью, что говорит о высоком тепловом воздействии на подложку со стороны технологического источника. При снижении скорости осаждения на неподвижную подложку до 20 мкм/мин на магнетроне с вращающимся цилиндрическим катодом достигается размер зерна до 4 мкм, что соизмеримо с размером зерна, достигнутыми на планарном магнетроне с протяженной мишенью. Однако скорость осаждения при этом у цилиндрического магнетрона выше.

¹ Печатные платы: Справочник: в 2 кн.; под ред. К.Ф. Кумбза. М.: Техносфера; 2018. Кн. 1. 1016 с. [Pechatnye platy: Spravochnik: v 2 kn. (Printed circuit boards: Handbook: in 2 books). Moscow: Tekhnosfera; 2018. Book 1. 1016 p. (in Russ).]

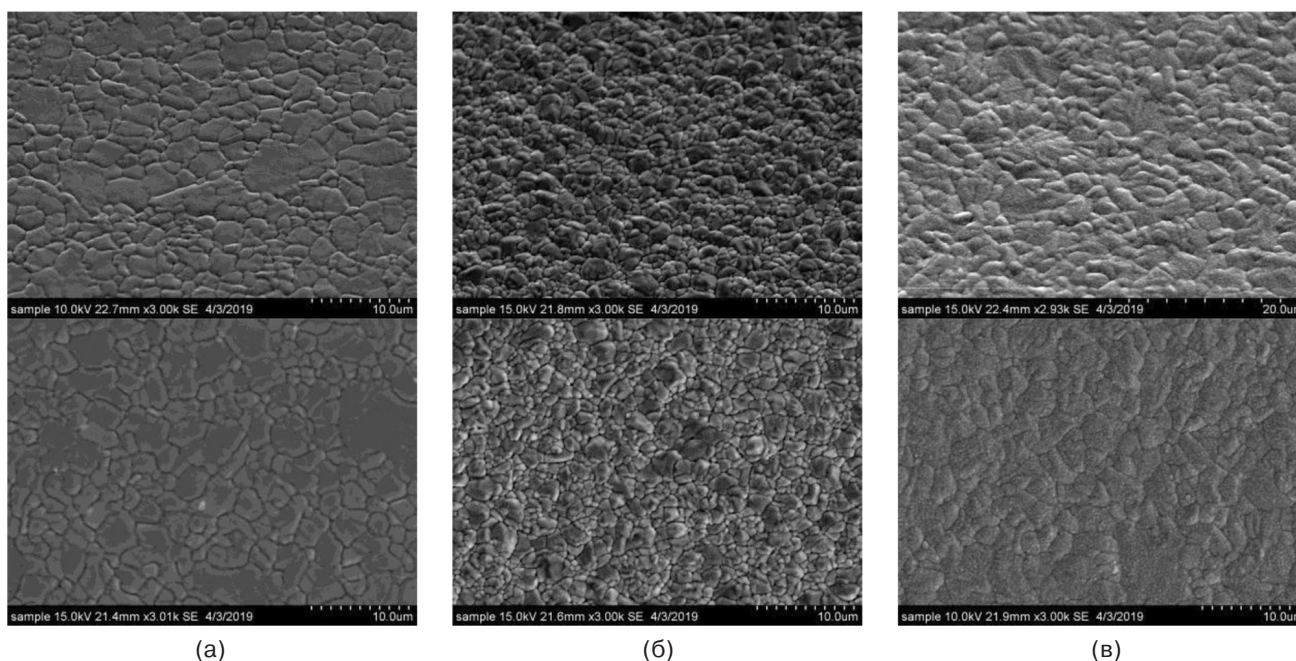


Рис. 2. Вид поверхности, осажденной с помощью: (а) метода ЖФМР, (б) планарного магнетрона с протяженной мишенью, (в) магнетрона с цилиндрической вращающейся мишенью

Таблица 4. Результаты оценки эффективности использования материала

Параметр	Система магнетронного распыления		
	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
Доля осажденного на подложки материала, %	~20	~60	~90
Выработка материала «мишеней», %	~90–100	~45	~70
Эффективность, %	20	27	63

РАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ ОСАЖДЕННОГО СЛОЯ

Измерение толщины медного покрытия проводилось на рентгенофлуоресцентном толщиномере Fisherscope X-RAY XDV-SDD (Fischer GMBH, Германия)². Сканирование проводилось в центре и по периметру подложки с отступом 3 мм от края. Оценка неравномерности показала, что методы распыления с жидкой мишенью и классический протяженный планарный магнетрон имеют неравномерность слоя не более $\pm 5\%$, в то время как магнетрон с цилиндрической вращающейся мишенью – не более $\pm 3\%$.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСПЫЛЕНИЯ

Коэффициент использования материала оценивался следующим образом: доля выработанного из мишени материала за цикл ее жизни умножалась на величину доли материала, который осаждался на подложки. Для перевода в проценты коэффициент умножен на 100%. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Как показали расчеты, наиболее эффективным по распылению является магнетрон с жидкой мишенью.

Оценка стоимости осажденного слоя толщиной 50 мкм проводилась с учетом стоимости материала и эффективности распыленного слоя (табл. 5). За базу взята средняя стоимость по рынку гранулированной вакуум-плавленной меди – X . Стоимости

² Дулов Е.Н., Ивойлов Н.Г. *Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ: учебно-методическое пособие для студентов физического факультета*. Казань: Издательство Казанского государственного университета, 2008. 50 с. [Dulov E.N., Ivoilov N.G. *X-ray spectral fluorescence analysis: teaching book for students of the Faculty of Physics*. Kazan: Kazan State University Press; 2008. 50 p. (in Russ.).]

Таблица 5. Оценка стоимости осаждения слоя толщиной 50 мкм

Параметр	Система магнетронного распыления		
	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
Максимальная нагрузка подложек в одном процессе размером 60 × 48 мм	20	70	80
Количество процессов на одной мишени, шт.	150 гр. (загрузка в виде гранул на 1 процесс)	5	40
Стоимость мишени (примерная), у.е.	1 кг – X	1 шт. – 4.5X	1 шт. – 29X
Стоимость осажденного слоя на одну подложку, у.е.	~X/131	~X/80	~X/111

планарной и цилиндрической вращающейся мишени даны в коэффициентах относительно базовой стоимости X условных единиц (у.е.).

Несмотря на низкую эффективность осаждения, самым экономически выгодным является магнетрон с жидкой мишенью в силу отсутствия необходимости изготовления мишени сложной формы. Вопреки высокой стоимости мишени за счет своей повышенной эффективности к нему близок по стоимости «осажденного слоя» магнетрон с вращающейся цилиндрической мишенью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы пленки меди, полученные методами магнетронного распыления с помощью цилиндрического магнетрона, планарного протяженного магнетрона и жидкофазного магнетрона. Проведенное сравнение методов осаждения по критериям «скорость осаждения покрытия», «структура покрытия и поверхностные дефекты», «шероховатость», «равномерность осажденного слоя», «эффективность распыления» и «экономическая целесообразность» показало, что не существует одного универсального метода, который давал бы лучшие характеристики по всем этим параметрам. Например, оптимальным по стоимости осаждения

является метод жидкофазного магнетронного распыления, относительная стоимость осажденного слоя которого составляет X/131 у.е. против X/111 у.е. в случае цилиндрического магнетронного распыления и X/80 у.е. в случае планарного протяженного магнетрона. Но при этом метод ЖФМР проигрывает цилиндрическому магнетронному распылению по критериям структуры поверхности (шероховатости, размеру зерна и поверхностным дефектам). Скорости их осаждения соизмеримы и составляют около 40 мкм/мин в описанных условиях.

При выборе метода осаждения покрытий необходимо четко понимать решаемую задачу, а именно, требования к производительности, к качеству покрытия (к структуре и дефектам), к себестоимости. Оптимальным по стоимости осажденного слоя, скорости осаждения и качеству осаждаемых слоев можно считать магнетрон с цилиндрическим вращающимся катодом. Однако из-за больших габаритов таких источников он не может быть применен для малогабаритных вакуумных камер. ЖФМР рекомендовано использовать для дешевого скоростного осаждения, в т.ч. при небольших габаритах вакуумной камеры. При кажущейся оптимальности метод осаждения с применением протяженных планарных магнетронных систем проигрывает ЖФМР и цилиндрическим магнетронам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдинцев В. Развитие мировой микроэлектроники. Новое в стратегии. Часть II. *Электроника: Наука. Технология. Бизнес*. 2008;4:108–113. URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/413>
2. Громов Г.Г. Объемные и тонкопленочные термоэлектрические модули. *Компоненты и технологии*. 2014;9(158):87–92. URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/15887.pdf>
3. Parashchuk T., Sidorenko N., Ivantsov L., Sorokin A., Maksymuk M., Dzundza B., Dashevsky Z. Development of a solid-state multi-stage thermoelectric cooler. *J. Power Sources*. 2021;496:229821. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229821>
4. Lavrentev M.G., Drabkin I.A., Ershova L.B., Volkov M.P. Improved extruded thermoelectric materials. *J. Electron. Mater.* 2020;49:2937–2942. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07988-0>
5. Dashevsky Z., Skipidarov S. Investigating the performance of bismuth-antimony telluride. In: Skipidarov S., Nikitin M. (Eds.). *Novel Thermoelectric Materials and Device Design Concepts*. 1st ed. Springer, Cham; 2019. P. 3–21. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12057-3_1
6. Moiseev K.M., Nazarenko M.V. Use of magnetron sputtering with liquid target in manufacturing of electronic components for spacecraft. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2171(1):170010. <https://doi.org/10.1063/1.5133321>
7. Макарова М.В., Моисеев К.М. Проблемы формирования толстых слоев олова методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018;1(73). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1717>
8. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Юрьева А.В. Анализ возможностей магнетронных распылительных систем для высокоскоростного осаждения функциональных покрытий. *Современные технологии, экономика и образование: сборник материалов II Всероссийской научно-методической конференции*. Томск: Изд-во ТПУ; 2020. С. 51–52.
9. Kouptsov A.D., Vasiliev D.D., Sidorova S.V., Moiseev K.M. Design of a liquid-phase magnetron sputtering small-sized source for the vacuum coating system MVTU-11-1MS. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1799(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1799/1/012016>
10. Shandrikov M.V., et al. Deposition of Cu-films by a planar magnetron sputtering system at ultra-low operating pressure. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125600. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125600>
11. Agrawal S. Development of rotatable magnetron. In: *33rd National Symposium on Plasma Science & Technology (PLASMA 2018)*: Abstract Book. 2018. P. 172–173. URL: <http://www.pssi.in/documents/Abstract%20Book@Plasma%202018.pdf>
12. Gudmundsson J.T., Lundin D. Introduction to magnetron sputtering. In: *High Power Impulse Magnetron Sputtering*. Elsevier; 2020. P. 1–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812454-3.00006-1>
13. Беляков С. Сборка микросхем в России: реальность и перспективы. *Компоненты и технологии*. 2014;5:185–187. URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/154185.pdf>

REFERENCES

1. Yuditsev V. Global microelectronics development. New strategies. Part II. *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes = Electronics: Science. Technology. Business*. 2008;4:108–113 (in Russ.). Available from URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/413>
2. Gromov G.G. Volumetric and thin-film thermoelectric modules. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2014;9(158):87–92 (in Russ.). Available from URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/15887.pdf>
3. Parashchuk T., Sidorenko N., Ivantsov L., Sorokin A., Maksymuk M., Dzundza B., Dashevsky Z. Development of a solid-state multi-stage thermoelectric cooler. *J. Power Sources*. 2021;496:229821. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229821>
4. Lavrentev M.G., Drabkin I.A., Ershova L.B., Volkov M.P. Improved extruded thermoelectric materials. *J. Electron. Mater.* 2020;49:2937–2942. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07988-0>
5. Dashevsky Z., Skipidarov S. Investigating the performance of bismuth-antimony telluride. In: Skipidarov S., Nikitin M. (Eds.). *Novel Thermoelectric Materials and Device Design Concepts*. 1st ed. Springer, Cham; 2019. P. 3–21. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12057-3_1
6. Moiseev K.M., Nazarenko M.V. Use of magnetron sputtering with liquid target in manufacturing of electronic components for spacecraft. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2171(1):170010. <https://doi.org/10.1063/1.5133321>
7. Makarova M.V., Moiseev K.M. The problems of thick tin layers formation by ion sputtering in magnetron systems in target vapors. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2018;1(73) (in Russ.). <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1717>
8. Bleikher G.A., Krivobokov V.P., Yur'eva A.V. Analysis of the capabilities of magnetron sputtering systems for high-rate deposition of functional coatings. In: *Sovremennye tekhnologii, ekonomika i obrazovanie: sbornik materialov II Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii (Modern Technologies. Economics and Education: Collection of materials of the Second All-Russian Scientific and Methodological Conference)*. Tomsk: TPU; 2020. P. 51–52 (in Russ.).
9. Kouptsov A.D., Vasiliev D.D., Sidorova S.V., Moiseev K.M. Design of a liquid-phase magnetron sputtering small-sized source for the vacuum coating system MVTU-11-1MS. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1799(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1799/1/012016>
10. Shandrikov M.V., et al. Deposition of Cu-films by a planar magnetron sputtering system at ultra-low operating pressure. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125600. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125600>
11. Agrawal S. Development of rotatable magnetron. In: *33rd National Symposium on Plasma Science & Technology (PLASMA 2018)*: Abstract Book. 2018. P. 172–173. Available from URL: <http://www.pssi.in/documents/Abstract%20Book@Plasma%202018.pdf>
12. Gudmundsson J.T., Lundin D. Introduction to magnetron sputtering. In: *High Power Impulse Magnetron Sputtering*. Elsevier; 2020. P. 1–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812454-3.00006-1>

14. Сobotka С., Херрманн Р. Интеллектуальный транспорт XXI века. *Силовая электроника*. 2010;1:12–15. URL: https://power-e.ru/wp-content/uploads/2010_1_12.pdf
15. Макарова М.В., Моисеев К.М. Свойства медных пленок, полученных методом жидкофазного магнетронного распыления. *12-я Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технологии»*: Сборник публикаций. 2017. 5 с.
13. Belyakov S. Microchip assembly in Russia: reality and prospects. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2014;(5):185–187 (in Russ). Available from URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/154185.pdf>
14. Sobotka S., Herrmann R. Intelligent transport of the 21st century. *Silovaya elektronika = Power Electronics*. 2010;1:12–15 (in Russ). Available from URL: https://power-e.ru/wp-content/uploads/2010_1_12.pdf
15. Makarova M.V., Moiseev K.M. Properties of copper films obtained by liquid-phase magnetron sputtering. In: *12-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologii."* Sbornik publikatsii (*12st International Scientific and Technical Conference "Vacuum technology, materials and technologies."* Collection of publications). 2017. 5 p. (in Russ).

Об авторе

Назаренко Мария Владимировна, аспирант, кафедра нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); ведущий инженер-технолог, ООО «PMT» (115230, Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 46). E-mail: m.v.makarova@list.ru. SPIN-код РИНЦ 2797-9450, <https://orcid.org/0000-0003-1707-8587>

About the author

Mariia V. Nazarenko, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Leading Process Engineer, RMT (46, Varshavskoe sh., Moscow, 115230 Russia). E-mail: m.v.makarova@list.ru. RSCI SPIN-code 2797-9450, <https://orcid.org/0000-0003-1707-8587>

Аналитическое приборостроение и технологии
Analytical instrument engineering and technology

УДК 551.46.086
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Измерение капиллярных волн лазерным волнографом

В.В. Стерлядкин, К.В. Куликовский [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Капиллярные волны на морской поверхности играют важную роль в задачах дистанционного зондирования как в оптическом, так и в микроволновом диапазонах длин волн. Однако исследовать процессы рассеяния электромагнитного излучения на взволнованной морской поверхности можно только при надежном контроле параметров этих капиллярных волн в натуральных условиях. До настоящего времени не существовало методов измерения капиллярных волн в натуральных условиях. Целью настоящей работы являлось создание таких методов и их проверка в лабораторных и натуральных условиях.

Методы. В лаборатории были отработаны новые лазерные методы регистрации капиллярных волн на частотах до 100 Гц. Предложенные методы являются дистанционными, не искажающими поверхность. Они основаны на регистрации рассеянного лазерного излучения с помощью видеокамеры.

Результаты. В лабораторных условиях получены пространственные профили, временные зависимости высот для всех точек траектории лазерной развертки, частотные спектры мощности. Показано, что уклоны в капиллярных волнах могут достигать 30°, а амплитуда капиллярных волн на частотах выше 25 Гц не превышает 0.5 мм. В натуральных условиях на морской платформе апробирована новая версия сканирующего лазерного волнографа. Измерения подтвердили возможность измерения параметров морского волнения на пространственных масштабах, охватывающих 3 порядка: от единиц миллиметров до единиц метров.

Выводы. Созданный волнограф позволяет проводить прямые измерения «мгновенных» профилей морской поверхности с временной синхронизацией в 10^{-4} с и пространственной точностью лучше 0.5 мм. Метод позволяет получать большие ряды (21 000) «мгновенных» профилей волнения с частотой обновления 60 Гц, что открывает возможности для исследования физики эволюции волнения, влияния параметров волнения на рассеяние электромагнитных волн. Достоинством метода является прямой характер измерения аппликат и всех характеристик волнения не только во времени, но и в пространстве. Метод полностью дистанционен, не искажает свойства поверхности, не подвержен влиянию ветра, волн и морского течения. Экспериментально в натуральных условиях доказана возможность применения предложенного метода в любое время суток и в широком диапазоне погодных условий.

Ключевые слова: альтиметрия, спектр морского волнения, капиллярные волны, взаимодействие атмосферы и океана, лазерный волнограф, дистанционное зондирование

• Поступила: 03.02.2022 • Доработана: 11.07.2022 • Принята к опубликованию: 02.09.2022

Для цитирования: Стерлядкин В.В., Куликовский К.В. Измерение капиллярных волн лазерным волнографом. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):100–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Measurement of capillary waves with a laser wave recorder

Viktor V. Sterlyadkin, Konstantin V. Kulikovsky [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Capillary waves on the sea surface play an important role in remote sensing, both in the optical and microwave wavelength ranges. However, processes of electromagnetic radiation scattering on a rough sea surface cannot be studied in the absence of reliable monitoring of the parameters of these capillary waves under natural conditions. Therefore, the aim of the present work was to develop methods for such monitoring purposes and test them under laboratory and field conditions.

Methods. Novel laser-based methods for recording capillary waves at frequencies up to 100 Hz were developed in the laboratory. The proposed remote methods, which do not interfere with the sea surface, are based on the recording of scattered laser radiation using a video camera.

Results. Under laboratory conditions, spatial profiles, time dependences of heights for all points of a laser sweep trajectory, and frequency power spectra were obtained. It is shown that slopes in capillary waves can reach 30° and that the amplitude of capillary waves at frequencies above 25 Hz does not exceed 0.5 mm. A new version of a scanning laser wave recorder was tested under natural conditions on an offshore platform. The measurements confirmed the possibility of measuring the parameters of sea waves on spatial scales covering 3 orders of magnitude: from units of millimeters to units of meters.

Conclusions. The developed wave recorder can be used to carry out direct measurements of “instantaneous” sea surface profiles with a time synchronization precision of 10^{-4} s and a spatial accuracy of better than 0.5 mm. The method makes it possible to obtain large series (21000) of «instantaneous» wave profiles with a refresh rate of 60 Hz, which opens up opportunities for studying the physics of wave evolution and the influence of wave parameters on the scattering of electromagnetic waves. The advantage of the method is the direct nature of the measurement of applicates and other wave characteristics not only in time but also in space. The entirely remote method does not distort the properties of the surface and is not affected by wind, waves, or sea currents. The possibility of using the proposed method under natural conditions at any time of the day and in a wide range of weather conditions has been experimentally ascertained.

Keywords: altimetry, spectrum of sea waves, capillary waves, atmosphere-ocean interaction, laser wave recorder, remote sensing

• Submitted: 03.02.2022 • Revised: 11.07.2022 • Accepted: 02.09.2022

For citation: Sterlyadkin V.V., Kulikovsky K.V. Measurement of capillary waves with a laser wave recorder. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):100–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Капиллярные волны играют принципиально важную роль в задачах рассеяния электромагнитных волн на взволнованной морской поверхности и при решении обратных задач дистанционного зондирования Земли из космоса. Влияние капиллярных волн каждый может наглядно наблюдать над

спокойной водной акваторией: в случае появления ветровых порывов поверхность покрывается мелкой рябью, изменяет свой цвет и темнеет за счет роста коэффициента поглощения. Аналогичные эффекты резкого роста коэффициента поглощения при появлении капиллярных волн наблюдаются не только в оптическом, но и микроволновом диапазоне длин волн. По этой причине капиллярные волны нередко

оказываются определяющим фактором в задачах восстановления метеопараметров атмосферы и подстилающей поверхности по радиотепловым и оптическим измерениям Земли с космических аппаратов. В связи с этим исследование детальной связи параметров капиллярных волн с рассеивающими характеристиками морской поверхности является важной фундаментальной и прикладной задачей. Трудность проведения таких исследований заключается в том, что до последнего времени фактически не существовало прямых методов дистанционного определения параметров капиллярных волн в натурных условиях. Для измерения параметров гравитационных волн нередко используются дистанционные методы зондирования из-под воды по акустическим отражениям или по преломлению лазерного луча [1, 2]. Но данные измерения не позволяют регистрировать капиллярные волны. При проведении измерений с морских платформ или самолетов используют методы лазерной альтиметрии. Однако пространственное разрешение в этих случаях либо отсутствует [3] (одноточечные измерения), либо составляет единицы сантиметров [4, 5]. Эти методы также не дают возможность регистрировать капиллярные волны, амплитуда которых составляет доли миллиметров. Следует отметить дистанционные методы измерения параметров волнения, основанные на стереосъемке [6]. Однако эти методы не являются прямыми, и их чувствительность не позволяет измерять параметры капиллярных волн.

Имеется значительное количество публикаций по измерениям искусственных капиллярных волн в бассейнах. Хороший анализ данных методов дан в работах [7, 8]. Общим недостатком измерений в бассейнах является наличие резонансных краевых эффектов, которые искажают результаты. Теория турбулентности гравитационных и капиллярных волн развита во многих работах¹ [9–13], однако нам не удалось найти результаты исследований, где в натурных условиях проводились бы дистанционные пространственно-временные измерения характеристик капиллярных волн.

Настоящая работа направлена на создание дистанционного лазерного метода, позволяющего проводить измерения волнения от гравитационных до капиллярных масштабов. В результате

исследований был создан макет лазерного волнографа, который прошел испытания как в лабораторных, так и в натурных условиях. В работе приводится описание способа и результаты измерений.

В предыдущих работах [14, 15] нами были предложены новые лазерные методы измерений «мгновенной» формы взволнованной морской поверхности. Основой методов является лазерное сканирование водной поверхности с регистрацией на видеокамеру траектории луча на границе раздела. При этом проводится синхронизация начала развертки луча с началом записи изображения на матрицу видеокамеры. Данные методы позволили дистанционно определять детальную структуру всех видов гравитационных и гравитационно-капиллярных волн в широком диапазоне метеоусловий. Достигнутая точность метода по измерению высоты поверхности раздела составила 1 мм, а точность привязки всей траектории к единому моменту времени составляла 10^{-4} с. Экспериментальная проверка разработанных методов в натурных условиях показала, что для измерения чисто капиллярной составляющей волнения требуется их модернизация. Во-первых, капиллярная составляющая волнения становится существенной для частот выше 16 Гц, поэтому традиционная частота видеосъемки в 25 Гц не позволяла их регистрировать. Как минимум частота регистрации профилей должна быть вдвое больше. Во-вторых, амплитуда капиллярных волн имеет масштаб сравнимый или меньший, чем 1 мм, следовательно, чувствительность метода, с помощью которого будут регистрироваться эти волны, должна быть на уровне 0.5 мм и меньше. В настоящей работе осуществляется доработка методики дистанционных лазерных измерений волнения до уровня, необходимого для регистрации капиллярных волн. Проводится проверка метода в лабораторных условиях и адаптация методики к измерениям в натурных условиях.

ГЕНЕРАЦИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ И МЕТОДИКА ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Важным этапом при создании метода измерения капиллярных волн в морских условиях являются лабораторные измерения. На рис. 1 представлена схема лабораторной установки, которая позволяет генерировать капиллярные волны заданной амплитуды и частоты, а также обеспечивает дистанционные измерения параметров создаваемых волн. Колебания диффузора низкочастотного динамика передаются легким стержнем на круглую площадку, которая является источником возмущений на водной поверхности. Линейка позволяет регистрировать на фотографиях длину волны генерируемых волн. Стробоскоп

¹ Филатов С.В. Нелинейные волновые и вихревые движения на поверхности жидкости: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Черноголовка; 2020. 82 с. <https://docplayer.com/170397192-Filatov-sergey-vasilevich-nelineynye-volnovye-i-vihrevye-dvizheniya-na-poverhnosti-zhidkosti.html>. [Filatov S.V. Nonlinear wave and vortex motions on the surface of a liquid. Cand. Sci. Thesis (Phys.-Math.). Chernogolovka; 2020. 82 p. (in Russ.). <https://docplayer.com/170397192-Filatov-sergey-vasilevich-nelineynye-volnovye-i-vihrevye-dvizheniya-na-poverhnosti-zhidkosti.html>]

позволяет «остановить» изображение капиллярных волн, если его частота согласована с частотой сигнала, подаваемого на динамик. Использование стробоскопа позволило получать четкое изображение волн на поверхности ванны и надежно измерять пространственную протяженность набора из нескольких волн.

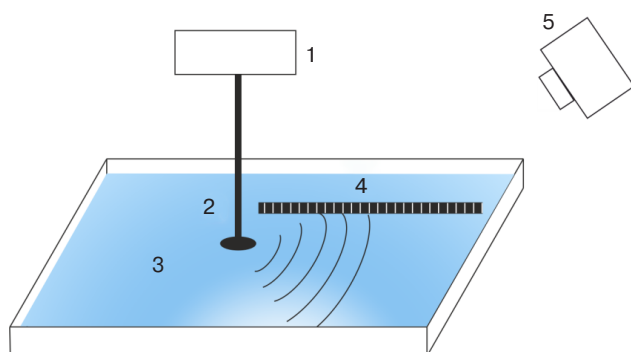


Рис. 1. Схема генерации капиллярных волн в лабораторных условиях:

1 – низкочастотный динамик, 2 – осциллирующая площадка, 3 – водная поверхность, 4 – линейка, 5 – стробоскоп

На рис. 2 представлены фотографии создаваемых волн при разной частоте генератора f . На рис. 2а частота составляет $f = 16$ Гц, что соответствует гравитационно-капиллярной волне, а на рис. 2б частота генерируемых волн $f = 60$ Гц, что относится к чисто капиллярным колебаниям.



Рис. 2. Изображение поверхностных волн при частоте генерации $f = 16$ Гц (а) и при частоте генерации $f = 60$ Гц (б)

Созданная установка позволила проверить дисперсионное соотношение между круговой частотой волны ω и длиной волны λ . Теоретические выражения для дисперсионного соотношения и фазовой скорости волн имеют вид [16]:

$$\omega = \sqrt{kg + \frac{k^3\sigma}{\rho}}, \quad (1)$$

$$U = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} + \frac{k\sigma}{\rho}}, \quad (2)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, g – ускорение свободного падения, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости. В данном уравнении первое слагаемое под корнем определяет гравитационную часть, в то время как второе слагаемое отвечает за капиллярную составляющую. Для чистой воды $\sigma = 72$ мН/м, и условная граница перехода от преимущественно гравитационных к преимущественно капиллярным волнам соответствует равенству этих слагаемых. При этом $k = \frac{\rho g}{\sigma} = 369 \text{ м}^{-1}$, а длина волны, соответствующая границе перехода к капиллярным волнам, составляет $\lambda_{\text{гр}} = 17$ мм. Результаты лабораторных измерений представлены в таблице.

На рис. 3 представлена дисперсионная зависимость для поверхностных волн. Следует отметить, что в процессе эксперимента не принимались никакие специальные меры для очистки воды от поверхностно активных веществ, что понизило величину σ . Оптимизация теоретической зависимости по этому параметру по отношению к экспериментальным измерениям показала, что наилучшее приближение соответствует $\sigma = 45$ мН/м. Отметим, что в лабораторных измерениях условная длина волны $\lambda_{\text{гр}}$, соответствующая переходу к капиллярной составляющей, уменьшается пропорционально коэффициенту поверхностного натяжения.

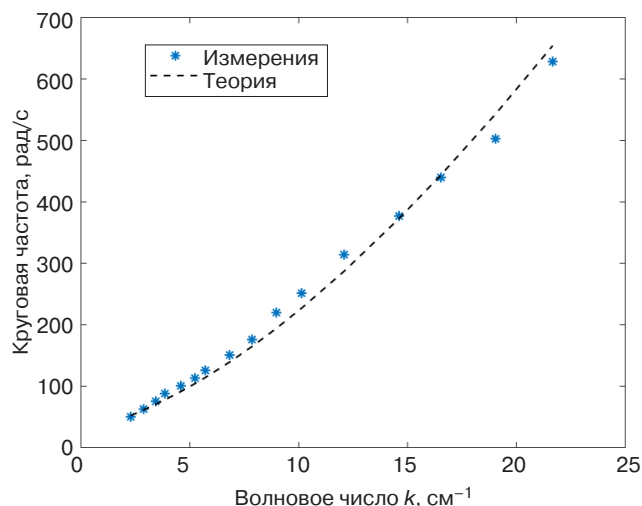


Рис. 3. Экспериментальная дисперсионная зависимость для гравитационно-капиллярных и капиллярных волн ($\sigma = 45$ мН/м)

Таблица. Результаты лабораторных измерений

Частота f , Гц	8	10	12	14	16	18	20	24	28	35	40	50	60	70	80	100
Длина волны λ , мм	27.5	22.0	18.3	16.3	13.7	12.0	11.0	9.2	8.0	7.0	6.2	5.2	4.3	3.75	3.6	2.9

Из графика видно, что измеренная дисперсионная зависимость хорошо соответствует теоретической зависимости (1).

Следующим шагом эксперимента была регистрация амплитуды возникающих гравитационно-капиллярных волн. Для этого поверхность освещалась лазерным излучением, которое сканировало вдоль поверхности с короткими остановками в отдельных точках. На рис. 4 показана фотография, где четко видна граница, на которой рассеиваются лазерные лучи. Регистрация движения поверхности при распространении волны осуществляется с помощью расположенной сбоку видеокамеры с частотой съемки 60 Гц. Лазерные лучи при попадании в воду рассеиваются, создавая почти вертикальный луч. Верхняя граница каждого луча соответствует границе раздела «вода-воздух».

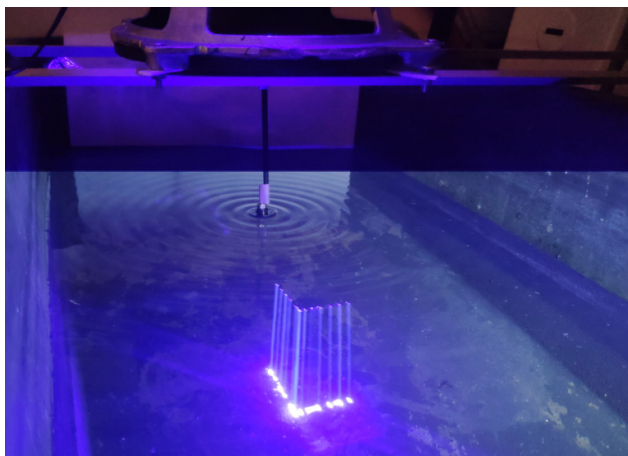


Рис. 4. Лазерные лучи при рассеянии в воде формируют четкий край на поверхности

Однако такая схема измерений не позволяла регистрировать сечение поверхности, ее профиль. Для решения этой проблемы схема измерений была модернизирована. Для этого была собрана установка, схема которой представлена на рис. 5.

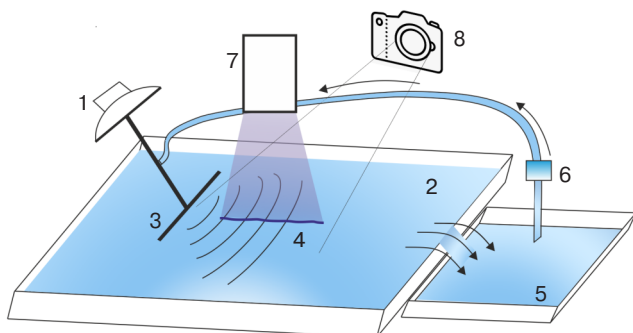


Рис. 5. Схема лабораторных оптических измерений капиллярных волн: 1 – динамик, 2 – водная поверхность, 3 – осциллирующая пластинка, 4 – граница раздела, освещенная сканирующим лазером, 5 – нижний резервуар, 6 – насос, 7 – электронно управляемый сканатор, 8 – видеокамера

В данном эксперименте генератором волн являлась осциллирующая пластинка, частично погруженная в воду. Диффузор динамика передавал колебания на водную поверхность с помощью жестко соединенной с ним пластинки. Питание динамика осуществлялось звуковым генератором с усилителем, позволяющим изменять амплитуду и частоту колебаний пластинки в широких пределах. В результате смещения пластинки на водной поверхности возникали плоские волны, которые освещались сканирующим лазерным лучом. Для уменьшения количества пылинок, оседающих на поверхности, проводился слив воды через край ванны в нижний резервуар, из которого вода с помощью насоса возвращалась в верхнюю ванну. Лазерное излучение с длиной волны 450 нм и мощностью около 1 Вт с помощью электронно управляемого сканатора разворачивалось на поверхности вдоль прямой линии длиной около 80 мм. Регистрация луча, рассеянного на поверхности раздела, производилась сбоку видеокамерой. При этом время развертки луча было близко к длительности выдержки видеокадров. Пример видеокадра, на котором лазерное излучение рассеивается на возмущенной поверхности раздела, представлен на рис. 6. На каждом кадре четко видна граница водной поверхности, которая с учетом калибровки матрицы видеокамеры может быть преобразована в высоту возмущения в каждой точке траектории луча. Наличие пылинок на поверхности приводило к яркой засветке в месте расположения пылинок, однако слив воды значительно уменьшил их количество, что позволило ускорить обработку кадров.

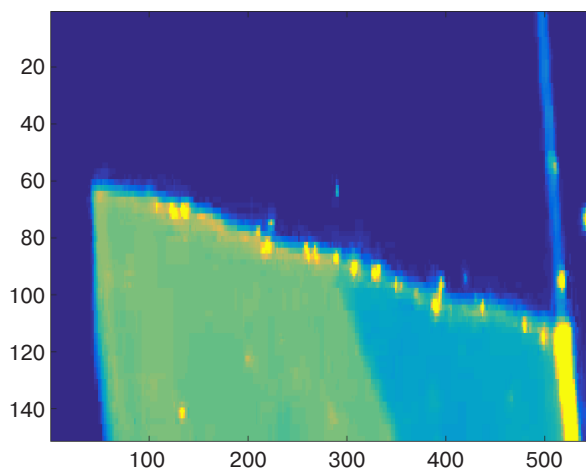


Рис. 6. Видеокадр волновой поверхности, по которой распространяется капиллярная волна

Обработка видеокадров проводилась по каждому столбцу изображения. На рис. 7 представлен график изменения интенсивности засветки вдоль одного из столбцов кадра. Видно, что граница поверхности раздела, которая соответствует скачку интенсивности

до заданного уровня, имеет протяженность на уровне одного пикселя. Следовательно, разрешение данного метода по высоте соответствует масштабу одного пикселя, что в нашем эксперименте составляло 0.15 мм. Последовательная обработка всех столбцов видеокadra позволяет регистрировать профиль волны.

Калибровка видео изображения и перевод пикселей в высоту в миллиметрах проводился

с учетом положения невозмущенной поверхности и масштабирования по известному изображению (мире). На следующем этапе полезным оказалось сглаживание профиля скользящим окном. На рис. 8 представлены примеры волнового профиля для гравитационно-капиллярных и капиллярных волн различной частоты с учетом сглаживания.

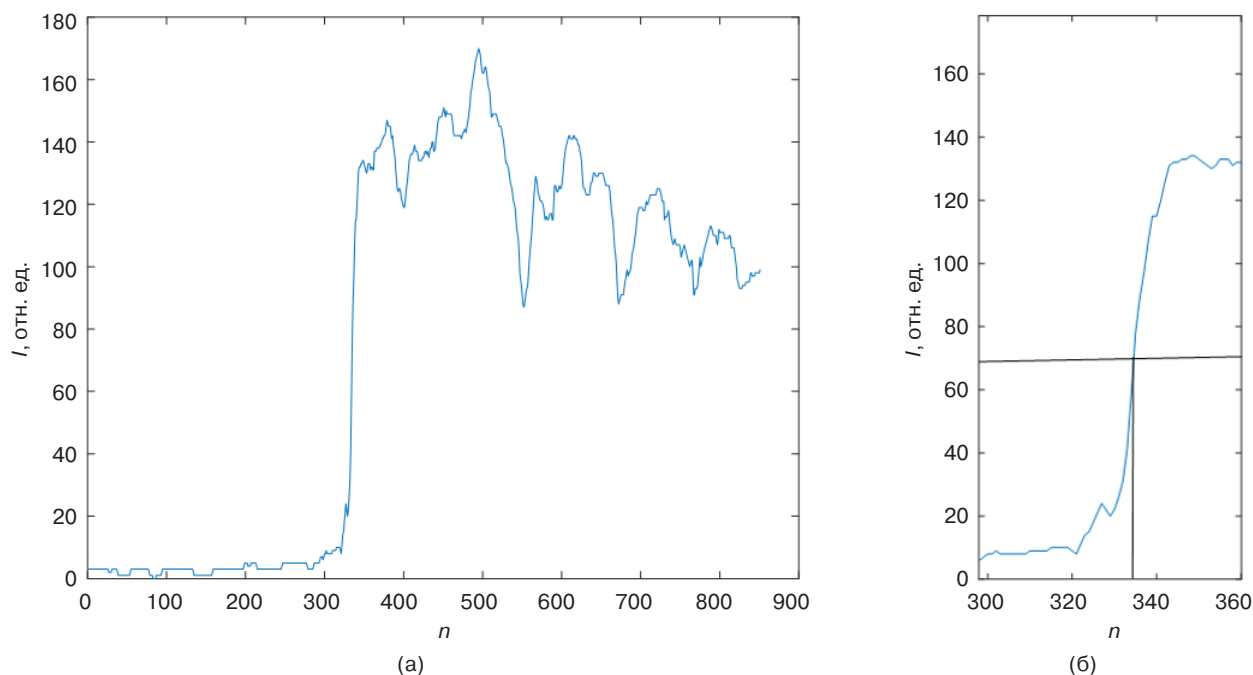


Рис. 7. Зависимость интенсивности изображения от номера строки вдоль одного из столбцов видеокadra на рис. 5 (а) и граница в увеличенном масштабе (видна четкая граница засветки) (б)

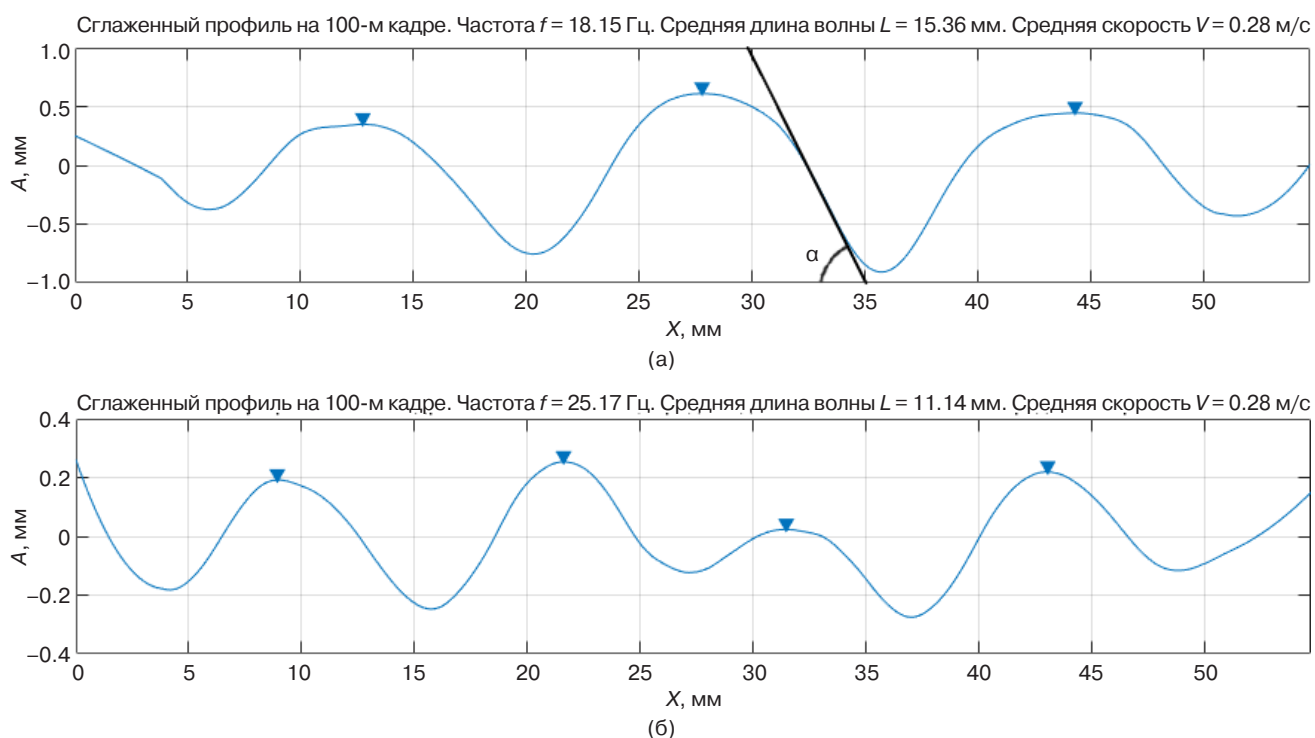


Рис. 8. Профиль капиллярных волн на отдельном кадре изображения:
(а) частота волны 18 Гц, (б) частота волны 25 Гц

Следует отметить, что амплитуда волн на частотах выше 16 Гц не превышала одного миллиметра и уменьшалась с увеличением частоты, хотя амплитуда колебаний диффузора динамика и возмущающего стержня на поверхности ванны не изменялась. Это свидетельствует о росте коэффициента затухания с ростом частоты капиллярных волн. Кроме пространственного изображения капиллярных волн проведенный эксперимент позволил получать временную изменчивость аппликат (высоты) в любой точке траектории. На рис. 9а представлена зависимость высоты возмущения от времени. Фурье-анализ данной зависимости позволяет получать спектр мощности волнового процесса (рис. 9б). На спектре четко регистрируется основная частота возбуждаемых капиллярных волн, которая соответствует частоте колебаний диффузора динамика.

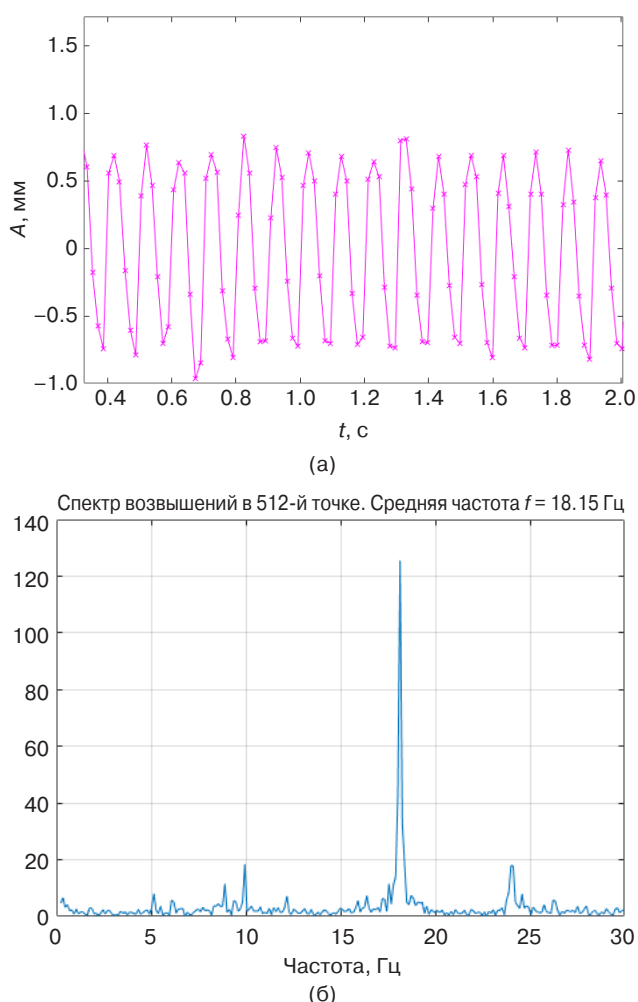


Рис. 9. Зависимость высоты поверхности раздела в одной точке траектории от времени (а) и спектр мощности для представленной временной реализации (б)

Проведенные лабораторные исследования капиллярных волн дали возможность напрямую измерить их основные особенности и учесть эти особенности

при проектировании морского волнографа, позволяющего регистрировать капиллярную составляющую морского волнения. В результате проведенного анализа можно сделать ряд выводов. Во-первых, из формы волны на рис. 8а следует, что уклоны в капиллярных волнах могут достигать уровня $\xi = \tan(\alpha) = 2/5$, что составляет 23° . В натуральных условиях капиллярные волны накладываются на гравитационные, увеличивая общий наклон участка поверхности. Можно ожидать, что результирующие уклоны в натуральных условиях могут достигать 30° и более. При этом лазерный луч, падающий вертикально вниз на морскую поверхность, будет отклоняться больше, чем на 60° .

Другой вывод заключается в том, что на частотах 25–30 Гц не удастся создать капиллярные волны с амплитудой больше 0.5 мм. Отсюда следует, что регистрация капиллярной составляющей морского волнения в натуральных условиях на частотах от 16 до 30 Гц потребует чувствительности аппаратуры на уровне 0.5 мм или выше.

НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

В августе 2021 г. были проведены первые натурные измерения с помощью сканирующего лазерного волнографа, который позволял проводить регистрацию капиллярных волн. Измерения проводились с морского пирса Морского гидрофизического института и со стационарной океанографической платформы Морского гидрофизического института Российской Академии наук, расположенной в пгт. Кацивели, Крым. В отличие от предыдущей версии волнографа, описанной в работе [14], частота видеосъемки была повышена с 25 до 60 Гц. Это позволило измерять спектры волнения до 30 Гц, где капиллярная составляющая уже является основной. Напомним, что для чистой воды, начиная с частот выше 16 Гц, капиллярные силы превышают гравитационные. Второе усовершенствование касалось использования трансфокатора на объективе видеокамеры, который повысил пространственное разрешение до 0.3–0.6 мм.

Пример видеокadra, полученного 26 августа 2021 г. в 20:47 по московскому времени на морском пирсе, представлен на рис. 10. На изображении четко регистрируется форма волновой поверхности. За каждую 6-минутную реализацию удастся зарегистрировать 21 600 «мгновенных» спектров. Это позволяет вычислять как временные, так и пространственные спектры волнения, одномерные и двумерные уклоны на любом масштабе, а также изменчивость параметров волнения при изменении метеорологической обстановки.

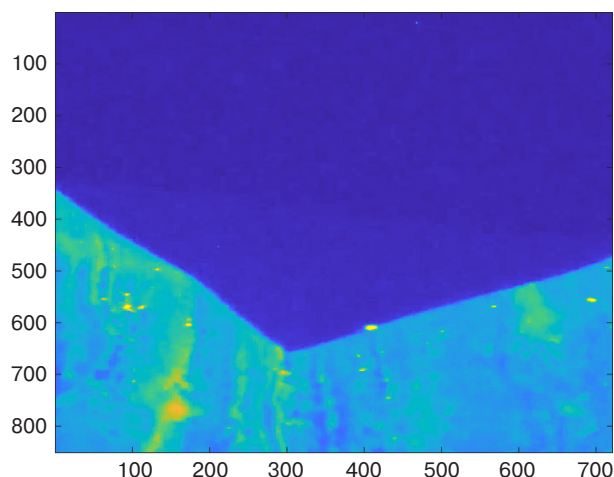


Рис. 10. Типичный видеокадр волнения (оси в пикселах). Частота оцифровки 60 Гц

На рис. 11 приведен пример реализации от 26 августа 2021 г. для зависимости высоты от номера кадра для одной точки траектории (полное количество разрешаемых точек на траектории развертки лазерного луча – 700). На рис. 11а представлена вся реализация, а на рис. 11б – небольшой отрезок реализации в увеличенном масштабе.

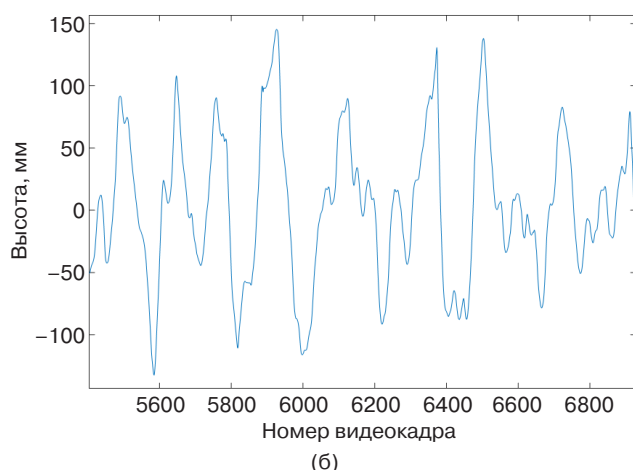
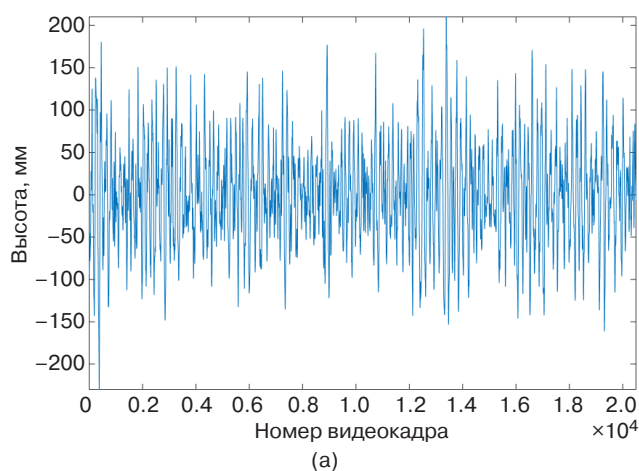


Рис. 11. Пример зависимости высоты волнения от номера кадра для одной точки на траектории развертки (а) и участок записи в увеличенном масштабе (б)

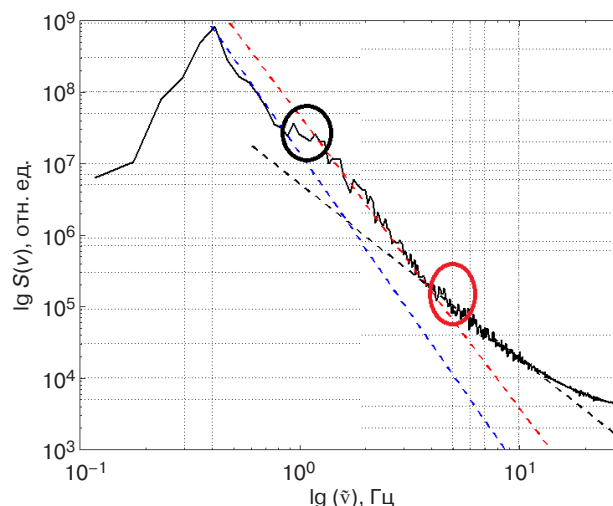


Рис. 12. Спектр возвышений в отдельной точке профиля в логарифмическом масштабе для развивающегося волнения (26.08.2021, Кацивели). Кругами обозначены области перехода от одного наклона спектра к другому

Интерес представляет временной спектр полученной реализации (рис. 12). Традиционно его представляют в двойном логарифмическом масштабе. На спектре прослеживаются три участка, наклон которых характеризует различные формы волнения. Самый низкочастотный участок спектра (длинно-волновый) имеет наклон -4.5 ± 0.3 , средний участок отвечает за гравитационное волнение и имеет наклон -4.0 ± 0.2 , а третий участок, по-видимому, уже учитывает капиллярные волны. Его наклон существенно ниже первых двух и составляет -2.6 ± 0.3 . Полученные показатели степенной зависимости хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными. Так степенная зависимость с наклоном -4.0 соответствует спектру В.Е. Захарова и Н.Н. Филоненко [10], а участок с наклоном -4.5 – переходной режим к спектру Филлипса $E \sim f^{-5}$ [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данном этапе исследований авторы не ставили задачу интерпретации спектральных или иных характеристик волнения. Целью настоящей работы были создание и апробация в лабораторных и натурных условиях нового лазерного волнографа, проверка его возможностей по измерению полного спектра гравитационных, гравитационно-капиллярных и капиллярных волн в натурных морских условиях. Поставленные задачи удалось выполнить. В лабораторных условиях были проверены лазерные методы регистрации капиллярных волн, получены характеристики волн на высоких частотах: пространственные профили, временные зависимости высот для всех точек траектории лазерной

развертки, частотные спектры мощности. Сделаны выводы о том, что уклоны в капиллярных волнах могут достигать 30° , а амплитуда на частотах выше 25 Гц не превышает 0.5 мм. Важным этапом работы была проверка новой версии сканирующего лазерного волнографа в морских натуральных условиях. Измерения подтвердили возможность предложенного лазерного метода по измерению параметров морского волнения на пространственных масштабах, охватывающих 3 порядка: от единиц миллиметров до единиц метров. Нам не известны мировые аналоги, имеющие такие характеристики. Метод запатентован [15]. Создание волнографа, позволяющего проводить прямые измерения «мгновенных» профилей морской поверхности с временной синхронизацией в 10^{-4} с и пространственной точностью лучше 0.5 мм открывают широкие возможности для исследования физики эволюции волнения, влияния волнения на рассеяние электромагнитных волн. Такие возможности открываются впервые. Достоинством метода является прямой характер измерения аппликата и всех характеристик волнения не только во времени, но и в пространстве. Это позволяет получать

большие ряды (21 000) «мгновенных» профилей волнения для каждой 6-минутной реализации. Метод полностью дистанционен, не искажает свойства поверхности, не подвержен влиянию ветра, волн и морского течения, позволяет измерять долю пены на поверхности. Экспериментально в натуральных условиях доказана возможность применения предложенного метода в любое время суток и в широком диапазоне погодных условий.

Вклад авторов

Идеи предложенных методов, аппаратная реализация и сборка макетного образца, а также разработка программного обеспечения для обработки данных реализованы сотрудниками кафедры физики РТУ МИРЭА профессором В.В. Стерлядкиным и старшим преподавателем К.В. Куликовским.

Authors' contribution

The ideas of the proposed methods, hardware implementation, and assembly of the device, as well as the development of software for processing data were implemented by Professor V.V. Sterlyadkin and Senior Lecturer K.V. Kulikovsky, the staff of the Department of Physics at the MIREA – Russian Technological University.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press; 2010. 404 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
2. Hashimoto N. Analysis of the directional wave spectrum from field data. In: *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Liu P.L.-F. (Ed.). Singapore: World Scientific. 1997;3:103–143. https://doi.org/10.1142/9789812797568_0004
3. Grare L., Lenain L., Melville W.K. Vertical profiles of the wave-induced airflow above ocean surface waves. *J. Phys. Oceanogr.* 2018;48(12):2901–2922. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0121.1>
4. Hwang P.A., Wang D.W., Walsh E.J., Krabill W.B., Swift R.N. Airborne measurements of the wave number spectra of ocean surface waves. Part I: Spectral slope and dimensionless spectral coefficient. *J. Phys. Oceanogr.* 2000;30(11):2753–2767. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<2753:AMOTWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<2753:AMOTWS>2.0.CO;2)
5. Allender J., Audunson T., Barstow S.F., Bjerken S., Krogstad H.E., Steinbakke P., Vartdal L., Borgman L.E., Graham C. The WADIC project; a comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation. *Ocean Eng.* 1989;16(5–6):505–536. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0029-8018(89)90050-4)
6. Banner M.L., Jones I.S., Trinder J. Wavenumber spectra of short gravity waves. *J. Fluid Mech.* 1989;198:321–344. <https://doi.org/10.1017/S0022112089000157>

REFERENCES

1. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press; 2010. 404 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
2. Hashimoto N. Analysis of the directional wave spectrum from field data. In: *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Liu P.L.-F. (Ed.). Singapore: World Scientific. 1997;3:103–143. https://doi.org/10.1142/9789812797568_0004
3. Grare L., Lenain L., Melville W.K. Vertical profiles of the wave-induced airflow above ocean surface waves. *J. Phys. Oceanogr.* 2018;48(12):2901–2922. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0121.1>
4. Hwang P.A., Wang D.W., Walsh E.J., Krabill W.B., Swift R.N. Airborne measurements of the wave number spectra of ocean surface waves. Part I: Spectral slope and dimensionless spectral coefficient. *J. Phys. Oceanogr.* 2000;30(11):2753–2767. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<2753:AMOTWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<2753:AMOTWS>2.0.CO;2)
5. Allender J., Audunson T., Barstow S.F., Bjerken S., Krogstad H.E., Steinbakke P., Vartdal L., Borgman L.E., Graham C. The WADIC project; a comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation. *Ocean Eng.* 1989;16(5–6):505–536. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0029-8018(89)90050-4)
6. Banner M.L., Jones I.S., Trinder J. Wavenumber spectra of short gravity waves. *J. Fluid Mech.* 1989;198:321–344. <https://doi.org/10.1017/S0022112089000157>

7. Falcon E., Mordant N. Experiments in surface gravity-capillary wave turbulence. *Annual Rev. Fluid Mech.* 2022;54:1–25. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-021021-102043>
8. Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A., Mezhev-Deglin L.P. Excitation and detection of nonlinear waves on a charged surface of liquid hydrogen. *Instruments and Experimental Techniques*. 2002;45(6):758–763. <https://doi.org/10.1023/A:1021418819539>
9. Захаров В.Е. Слабая турбулентность в средах с распадным спектром. *Прикладная механика и техническая физика*. 1965;4:35–39. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/2f5/2f55daccf31e1bdf4c6c44e436b4166.pdf>
10. Захаров В. Е., Филоненко Н. Н. Спектр энергии для стохастических колебаний поверхности жидкости. *Докл. АН СССР*. 1966;170(6):1292–1295. URL: <http://www.mathnet.ru/links/ec2b951f99ebc10ab5bb4c2bf4fe5948/dan32646.pdf>
11. Захаров В.Е., Филоненко Н.Н. Слабая турбулентность капиллярных волн. *Прикладная механика и техническая физика*. 1967;5:62–67. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/24e/24ea0a63fb235c70765e3dd7eceedea.pdf>
12. Бадюлин С.И., Захаров В.Е. Спектр Филлипса и модель диссипации ветрового волнения. *Теоретическая и математическая физика*. 2020;202(3):353–363. <https://doi.org/10.4213/tmf9801>
13. Lukaschuk S., Nazarenko S., McLelland S., Denissenko P. Gravity wave turbulence in wave tanks: Space and time statistics. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103(4):044501. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.044501>
14. Sterlyadkin V.V., Kulikovskii K.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., Likhacheva M.V. Scanning laser wave recorder with registration of «instantaneous» sea surface profiles. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2021;38(8):1415–1424. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>
15. Стерлядкин В.В. Сканирующий лазерный волнограф с регистрацией «мгновенной» формы поверхности: Пат. RU № 2749727. Заявка № RU2020134068А; заявл. 16.10.2020; опубл. 16.06.2021.
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика: Учебное пособие*. В 10 т. Т. VI. *Гидродинамика*. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.; 1986. 736 с.
7. Falcon E., Mordant N. Experiments in surface gravity-capillary wave turbulence. *Annual Rev. Fluid Mech.* 2022;54:1–25. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-021021-102043>
8. Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A., Mezhev-Deglin L.P. Excitation and detection of nonlinear waves on a charged surface of liquid hydrogen. *Instruments and Experimental Techniques*. 2002;45(6):758–763. <https://doi.org/10.1023/A:1021418819539>
9. Zakharov V.E. Weak turbulence in media with a decay spectrum. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1965;6(4):22–24. <https://doi.org/10.1007/BF01565814> [Original Russian Text: Zakharov V.E. Weak turbulence in media with a decay spectrum. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 1965;4:35–39 (in Russ.). Available from URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/2f5/2f55daccf31e1bdf4c6c44e436b4166.pdf>]
10. Zakharov V.E., Filonenko N.N. Energy spectrum for stochastic oscillations of the surface of a liquid. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1966;170(6):1292–1295 (in Russ.). Available from URL: <http://www.mathnet.ru/links/ec2b951f99ebc10ab5bb4c2bf4fe5948/dan32646.pdf>
11. Zakharov V.E., Filonenko N.H. Weak turbulence of capillary waves. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1967;8:37–40. <https://doi.org/10.1007/BF00915178> [Original Russian Text: Zakharov V.E., Filonenko N.H. Weak turbulence of capillary waves. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 1967;5:62–67 (in Russ.). Available from URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/24e/24ea0a63fb235c70765e3dd7eceedea.pdf>]
12. Badulin S.I., Zakharov V.E. Phillips spectrum and a model of wind wave dissipation. *Theoret. and Math. Phys.* 2020;202(3):309–318. <https://doi.org/10.1134/S0040577920030034> [Original Russian Text: Badulin S.I., Zakharov V.E. Phillips spectrum and a model of wind wave dissipation. *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika*. 2020;202(3):353–363 (in Russ.). <https://doi.org/10.4213/tmf9801>]
13. Lukaschuk S., Nazarenko S., McLelland S., Denissenko P. Gravity wave turbulence in wave tanks: Space and time statistics. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103(4):044501. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.044501>
14. Sterlyadkin V.V., Kulikovskii K.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., Likhacheva M.V. Scanning laser wave recorder with registration of “instantaneous” sea surface profiles. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2021;38(8):1415–1424. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>
15. Sterlyadkin V.V. *Scanning laser recorder recording “instant” shape of surface*: RU Pat. 2749727. Publ. 16.06.2021 (in Russ.).
16. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika: Uchebnoe posobie*. V 10 t. T. VI. *Gidrodinamika* (Theoretical Physics: Textbook. In 10 v. V. VI. *Hydrodynamics*. Moscow: Nauka; 1986. 736 p. (in Russ.).

Об авторах

Стерлядкин Виктор Вячеславович, д.ф.-м.н., профессор, кафедра физики Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sterlyadkin@mirea.ru. Scopus Author ID 6505940691, ResearcherID D-7125-2017, <https://orcid.org/0000-0002-1832-8608>

Куликовский Константин Владимирович, старший преподаватель, кафедра физики Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: constantinkk@mail.ru. Scopus Author ID 57223241696, <https://orcid.org/0000-0001-9296-6424>

About the authors

Viktor V. Sterlyadkin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sterlyadkin@mirea.ru. Scopus Author ID 6505940691, ResearcherID D-7125-2017, <https://orcid.org/0000-0002-1832-8608>

Konstantin V. Kulikovsky, Senior Lecturer, Department of Physics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: constantinkk@mail.ru. Scopus Author ID 57223241696, <https://orcid.org/0000-0001-9296-6424>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 811.134.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-111-120>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Аксиологические аспекты преподавания испанского языка в СССР

Е.В. Новосёлова,
Н.И. Чернова[@],
Н.В. Катахова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Целью статьи является анализ ведущих аксиологических аспектов преподавания испанского языка в высших учебных заведениях Советского Союза (с 1930-х до начала 1980-х гг.) на основе изучения содержания учебников, пособий и ряда других трудов.

Методы. В статье применяются текстологический, историко-сравнительный и структурный методы.

Результаты. На основе анализа указанных текстов авторы делают акцент на двух основных группах аспектов: научно-педагогических и внеакадемических. Первые связаны с внутренней логикой развития испанистики как науки, вторые – со сторонними, внешними обстоятельствами, прежде всего, идеологическими. Анализ источников показывает, что тематически преподавание испанского в СССР проделало путь от простых пособий, нацеленных на закрепление основ языка, до углубленной разработки разнообразных конструкций испанского языка (грамматики, фонетики, лексики и т.д.). В хронологическом отношении дифференцированы два основных периода в развитии советской испанистики: с 1930-х до начала 1960-х гг. и с начала 1960-х до начала 1980-х гг.

Выводы. Анализ показал, что становление и развитие каждого из периодов связано с событиями, не имеющими к преподаванию испанского языка прямого отношения: гражданской войной в Испании и победой Кубинской революции. Следствием первого события стало начало систематического преподавания испанского в вузах СССР, а следствием второго – переориентация этого процесса с пиренейского варианта испанского на латиноамериканский. Однако содержание учебников и пособий убедительно демонстрирует, что эта переориентация не была полной и касалась преимущественно подбора текстовых материалов, что позволяет авторам прийти к выводу об ограниченности влияния идеологии на внутреннюю логику развития испанистики в СССР.

Ключевые слова: испанский язык, высшее образование, методология, идеология, преподавание иностранных языков

• Поступила: 14.06.2022 • Доработана: 04.07.2022 • Принята к опубликованию: 12.08.2022

Для цитирования: Новосёлова Е.В., Чернова Н.И., Катахова Н.В. Аксиологические аспекты преподавания испанского языка в СССР. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):111–120. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-111-120>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Axiological aspects of teaching Spanish in the Soviet Union

Elena V. Novoselova,
Nadezhda I. Chernova [®],
Nataliya V. Katakhova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The paper analyzes core axiological aspects of Spanish teaching in higher educational institutions of the Soviet Union from the 1930s to the early 1980s based on various sources including textbooks, tutorials, etc.

Methods. The study is based on textual-analytic, historical-comparative, and structural methods.

Results. Scientific-pedagogical and sociological aspects of the subject are distinguished. The former are limited to the internal developmental logic of Spanish studies, while the latter refers to external circumstances, including ideological factors. The literature review shows that Spanish teaching in the USSR progressed topically from simple manuals aimed at consolidating linguistic basics to a more rigorous pedagogical development of Spanish language studies (grammar, phonetics, vocabulary, etc.) The authors identify two significant periods in the development of Soviet Spanish studies, with the first phase extending from the 1930s to the early 1960s, and the second—from the 1960s to the early 1980s.

Conclusions. The analysis showed that the formation and development of each period is associated with such events as the Spanish Civil War and the victory of the Cuban Revolution, which are not directly related to Spanish teaching. The first event coincided with the beginning of systematic Spanish teaching at the USSR universities, while the second redirected this process from Castilian to Latin American Spanish. However, the analysis of textbook and tutorial materials convincingly demonstrates that this process of redirection, which mainly concerns the selection of textual materials, remains incomplete. This supports a conclusion concerning the limited impact of ideology on the internal logic of the Spanish studies development in the USSR.

Keywords: Spanish, higher education, methodology, ideology, teaching of foreign languages

• Submitted: 14.06.2022 • Revised: 04.07.2022 • Accepted: 12.08.2022

For citation: Novoselova E.V., Chernova N.I., Katakhova N.V. Axiological aspects of teaching Spanish in the Soviet Union. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):111–120. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-111-120>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Методики, подходы и технологии обучения иностранным языкам всегда развивались в тесной интеграции с целым рядом других наук, таких, как филология, педагогика, психология, психолингвистика, теория коммуникаций, данные которых продуктивно реализовались и реализуются для оценки эффективности и достоверности проводимых исследований.

Сегодня все также актуальной остается задача поиска наиболее эффективных и рациональных способов формирования иноязычной профессиональной коммуникативной компетентности студентов [1].

Из основных европейских языков испанский пришел в нашу страну позже всех: его систематическое преподавание и изучение началось лишь в XX в. Во многом это стало следствием того обстоятельства, что в течение длительного времени отношения

России и Испании не отличались близостью¹. Это дает исследователю интересную возможность проанализировать формирование и становление преподавательской стратегии конкретного предмета за ограниченный период времени, оценить, каким изменениям она была подвергнута.

Целью настоящей статьи выступает анализ аксиологических аспектов преподавания испанского языка в СССР, другими словами, его ценностных ориентиров: исследовательских, научных, идеологических и т.д. Мы изучим состав этих ценностей и степень их влияния на педагогический процесс в логике всестороннего анализа учебников испанского языка для вузов. Поскольку школьное образование преследует иные цели и не столь непосредственно опирается на научные достижения, мы решили оставить его за пределами данного исследования. При этом подчеркнем, что данная работа не является сугубо историографической, поэтому максимально полный обзор работ, имеющих отношение к теме, не входит в наши задачи. Заинтересованные читатели могут изучить уже вышедшие обзорные труды [3, 4].

Хронологические рамки предмета данной статьи следующие: 1930-е – начало 1980-х гг. Нижней границей является начало преподавания испанского языка в вузах СССР и, как следствие, появление первых вузовских учебников. Верхняя граница – это начало перестройки, влияние которой на образовательный процесс требует отдельного изучения.

Несмотря на то, что в свободном доступе представлены отдельные работы, посвященные анализу смежных тем (истории взаимоотношений России и Испании, изучения испанского языка, литературы и т.п.), всестороннее изучение преподавания испанского в вузах еще не проводилось, что свидетельствует об актуальности настоящей работы.

Вкратце эволюцию испанистики можно представить следующим образом. На раннем этапе становления испанистики в методике преподавания преобладал грамматико-переводный метод, который строится преимущественно на выполнении

лексико-грамматических упражнений и чтении, а также анализе текстов [5]. Впоследствии намечается тенденция к преобладанию сознательно-практического метода, в котором, наряду с системным восприятием грамматики, первостепенное внимание уделяется практическому аспекту владения языком. Переход от одного метода к другому стал следствием общего развития советской педагогики и совершенствования методики преподавания иностранных языков.

ПРЕПОДАВАНИЕ ИСПАНСКОГО ЯЗЫКА В СССР: ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Преподавание испанского языка в СССР началось в 1930-е гг. Это не случайно: именно в этот период произошло доселе невиданное сближение судеб обеих стран. Речь идет о гражданской войне в Испании (1936–1939 гг.), в которой СССР поддерживал прокоммунистические силы. Это было время интенсивного обмена между двумя странами не только в военной сфере, но и в культурно-общественной: многие советские писатели посетили Испанию в эти годы, например, И. Эренбург и М. Кольцов [6]. В 1940 г. в СССР вышел известный сборник «Культура Испании» – первый опыт такого рода на русском языке, в который вошли статьи, посвященные различным аспектам испанистики [7].

В этот период в Испанию выезжало значительное число советских специалистов, вследствие чего актуальным был вопрос их языковой подготовки. В сложившихся условиях появились учебники и пособия, целью которых стало максимально быстрое освоение основ языка. Одними из первых стали учебники для I–III курсов вузов, изданные в 1933 г. [8, 9]. Сюда же можно отнести «Учебник испанского языка. Начальный курс» 1937 г. Его целью автор называет «умение читать несложные общественно-политические тексты и просто, но грамотно выразить свою мысль» [10]. Эти пособия отличаются не только сжатостью грамматического материала, но и единообразием идеологической повестки: в них много текстов и лексики коммунистической и антикапиталистической направленности: тексты про Маркса, Сталина, завоевание Мексики Кортесом и т.п. Такая направленность логична в условиях гражданской войны и идеологического противостояния, и в то время ее актуальность была несомненной. При этом бросается в глаза известная ограниченность методологической составляющей этих пособий – перекося в сторону лексико-грамматических аспектов языка в ущерб фонетическим. Другими словами, превалирование грамматико-переводного метода над остальными.

Говоря о ранних этапах преподавания испанского в нашей стране, нельзя не упомянуть замечательный

¹ Главная причина этого видится даже не в отдаленности стран друг от друга, а в том, что Испания и Россия в разное время стали ведущими субъектами европейской политики, в XVI и XVIII вв. соответственно. Другими словами, когда Россия вышла на общеевропейскую арену, Испания уже успела ее покинуть. Как бы то ни было, регулярные дипломатические отношения между двумя странами были установлены лишь в первой половине XVIII в. [2]. [The main reason for this lies not so much in the geographical remoteness of the countries from each other as the fact that Spain and Russia became leading subjects of European politics at different times, in the 16th and 18th centuries, respectively. In other words, by the time Russia entered the Pan-European arena, Spain had already left it. In any case, regular diplomatic relations between the two countries were not established until the first half of the 18th century [2].]

труд В.Ф. Шишмарева «Очерки по истории языков Испании», который, как и выше отмеченный сборник по культуре, стал первым в своем роде. Несмотря на то, что это не учебник испанского языка, его активно использовали как пособие по истории иберийских языков при подготовке испанистов до тех пор, пока не появились соответствующие работы. Автор рисует панораму развития испанского, португальского, каталанского, галисийского и баскского языков в широком историческом контексте. Конечно, этот труд не свободен от недостатков: в нем встречаются неточности и откровенные ошибки, которые касаются преимущественно испанского языка Латинской Америки. Например, автор переводит слово «huasa» как гробница, а «alrasa» – как «горная коза» [11]. Все это – лексика, попавшая в испанский из кечуа – официального языка империи инков и самого распространенного по числу носителей индейского языка обеих Америк. Однако это ни в коей мере не умаляет достоинств труда, особенно принимая во внимание недостаток материалов по языку Латинской Америки и их труднодоступность (отчасти это актуально и сегодня, не говоря уже о периоде восьмидесятилетней давности).

Поражение прокоммунистических сил в гражданской войне в Испании оказало известное влияние на преподавание испанского в СССР и саму испанистику в целом. Эти направления продолжили развиваться (СССР как одна из ведущих держав, претендующая в т.ч. и на первенство в науке, не могла оставить в стороне один из наиболее распространенных языков мира). Помимо труда Шишмарева стоит отметить «Курс испанского языка для высших учебных заведений» О.К. Васильевой-Шведе [12], который в идейном отношении продолжил линию пособий, упомянутых выше, а также первую нормативную грамматику испанского языка, написанную этим автором в соавторстве с Г.В. Степановым [13]. Однако был утрачен мощный идеологический импульс, который бы способствовал дальнейшей активизации советской испанистики.

Новым вектором ее развития, который, к тому же, отчасти способствовал переориентации преподавания испанского с пиренейского варианта на латиноамериканские, послужила Кубинская революция (1953–1959 гг.). Вопрос соотношения этих вариантов языка в преподавательской практике нашей страны является одним из самых важных и неоднозначных.

С этого времени и вплоть до окончания существования СССР связи поддерживались преимущественно по линии «Советский Союз – Латинская Америка» (советско-испанские дипломатические отношения были прерваны на долгие годы и возобновились лишь в 1977 г. [14]). При этом речь идет не только о Кубе, но и о других странах, где были

сильны позиции социалистической и коммунистической идеологии (Эквадор, Перу, Мексика). Влияние этих процессов на преподавание испанского языка несомненно, но необходимо более детально его оценить и охарактеризовать.

При анализе учебной литературы этого периода следует отметить две ведущие тенденции. Во-первых – отсутствие оперативной реакции на кубинские события в виде появления новых пособий, как это было в случае с гражданской войной в Испании. Во-вторых – количественное и качественное увеличение числа работ, связанных с преподаванием испанского, которое отмечается в 1960–1970-е гг.

Первую тенденцию можно объяснить тем, что СССР не принимал такого активного участия в кубинских событиях, как в испанской гражданской войне. Отсюда – позиция осторожного выжидания и, как следствие, отсутствие немедленной реакции на события в виде новшеств в сфере преподавания испанского. Лишь после того, как победа Кубинской революции стала свершившимся фактом, Куба и в целом Латинская Америка стали объектами интереса со стороны авторов учебников (более или менее отчетливо появление этого интереса можно датировать началом 1960-х гг.).

Вторая тенденция заслуживает особого внимания. Наиболее очевидная ее причина – это как раз резкое возрастание контактов с испаноязычным миром (аналогичный фактор в 1930-е гг. действовал недолго и фактически угас с завершением гражданской войны). В свою очередь, рост контактов вызвал спрос на испаноязычных специалистов, которые бы владели не просто языком, а всем комплексом иноязычной коммуникативной компетенции. Следствием этого стало увеличение числа вузов, где велась соответствующая подготовка. Это привело к росту числа учебников и пособий по испанскому языку, а также формированию нескольких крупнейших центров, где велась как практическая (преподавание) и методическая (разработка учебников и пособий), так и научная работа в области испанистики. Среди них выделяются московская, ленинградская и киевская школы испанистики. Не будем рассматривать их изолированно, поскольку наша задача – дать синтезированный обзор, однако совсем игнорировать их существование было бы ошибочным.

Особое место в числе работ этого периода занимает монография Г.В. Степанова «Испанский язык в странах Латинской Америки» [15], основанная на докторской диссертации автора (впоследствии исследователь продолжил заниматься этой проблематикой и выпустил монографию «К проблеме языкового варьирования. Испанский язык Испании и Америки» [16], содержание которой во многом пересекается с анализируемой здесь работой). Это первый в отечественной литературе опыт создания

подобного компендиума, посвященного языковой картине Латинской Америки. Как отмечает сам Степанов, его работа вызвана необходимостью исследования американского варианта испанского языка в связи с расширением контактов с данным регионом [16]. Конечно, в рамках отдельно взятой монографии равноценно рассмотреть все варианты испанского в Латинской Америке невозможно, однако при этом был задан определенное направление для дальнейшего изучения. Главным результатом этого труда стало то, что автор убедительно доказал необходимость детального изучения «американского» испанского не как отклонения от нормы (т.е. пиренейского варианта), а как самостоятельной языковой единицы. К сожалению, детальное изучение латиноамериканских вариантов в СССР не получило широкого и систематического развития, хотя отдельные работы периодически выходили в свет [17–19]. Кроме того, этот вектор был лишь частично реализован в практике преподавания испанского языка, о чем подробнее будет рассказано далее.

Данный период отмечен увеличением числа учебников по общему курсу испанского языка, причем разнообразной направленности: выходят в свет учебники как для языковых, так и для неязыковых вузов. Это свидетельствует о росте популярности испанского как объекта изучения среди студентов различных направлений, хотя его распространенность сильно уступала другим основным европейским языкам.

В содержательном и методологическом отношении представленные работы отличаются известным разнообразием. Одним из первых учебников этого периода для языковых вузов стал «Учебник испанского языка» Н.А. Великопольской и В.И. Родригес-Данилевской [20], вышедший в 1963 г. В методологическом отношении он построен по принципу параллельного освоения фонетических и лексико-грамматических навыков. Что касается подбора лексического и текстового материала, то он, с одной стороны, довольно стандартен, поскольку отражает повседневные темы («Дома», «Моя семья», «В институте» и т.п.) и реалии тогдашней жизни («В музее Ленина», «7 ноября»). С другой стороны, авторы учебника демонстрируют несомненный уклон в сторону испанской литературы «Золотого века» (фрагменты из произведений Лопе де Вега и Франсиско де Кеведо и Вильегас), а также реалистической прозы (Педро Антонио де Аларкон, Хосе Эррера Питере). В учебнике содержится несколько текстов на аргентинскую и уругвайскую тематику, что довольно необычно для советских учебников: политическая система Аргентины была идеологически чужда СССР [21].

Для сравнения необходимо проанализировать учебники, адресованные студентам неязыковых вузов. К таковым относится, например, «Учебник испанского

языка» для I курса неязыковых факультетов университетов [22]. Методологически он схож с предыдущим, при этом тематика многих текстов («Медицинские аппараты»; «Витамины» и т.п.) позволяет предположить, что курс адресован, в т.ч. и медикам. Это обстоятельство представляется весьма интересным, поскольку учебники по испанскому языку узкопрофильной направленности в нашей стране являются редкостью.

Учебник Ю.А. Смычковой адресован студентам неязыковых специальностей университетов и институтов. Его содержание довольно стандартно: изложение грамматических тем по мере возрастания сложности и параллельное формирование лексических навыков на материале текстов различной тематики: сначала – бытовой, затем несколько идеологически выраженных текстов про Латинскую Америку, Ленина, кубинского деятеля Хосе Марти [23].

Говоря об увеличении числа учебников и пособий, стоит особо подчеркнуть то обстоятельство, что издавались не только общие курсы испанского языка, но и разнообразные специализированные издания, посвященные отдельным аспектам испанистики: лексикологии, истории языка, теоретические грамматики и т.п. Некоторые из этих специальных работ адресовались не только будущим испанистам, но и широкому кругу читателей. В качестве примера можно привести небольшое пособие С.П. Мамонтова «Испанский язык. Историко-лингвистический очерк» [24]. Наличие подобных работ является в известной мере индикатором интереса широкой публики к испанскому языку.

Справедливо много внимания уделяется в этот период разработке грамматики. Причем речь идет не только об общих курсах практической и теоретической грамматики, но и о таких аспектах, как грамматическая стилистика и ситуативно-речевая грамматика, что свидетельствует о определенном уровне исследовательской глубины. Рассмотрим каждый из этих аспектов более подробно.

Ведущим вузовским пособием по теоретической грамматике стала работа О.К. Васильевой-Шведе и Г.В. Степанова [25]. Ее главной темой является морфология и синтаксис частей речи. Авторы излагают грамматические особенности всех частей речи с учетом новейших на тот момент разработок (в т.ч. широко привлекается зарубежный материал) в области теоретической грамматики. Основой для анализа служит преимущественно испанский материал, но в данном случае это не вызывает вопросов: в грамматическом отношении разница пиренейского варианта и латиноамериканских в целом весьма незначительна, чего не скажешь о лексике и фонетике. Там же, где эта разница ощутима (например, особенности употребления личных местоимений), авторы пособия делают соответствующие ремарки.

В качестве примера классического курса практической грамматики можно привести «Пособие по испанскому языку» С.И. Канонич в 2 книгах [26, 27]. Оно адресовано учащимся, уже имеющим базовые знания по испанской грамматике, поскольку первые уроки пособия посвящены анализу прошедших времен. Имеется и лексическая компонента, которая представлена текстами различной тематики. В первой книге изложены тексты преимущественно на повседневные темы, во втором – значительное количество материалов научно-популярного и лингвострановедческого характера, например, «Луи Пастер» или «Куба».

Пособие С.И. Канонич «Ситуативно-речевая грамматика испанского языка» [28] стало первой работой по данной тематике на русском языке. Автор адресует его изучающим испанский на продвинутом этапе. По сути, эта работа рассматривает стилистику языка с точки зрения стилистических функций грамматических форм. Кроме того, ситуативно-речевая грамматика рассматривается ею как часть лингвострановедения, поскольку является необходимым компонентом понимания социальных сфер общения, без которого невозможно в полной мере овладеть культурной компонентой иноязычной коммуникативной компетенции.

Пособие Н.М. Фирсовой по грамматической стилистике испанского языка в определенной степени дополняет работу Канонич. Во главу угла автор ставит функциональный подход к изучению языка [29], т.е. его изучение в контексте последующего практического применения. Несмотря на то, что стилистические функции грамматики выражены слабее, чем стилистические функции лексики, Фирсова справедливо привлекает к ним внимание, особенно в свете их недостаточной изученности. Овладение стилистическими функциями грамматики обладает несомненной важностью для будущих специалистов, поскольку способствует достижению высокого уровня владения языком. Что касается материалов для анализа, то автор пособия активно привлекает латиноамериканский материал, преимущественно кубинский и эквадорский.

Большой интерес представляет пособие по такому традиционно сложному разделу грамматики, как предлоги [30]. В нем последовательно объясняются практически все предлоги испанского языка с примерами.

Столь важный для обучения будущих испанистов предмет, как история испанского языка, в СССР реализовывался с помощью пособия «Historia de la lengua española» Е.В. Литвиненко [31], которое успешно выдержало несколько переизданий. Пособие представляет собой классическую работу такого рода, анализируя становление и развитие испанского языка в исторической перспективе: от «вульгарной» латыни до современного состояния.

При этом речь идет именно о пиренейском варианте: о латиноамериканских вариантах в пособии нет практически никакой информации.

Специализированные работы, адресованные студентам-испанистам, можно проанализировать исходя из их проблематики и тематической направленности. Помимо вышеназванных – лексикологии, истории языка и грамматики – следует также назвать фонетику, теорию и практику перевода.

Немалое количество пособий по фонетике испанского языка [32–35] подтверждает актуальность соответствующей тематики для практики преподавания. При этом показательно, что эти пособия выходили последовательно во всех трех академических центрах изучения испанского, о которых говорилось выше, что демонстрирует востребованность проблематики и интенсивность ее научной разработки. С методологической точки зрения все эти работы построены на основе теоретического подхода: их авторы много внимания уделяют анализу и описанию органов речи, их положению в процессе произнесения тех или иных звуков и т.д.

Материал, изложенный в пособиях, отражает актуальность такой проблемы, как орфоэпическая норма. В целом авторы решают ее в пользу пиренейского варианта, приводя в качестве аргументов следующие соображения: невозможность выработки «латиноамериканской» произносительной нормы [34]; возможность того, что латиноамериканские варианты могут показаться смешными в Испании [35]. При этом некоторые авторы все же включают материал по особенностям фонетики в Латинской Америке [36]. В итоге получается парадоксальная ситуация: несмотря на то, что советские испанисты контактировали преимущественно с латиноамериканскими коллегами, их обучали фонетическим нормам прежде всего пиренейского варианта.

Следует признать, что в этом отношении советская школа испанистики оказалась в сложном положении, рациональный и удовлетворяющий все стороны выход так и не был найден. Нельзя не согласиться с приведенным выше аргументом о том, что «латиноамериканская» произносительная норма не может существовать как объективная реальность. Главная причина этого заключается в том, что никакого «латиноамериканского испанского» в реальности не существует. Хотя соответствующий термин продолжает использоваться в научной литературе и практике преподавания не только нашей страны, его следует признать условным конструктом, удобным в применении, но лишь отдаленно отражающим реальность. В свою очередь языковая реальность, с которой имеют дело испанисты и все изучающие испанский язык, – это разнообразные национальные

варианты латиноамериканских стран, которые могут существенно отличаться друг от друга.

Что же касается фонетической нормы «классического», пиренейского испанского, то во всех рассматриваемых пособиях он трактуется как объективная реальность. Однако здесь необходимо иметь в виду, что испанский язык отличается высокой степенью диалектической вариативности. Это характерно не только для Латинской Америки, но и для самой Испании (существуют андалусский, каталанский, галисийский и ряд других диалектов). Единая литературная произносительная норма существует, но она не является абсолютной.

Среди работ, посвященных переводу, следует особо выделить две: «Пособие по устному переводу с испанского языка для институтов и факультетов иностранных языков» коллектива авторов [37] и работу Н.Д. Арутюновой «Трудности перевода с испанского языка на русский» [38]. Эти пособия ориентированы, прежде всего, не просто на будущих испанистов, но на обучающихся, уже овладевших языком на достаточно высоком уровне: Арутюнова во введении констатирует, что целевая аудитория ее труда – аспиранты 2–3 семестров.

Первое из упомянутых изданий предназначено, в первую очередь, для отработки навыков устного перевода; второе – в большей степени ориентировано на письменный перевод в контексте художественной и общественно-публицистической литературы. Несмотря на то, что пособия носят практический характер (их главная цель – выработка у студентов устойчивой совокупности навыков, необходимых для осуществления качественного перевода), они содержат и значительный теоретический материал. Особенно это касается пособия Арутюновой. В нем отобраны и изложены подробные обзоры наиболее сложных в грамматическом отношении аспектов испанского языка (фразовые глаголы, эмфатические конструкции, особые случаи употребления местоимений и т.п.), которым уделяется мало внимания в общих курсах грамматики. В пособиях по устному переводу рассмотрены и теоретические вопросы. При этом первостепенное внимание сконцентрировано на классификации и анализе трудностей, возникающих в процессе перевода. Авторы делают особый акцент на фонетические и лексические трудности.

Пособие по устному переводу базируется преимущественно на латиноамериканском материале, в особенности на кубинском. Характерна и тематика: индустриализация Кубы, борьба за независимость в Колумбии и т.д. Материалы из работы Арутюновой, как указывает автор, взяты из испанской и латиноамериканской литературы, а также из коммунистической прессы латиноамериканских стран. Это не удивительно: поскольку, как уже отмечалось выше,

контакты практически поддерживались исключительно со странами Латинской Америки, то обращение именно к латиноамериканским материалам с целью подготовки будущих испанистов выглядит бесспорно логичным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершив обзор основных учебников, пособий и прочих работ, оказавших влияние на процесс преподавания, мы можем сделать некоторые выводы относительно аксиологических аспектов преподавания испанского языка в СССР. Их можно поделить на две группы: 1) научные или научно-педагогические; 2) вненаучные. Граница между этими группами не абсолютна, однако ее необходимо провести для максимальной наглядности изучаемого вопроса.

Как явствует из названия, научные аспекты имеют непосредственное отношение к развитию испанистики как научной дисциплины и ее преподаванию. Сюда можно отнести методологию и тематическую направленность изучаемого и, как следствие, преподаваемого материала в рамках курсов испанского языка и испанистики в целом.

Тематическая составляющая отличалась разнообразием и высокой степенью научной проработки. Советские испанисты внесли немалый вклад в изучение различных аспектов испанского языка, и это нашло должное отражение в его преподавании.

Среди вненаучных аспектов особо выделяется идеология. Марксизм-ленинизм не оказал на филологическую методологию СССР такого всеобъемлющего влияния, как это произошло с некоторыми другими гуманитарными дисциплинами (например, с историей), но общий идеологический курс государства влиял на развитие испанистики. Об этом уже говорилось выше: такие события, как гражданская война в Испании и поражение в ней прокоммунистических сил, победа Кубинской революции, отразились на испанистике самым непосредственным образом. Эти события стали четкими маркерами, отразившими важнейшие этапы в истории советской испанистики: систематическое начало изучения и преподавания языка и переориентация этого процесса с испанских реалий на латиноамериканские. Однако эта переориентация не была полной: далеко не везде латиноамериканский компонент учитывался в должной мере. Здесь можно говорить о внутренней логике развития науки, отличной от внешнего идеологического курса.

В завершение можно сделать вывод, что преподавание испанского языка в СССР служит интересным примером сочетания внутренних и внешних воздействий различной природы, которые в разной степени, непосредственно или опосредованно влияют на науку и ее развитие.

Вклад авторов

Е.В. Новосёлова – анализ и обобщение данных литературы, оформление рукописи.

Н.И. Чернова – обоснование концепции исследования, обобщение результатов исследования.

Н.В. Катахова – формулировка выводов, интерпретация результатов исследования.

Authors' contributions

E.V. Novoselova – literature review, writing the text of the article.

N.I. Chernova – research concept, generalization of the study results.

N.V. Katakhova – formulation of the conclusions, interpretation of the study results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шоканова Р.Д., Тарасова Е.Н. Репродуктивный метод в обучении иностранных студентов русскому языку и его инновационные аспекты. *Russian Technological Journal*. 2021;9(3):98–107. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-98-107>
2. Алексеев М.П. Испанистика в свете испано-русских культурных связей. В сб.: *Вопросы испанской филологии*. Материалы I Всесоюзной конференции по испанской филологии. Л.: Изд-во Ленинградского университета; 1974. С. 10–25.
3. Васильева-Шведе О.К. Испанистика в СССР и актуальные проблемы испанской филологии. В сб.: *Вопросы испанской филологии*. Материалы I Всесоюзной конференции по испанской филологии. Л.: Изд-во Ленинградского университета; 1974. С. 25–49.
4. Супрун А.В. *Испанский язык: Библиография иностранной литературы*. Вып. 1: 1953–1963 гг. М.: Институт языкознания, Всесоюзная государственная библиотека иностранной литературы; 1970. 61 с.
5. Щукин А.Н. *Обучение иностранным языкам. Теория и практика*. М.: Филоматис; 2006. 476 с. ISBN 978-5-98111-125-9.
6. Багно В.Е. *Россия и Испания: общая граница*. СПб.: Наука; 2006. 477 с.
7. *Культура Испании*. М.: Издательство Академии Наук СССР; 1940. 497 с.
8. Филиппова О.Н. *Учебник испанского языка*. Курс II. М.: МИВ; 1933. 32 с.
9. Кельин В.Ф. *Учебник испанского языка*. Курс III. М.: МИВ; 1933. 34 с.
10. Васильева О.К. *Учебник испанского языка*. Начальный курс. М.: Товарищество иностранных рабочих в СССР; 1937. 256 с.
11. Шишмарев В.Ф. *Очерки по истории языков Испании*. Л.: Издательство Академии наук СССР; 1941. 338 с.
12. Васильева-Шведе О.К. *Курс испанского языка для высших учебных заведений*. М.: Издательство литературы на иностранных языках; 1948. 718 с.
13. Васильева-Шведе О.К., Степанов Г.В. *Грамматика испанского языка*. М.: Издательство литературы на иностранных языках; 1956. 384 с.
14. *История Испании. От войны за испанское наследство до начала XXI века*; под ред. Линкина М.А., Волосюк О.В., Юрчик Е.Э. М.: Индрик; 2014. 872 с. ISBN 978-5-91674-269-5
15. Степанов Г.В. *Испанский язык в странах Латинской Америки*. М.: Издательство литературы на иностранных языках; 1963. 202 с.
16. Степанов Г.В. *К проблеме языкового варьирования. Испанский язык Испании и Америки*. М.: Наука; 1979. 327 с.
17. Былинкина М.И. *Смысловые особенности испанского языка аргентинцев*. М.: Наука; 1969. 202 с.

REFERENCES

1. Shokanova R.D., Tarasova E.N. Reproductive method in teaching Russian to foreign students and its innovative aspects. *Russ. Technol. J.* 2021;9(3):98–107 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-98-107>
2. Alekseev M.P. Hispanistic in the context of Spanish-Russian cultural relationships. In: *Voprosy ispanskoi filologii (Questions of Spanish Philology)*. Leningrad: Izd. Leningrad. Univ.; 1974. P. 10–25 (in Russ.).
3. Vasil'eva-Shvede O.K. Hispanistic in the USSR and actual problems of the Spanish philology. In: *Voprosy ispanskoi filologii (Questions of Spanish Philology)*. Leningrad: Izd. Leningrad. Univ.; 1974. P. 25–49 (in Russ.).
4. Suprun A.V. *Ispanskii yazyk: Bibliografiya inostranno literature (Spanish language bibliography of the foreign literature)*. Part 1: 1953–1963. Moscow: Institut Yazykoznaneya, Vsesoyuznaya biblioteka inostranno literature; 1971. 61 p. (in Russ.).
5. Shchukin A.N. *Obuchenie inostrannym yazykam. Teoriya i praktika (Teaching foreign languages. Theory and practice)*. Moscow: Filomatis; 2010. 476 p. (in Russ.). ISBN 978-5-98111-125-9
6. Bagno V.E. *Rossiya i Ispaniya: obshchaya granitsa (Russia and Spain: Common border)*. St. Petersburg: Nauka; 2006. 477 p. (in Russ.).
7. *Kul'tura Ispanii (Spanish culture)*. Moscow: Izd. Akad. Nauk SSSR; 1940. 497 p. (in Russ.).
8. Filippova O.N. *Uchebnik ispanskogo yazyka (Spanish textbook)*. 2nd year. Moscow: MIV; 1933. 32 p. (in Russ.).
9. Kelyin V.F. *Uchebnik ispanskogo yazyka (Spanish textbook)*. 3rd year. Moscow: MIV; 1933. 34 p. (in Russ.).
10. Vasil'eva O.K. *Uchebnik ispanskogo yazyka. Nachal'nyi kurs (Spanish textbook: Elementary course)*. Moscow: Tovarichestvo inostrannykh rabochikh v SSSR; 1937. 256 p. (in Russ.).
11. Shishmarev V.F. *Ocherki po istorii yazykov Ispanii (Essays on the history of languages of Spain)*. Leningrad: Izd. Akad. Nauk SSSR; 1941. 338 p. (in Russ.).
12. Vasil'eva-Shvede O.K. *Kurs ispanskogo yazyka dlya vysshikh uchebnykh zavedenii (Spanish language courses for higher education institutions)*. Moscow: Izdatelstvo literatury na inostrannykh yazykakh; 1948. 718 p. (in Russ.).
13. Vasil'eva-Shvede O.K., Stepanov G.V. *Grammatika ispanskogo yazyka (Spanish grammar)*. Moscow: Izdatelstvo literatury na inostrannykh yazykakh; 1956. 384 p. (in Russ.).
14. Lipkin M.A., Volosyuk O.V., Yurchik E.E. (Eds.). *Istoriya Ispanii. Ot voyny za ispanskoe nasledstvo do nachala XXI veka (The history of Spain. From the war of the Spanish succession to the beginning of the 21st century)*. Moscow: Indrik; 2014. 872 p. (in Russ.). ISBN 978-5-91674-269-5
15. Stepanov G.V. *Ispanskii yazyk v stranakh Latinsko Ameriki (Spanish language in Latin America)*. Moscow: Izdatelstvo literatury na inostrannykh yazykakh; 1963. 202 p. (in Russ.).

18. Синявский А.В. К вопросу о единстве испанского языка (о вероятности фрагментации испанского языка в странах Латинской Америки). В сб.: *Семантики некоторых структурных единств современного испанского языка*. М.: Университет дружбы народов; 1978. С. 104–111.
19. Степанов Г.В. Этапы развития испано-американской диалектологии. В сб.: *Philologica. Исследования по языку и литературе. Памяти академика В.М. Жирмунского*. М.–Л.: Наука; 1973. С. 75–82.
20. Великопольская Н.А., Родригес-Данилевская В.И. *Учебник испанского языка*. М.: Издательство литературы на иностранных языках; 1963. 359 с.
21. Romero L.A. *Breve historia contemporánea de la Argentina*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica de Argentina; 2007. 332 p. ISBN 978-950-557-393-6
22. Коршунова Я.Б. *Учебник испанского языка*. М.: Высшая школа; 1971. 282 с.
23. Смычковская Ю.А. *Испанский язык*. Киев: Вища школа; 1975. 318 с.
24. Мамонтов С.П. *Испанский язык. Историко-лингвистический очерк*. М.: Университет дружбы народов; 1966. 46 с.
25. Васильева-Шведе О.К., Степанов В.Г. *Теоретическая грамматика испанского языка. Синтаксис частей речи*. М.: Наука; 1972. 349 с.
26. Канонич С.И. *Пособие по испанскому языку*. Первый курс. М.: Просвещение; 1971. 256 с.
27. Канонич С.И. *Пособие по испанскому языку*. Второй курс. М.: Просвещение; 1971. 270 с.
28. Канонич С.И. *Ситуативно-речевая грамматика испанского языка*. М.: Международные отношения; 1979. 208 с.
29. Фирсова Н.М. *Введение в грамматическую стилистику современного испанского языка*. М.: Высшая школа; 1981. 160 с.
30. Деев М.Н. *Предлоги современного испанского языка*. М.: Высшая школа; 1973. 176 с.
31. Литвиненко Е.В. *История испанского языка (Historia de la lengua española)*. Киев: Вища школа; 1983. 215 с.
32. Пригожина Р.Н., Флорес-Фернандес Х.М. *Вводный фонетический курс испанского языка*. М.: Высшая школа; 1975. 102 с.
33. Висенте-Ривас А.С. *Фонетика испанского языка*. Киев: Вища школа; 1976. 71 с.
34. Карпов Н.В. *Фонетика испанского языка. Теоретический курс*. М.: Высшая школа; 1969. 233 с.
35. Лебедева Н.А. *Фонетика испанского языка. Вводный курс*. Л.: Издательство Ленинградского университета; 1971. 54 с.
36. Тамайо Э. *Коррективный курс фонетики испанского языка*. М.: Государственные центральные курсы заочного обучения; 1965. 114 с.
37. Туровер Г.Я., Триста И.А., Долгопольский А.Б. *Пособие по устному переводу с испанского языка для институтов и факультетов иностранных языков*. М.: Высшая школа; 1967. 262 с.
38. Арутюнова Н.Д. *Трудности перевода с испанского языка на русский*. М.: Наука; 1965. 122 с.
16. Stepanov G.V. *K probleme yazykovogo var'irovaniya. Ispanskii yazyk Ispanii i Ameriki (On the problem of linguistic variation. Spanish language in Spain and America)*. Moscow: Nauka; 1979. 327 p. (in Russ.).
17. Bylinkina M.I. *Smyslovye osobennosti ispanskogo yazyka argentintsev (Semantic features of the Spanish language of Argentines)*. Moscow: Nauka; 1969. 202 p. (in Russ.).
18. Sinyavskii A.V. On the question of the unity of the Spanish language (on the probability of fragmentation of the Spanish language in Latin America). In: *Semantiki nekotorykh strukturnykh edinstv sovremennogo ispanskogo yazyka (Semantics of some structural units of the modern Spanish language)*. Moscow: RUDN; 1978. P. 104–111 (in Russ.).
19. Stepanov G.V. Stages of development of Spanish-American dialectology. In: *Philologica. Issledovaniya po yazyku i literature. Pamyati akademika V.M. Zhirmunskogo (Philologica. Language and literature studies. To the memory of Academician V.M. Zhirmunskii)*. Moscow–Leningrad: Nauka; 1973. P. 75–82 (in Russ.).
20. Velikopolskaya N.A., Rodriguez–Danilevskaya V.I. *Uchebnik ispanskogo yazyka (Textbook of Spanish language)*. Moscow: Izdatelstvo literatury na inostrannykh yazykakh; 1963. 359 p. (in Russ.).
21. Romero L.A. *Breve historia contemporánea de la Argentina*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica de Argentina; 2007. 332 p. (in Spanish). ISBN 978-950-557-393-6
22. Korshunova Ya.B. *Uchebnik ispanskogo yazyka (Spanish textbook)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1971. 282 p. (in Russ.).
23. Smychkovskaya Yu.A. *Ispanskii yazyk (Spanish language)*. Kiev: Vischa shkola; 1975. 318 p. (in Russ.).
24. Mamontov S.P. *Ispanskii yazyk. Istoriko-lingvisticheskii ocherk (Spanish language. A historical and linguistic essay)*. Moscow: RUDN; 1966. 46 p. (in Russ.).
25. Vasil'eva-Shvede O.K., Stepanov V.G. *Teoreticheskaya grammatika ispanskogo yazyka. Sintaksis chastei rechi (Theoretical grammar of the Spanish language. Morphology and syntax of parts of speech)*. Moscow: Nauka; 1972. 349 p. (in Russ.).
26. Kanonich S.I. *Posobie po ispanskomu yazyku, 1 god (Spanish language handbook. 1st year)*. Moscow: Prosveshchenie; 1971. 256 p. (in Russ.).
27. Kanonich S.I. *Posobie po ispanskomu yazyku. 2 god (Spanish language handbook. 2nd year)*. Moscow: Prosveshchenie; 1971. 270 p. (in Russ.).
28. Kanonich S.I. *Situativno-rechevaya grammatika ispanskogo yazyka (Situational speech grammar of the Spanish language)*. Moscow: Mezhdunarodnye otnosheniya; 1979. 208 p. (in Russ.).
29. Firsova N.M. *Vvedenie v grammaticheskuyu stilistiku sovremennogo ispanskogo yazyka (Introduction to grammatical stylistics of modern Spanish language)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1981. 160 p. (in Russ.).
30. Deev M.N. *Predlogi sovremennogo ispanskogo yazyka (Prepositions of the modern Spanish language)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1973. 176 p. (in Russ.).
31. Litvinenko E.V. *Historia de la lengua española*. Kiev: Vishcha shkola; 1983. 215 p. (in Spanish).
32. Prigozhina R.N., Flores-Fernandez J.M. *Vvodnyi foneticheskii kurs ispanskogo yazyka (Phonetics of the Spanish language. Introductory course)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1975. 102 p. (in Russ.).
33. Vicente Rivas A.S. *Fonetika ispanskogo yazyka (Spanish phonetics)*. Kiev: Vischa shkola; 1976. 71 p. (in Russ.).

34. Karpov N.V. *Fonetika ispanskogo yazyka. Teoreticheskii kurs* (Spanish phonetics. Theoretical course). Moscow: Vysshaya shkola; 1969. 233 p. (in Russ.).
35. Lebedeva N.A. *Fonetika ispanskogo yazyka. Vvodnyi kurs* (Spanish phonetics. Introductory course). Leningrad: Izd. Leningrad. Univ.; 1971. 54 p. (in Russ.).
36. Tamayo E. *Korrektivnyi kurs fonetiki ispanskogo yazyka* (A remedial course of Spanish phonetics). Moscow: Gosudarstv. tsentral. kursy zaobnogo obucheniya; 1965. 114 p. (in Russ.).
37. Turover G.Ya., Trista I.A., Dolgopolsky A.B. *Posobie po ustnomu perevodu s ispanskogo yazyka dlya institutov i fakul'tetov inostrannykh yazykov* (Textbook of interpreting from Spanish for institutes and faculties of foreign languages). Moscow: Vysshaya shkola; 1967. 262 p. (in Russ.).
38. Arutyunova N.D. *Trudnosti perevoda s ispanskogo yazyka na russkii* (Difficulties of translation from Spanish into Russian). Moscow: Nauka; 1965. 122 p. (in Russ.).

Об авторах

Новосёлова Елена Владимировна, к.ист.н., доцент, кафедра иностранных языков Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: novosyolova@mirea.ru. Scopus Author ID 57223021781, SPIN-код РИНЦ 4025-5882, <https://orcid.org/0000-0001-8593-8572>

Чернова Надежда Ивановна, д.пед.н., профессор, заведующий кафедрой иностранных языков Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: chernova@mirea.ru. Scopus Author ID 57194042371, SPIN-код РИНЦ 7391-4040, <https://orcid.org/0000-0002-5685-9733>

Катахова Наталия Владимировна, к.пед.н., доцент, кафедра иностранных языков Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: katakhova@mirea.ru. Scopus Author ID 57204175929, SPIN-код РИНЦ 2552-5380

About the authors

Elena V. Novoselova, Cand. Sci. (Hist.), Associate Professor, Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: novosyolova@mirea.ru. Scopus Author ID 57223021781, RSCI SPIN-code 4025-5882, <https://orcid.org/0000-0001-8593-8572>

Nadezhda I. Chernova, Dr. Sci. (Pedagog.), Professor, Head of Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: chernova@mirea.ru. Scopus Author ID 57194042371, RSCI SPIN-code 7391-4040, <https://orcid.org/0000-0002-5685-9733>

Nataliya V. Katakhova, Cand. Sci. (Pedagog.), Associate Professor, Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: katakhova@mirea.ru. Scopus Author ID 57204175929, RSCI SPIN-code 2552-5380

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 30.09.2022 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 15.

Тираж 100 экз. Заказ № 791.

Подписку на печатную версию

Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print September 30, 2022.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 15.

100 copies. Order No. 791.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

