

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, № 2

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 2

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



Russian Technological Journal
2022, том 10, № 2

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 2

Дата опубликования 31 март 2022 г.

Publication date March 31, 2022.

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.

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.

Периодичность: один раз в два месяца.

Periodicity: bimonthly.

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).

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).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

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.

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.

Главный редактор:

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

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.

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.

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.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 81733
от 19.08.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).

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

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

Редакционная коллегия

- Кудж
Станислав Алексеевич** д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Банис
Юрас Йонович** хабилитированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Бетелин
Владимир Борисович** академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Боков
Алексей Алексеевич** 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
- Да
Сью Ли** 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** Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Vladimir B. Betelin** Academician at the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Alexei A. Bokov** 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
- Xu Li Da** 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

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Д.А. Иванов

- 7** Волоконно-оптические WDM-мультиплексоры/демультиплексоры с малыми изгибными потерями

Ю.Г. Рябов, Н.М. Легкий, Г.В. Ломаев

- 14** Безопасность электромагнитных факторов на компьютерных рабочих местах в жилых помещениях

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

Н.Э. Шерстюк

- 28** Локальные пьезоэлектрические свойства перфорированных сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция

Аналитическое приборостроение и технологии

А.В. Крюков

- 35** Применение комплексного метода для улучшения качества изготовления деталей приборов радиоэлектронной борьбы

Управление качеством продукции. Стандартизация

М.И. Бойчук, В.Е. Кривоногов, С.А. Микаева, Л.А. Васильева

- 43** Исследование надежностных характеристик кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах

Математическое моделирование

- 51** *В.П. Савиных, С.Г. Господинов, С.А. Кудж, В.Я. Цветков, И.П. Дешко*
Семантика визуальных моделей в космических исследованиях

Л.А. Демидова, А.В. Горчаков

- 59** Применение биоинспирированных алгоритмов глобальной оптимизации для повышения точности прогнозов компактных машин экстремального обучения

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств.

Управление в организационных системах

И.А. Мандыч, А.В. Быкова, О.Б. Гейман

- 75** Особенности оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов

Мировоззренческие основы технологии и общества

- 87** *А.А. Шарапов, Е.С. Горнев*

Определение источников знаний о технологиях микро- и нанoeлектроники

Исправления

С.В. Шайтура, П.И. Питкевич

- 96** Исправления к статье «Методы резервирования данных для критически важных информационных систем предприятия»

Contents

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 7** *Dmitry A. Ivanov*
Fiber optical WDM multiplexers/demultiplexers with low bending losses

- Yuri G. Ryabov, Nikolai M. Legkiy, Geliy V. Lomaev*
14 Safety of electromagnetic factors for the workplace equipped with personal computers in residential premises

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- Natalia E. Sherstyuk*
28 Local piezoelectric properties of perforated ferroelectric barium–strontium titanate films

Analytical instrument engineering and technology

- Anton V. Kryukov*
35 Application of an integrated method to improve the quality of manufacturing parts of electronic warfare devices

Product quality management. Standardization

- Maksim I. Boychuk, Vladislav E. Krivonogov, Svetlana A. Mikaeva, Lyubov A. Vasilieva*
43 Study of the reliability of quartz resonators in miniature ceramic packages

Mathematical modeling

- Viktor P. Savinykh, Slaveiko G. Gospodinov, Stanislav A. Kudzh,*
51 *Viktor Ya. Tsvetkov, Igor P. Deshko*
Semantics of visual models in space research
- Liliya A. Demidova, Artyom V. Gorchakov*
59 Application of bioinspired global optimization algorithms to the improvement of the prediction accuracy of compact extreme learning machines

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

- Irina A. Mandych, Anna V. Bykova, Olga B. Gaiman*
75 Features of assessing the investment attractiveness of high-tech projects

Philosophical foundations of technology and society

- Andrey A. Sharapov, Evgeny S. Gornev*
87 Identification of knowledge sources for micro- and nanoelectronics technologies

Erratum

- Sergey V. Shaytura, Pavel I. Pitkevich*
96 Erratum to the article “Data backup methods for mission-critical information systems”

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 681.7.068
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-7-13>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Волоконно-оптические WDM-мультиплексоры/демультиплексоры с малыми изгибными потерями

Д.А. Иванов [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: d.ivanov@tmvos.com

Резюме

Цели. Одной из актуальных задач развития радиоэлектронных систем различного назначения является резкое увеличение объема и скорости передачи информации между элементами этих систем. Такая задача наиболее успешно решается с использованием средств волоконно-оптической техники, не имеющих альтернативы по ряду показателей. Применение оптических волокон (ОВ) в качестве физической среды позволило осуществить передачу больших потоков информации на значительные расстояния. Увеличение пропускной способности систем связи подталкивает производителей к разработке новых марок ОВ с улучшенными оптическими и эксплуатационными характеристиками, что позволяет усовершенствовать различные оптические компоненты, которые используют волоконный световод в качестве активной среды передачи информации. Наиболее широко используемыми в волоконно-оптических системах связи (ВОСС) являются двухканальные одномодовые WDM-мультиплексоры/демультиплексоры, представляющие собой вид спектрально-селективных разветвителей. Среди преимуществ WDM-мультиплексирования стоит отметить передачу большого объема информации по одному ОВ за счет организации каналов на разных длинах волн, возможность передавать по одному ОВ одновременно в обоих направлениях сигналы нескольких длин волн, которые не взаимодействуют друг с другом (дуплексная связь). В процессе эксплуатации WDM-мультиплексоры могут подвергаться различным внешним воздействиям, влияющим на работу и стабильность параметров устройства. В настоящее время отсутствуют данные по влиянию изгибов ОВ на оптические характеристики WDM-мультиплексоров. В связи с этим актуальным является исследование данной зависимости, которое включает в себя измерение параметров оптической изоляции и вносимых потерь. Цель работы – отработка технологии изготовления и исследование изготовленных WDM-мультиплексоров на основе определенных видов ОВ, устойчивых к изгибу.

Методы. Для формирования двухволновых WDM-мультиплексоров использована технология сплавной биконической вытяжки (FBT), позволяющей достичь низких вносимых потерь одновременно с высокой степенью изоляции каналов в широком диапазоне температур.

Результаты. В работе рассмотрены возможности изготовления волоконных мультиплексоров на основе изгибоустойчивого волокна Corning SMF-28 Ultra. Представлены результаты изготовления и исследования оптических характеристик экспериментальных образцов WDM-мультиплексоров. Установлено, что применение кварцевого волокна SMF-28 Ultra позволило существенно снизить девиацию оптической изоляции каналов при возникновении механических напряжений в световодной структуре мультиплексоров.

Выводы. Экспериментально показана возможность создания двухволновых мультиплексоров с малыми изгибными потерями и оптической изоляцией до 20–22 дБ. Рассмотрены возможные механизмы влияния скручивания волоконных выводов мультиплексора на оптическую изоляцию каналов. Полученные

результаты показывают, что при возникновении механических напряжений в сплавленной структуре мультиплексора изменение коэффициента оптической изоляции на двух рабочих длинах волн не превышало 1 дБ.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы связи, изгибоустойчивое оптическое волокно, мультиплексор, WDM-мультиплексор, FBT-технология, область связи

• Поступила: 18.06.2021 • Доработана: 19.10.2021 • Принята к опубликованию: 23.02.2022

Для цитирования: Иванов Д.А. Волоконно-оптические WDM-мультиплексоры/демультиплексоры с малыми изгибными потерями. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):7–13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-7-13>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Fiber optical WDM multiplexers/demultiplexers with low bending losses

Dmitry A. Ivanov @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ *Corresponding author, e-mail: d.ivanov@tmvos.com*

Abstract

Objectives. One of the topical tasks in the development of radio electronic systems for various purposes is a sharp increase in the volume and data transfer rate between the elements of the system. This problem is most successfully solved using fiber optic technology, which has no alternative to meet a number of indicators. The use of optical fibers (OF) as a physical medium made it possible to transfer large information flows over considerable distances. Increasing the capacity of communication systems is pushing manufacturers to develop new OF brands with improved optical and operational characteristics, which makes it possible to improve various optical components that use an OF as an active information transmission medium. The dual-channel single-mode wavelength division multiplexing (WDM) multiplexers/demultiplexers, which are one of spectral selective splitters types, are most widely used in fiber-optic communication systems. Among the advantages of WDM, it is worth to note the transmission of a large amount of information over one OF by the arrangement of channels at different wavelengths and the ability to transmit signals of several wavelengths simultaneously in both directions via one OF that do not interact with each other (duplex communication). During operation, WDM multiplexers can be subjected to various external influences that affect the operation and stability of the device parameters. Currently, there are no data on the effect of OF bending on the optical characteristics of WDM multiplexers. In this regard, it is important to study this dependence, which includes measuring the parameters of optical isolation and insertion loss. The purpose of the study is to work out the manufacturing technology and investigate the manufactured WDM multiplexers based on certain types of bend-resistant OF.

Methods. For the formation of two-channel WDM multiplexers, the technology of fused biconical tapering was used, which makes it possible to achieve low insertion loss along with a high degree of channel isolation in the wide temperature range.

Results. In the paper, the possibilities of manufacturing fiber multiplexers based on bend-resistant fiber Corning SMF-28 Ultra were discussed. The results of manufacturing and studying the experimental samples of WDM multiplexers optical characteristics were presented. It was established that the use of SMF-28 Ultra quartz fiber made it possible to significantly reduce the deviation of the channel optical isolation in the event of mechanical stresses in the multiplexers OF structure.

Conclusions. The possibility of creating two-channel multiplexers with low bending losses and optical isolation up to 20–22 dB was experimentally shown. Possible mechanisms of the influence of the multiplexer fiber twisting on the optical isolation of channels were considered. The results obtained showed that when mechanical stresses in the fused structure of the multiplexer occur, the change in the optical isolation coefficient at two operating wavelengths does not exceed 1 dB.

Keywords: fiber-optic communication systems, bend-resistant optical fiber, multiplexer, WDM multiplexer, fused biconical taper technology, coupling region

• Submitted: 18.06.2021 • Revised: 19.10.2021 • Accepted: 23.02.2022

For citation: Ivanov D.A. Fiber optical WDM multiplexers/demultiplexers with low bending losses. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):7–13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-7-13>

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

Современные волоконно-оптические системы связи (ВОСС) характеризуются постоянным ростом пропускной способности, совершенствованием эксплуатационных характеристик оптических компонентов и все более широким внедрением оптоволоконных устройств в аппаратуру специальной техники. Это предъявляет повышенные требования к надежности, миниатюризации и эксплуатационным характеристикам компонентов ВОСС [1].

В последние годы ВОСС со спектральным уплотнением каналов активно применяются в различных телекоммуникационных системах. Для реализации таких систем часто используются специальные пассивные оптические устройства – сплавные WDM-мультиплексоры/демультиплексоры (англ. Wavelength Division Multiplexing, WDM), предназначенные для объединения и разделения нескольких информационных сигналов с длинами волн 1.31 мкм и 1.55 мкм и передачи их по одному оптическому волокну (ОВ) [2]. Такие устройства давно используются на рынке и хорошо зарекомендовали себя благодаря достаточно высокому уровню характеристик и невысокой стоимости. Выпускаемые в настоящее время рядом ведущих фирм и предприятий мультиплексоры обычно изготавливаются из стандартного волокна Corning SMF-28e+ категории G.652.D, которое активно применяется для использования в городских сетях и сетях доступа. Однако у такого волокна есть один существенный недостаток – это прирост потерь, вызванный макроизгибами, которые ухудшают качество связи при передаче и приеме данных [3–5]. Поэтому мультиплексоры на основе этого волокна тоже подвержены влиянию изгибов волоконных выводов и, как следствие, ухудшению своих оптических характеристик.

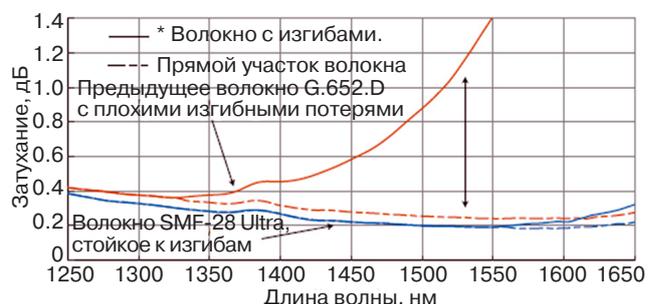
В работе рассмотрены вопросы технологии изготовления и возможность формирования сплавных

мультиплексоров на основе изгибоустойчивого одномодового волокна Corning SMF-28 Ultra¹, представлены результаты изготовления и исследования оптических характеристик экспериментальных образцов WDM-мультиплексоров.

КВАРЦЕВОЕ ИЗГИБОУСТОЙЧИВОЕ ВОЛОКНО CORNING SMF-28 ULTRA

Одномодовое волокно Corning SMF-28 Ultra с улучшенными оптическими характеристиками по затуханию и стойкостью к изгибным потерям, превышающими требования ITU-T G.657.A1, дает возможность для модернизации существующих волоконно-оптических устройств телекоммуникаций, в частности, двухволновых WDM-мультиплексоров, световодная структура которых чувствительна к различным воздействующим факторам.

На рис. 1 показана зависимость затухания от изгибов в стандартном волокне G.652.D и в изгибоустойчивом волокне SMF-28 Ultra [6].



* Затухание 1 км волокна с 10 витками диаметром 30 мм.

Рис. 1. Прирост затухания на изгибах в стандартном волокне G.652.D и в изгибоустойчивом волокне SMF-28 Ultra

¹ SMF-28[®] Ultra Optical Fibers. URL: <https://www.corning.com/ru/ru/products/communication-networks/products/fiber/smf-28-ultra.html>, дата обращения 07.06.2021. [SMF-28[®] Ultra Optical Fibers. URL: <https://www.corning.com/ru/ru/products/communication-networks/products/fiber/smf-28-ultra.html>. Accessed June, 7, 2021. (in Russ.)]

Из рис. 1 видно, что при больших длинах волн, когда оптический сигнал в меньшей степени зависит от сердцевины одномодового ОВ, потери на изгиб значительно возрастают в волокне G.652.D по сравнению с изгибоустойчивым волокном SMF-28 Ultra.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ WDM-МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКНА CORNING SMF-28 ULTRA

Технология изготовления волоконно-оптических двухволновых WDM-мультиплексоров с малыми изгибными потерями основана на сплавлении двух нечувствительных к изгибу волокон SMF-28 Ultra с одновременным растяжением участка разветвления с целью получения плавного биконического сужения, необходимого для эффективной волноводной связи между волокнами (технология Fused Biconical Taper, FBT) [7].

Метод создания одномодового WDM-мультиплексора иллюстрируется на рис. 2 [8].

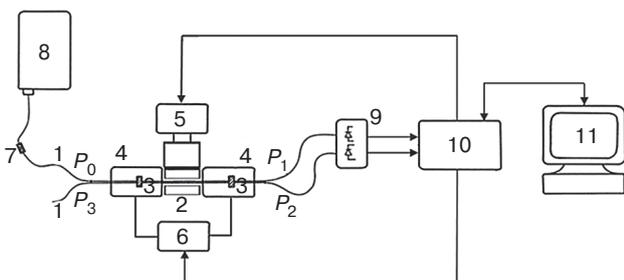


Рис. 2. Структурная схема устройства для изготовления сплавных WDM-мультиплексоров:

- 1 – оптические волокна SMF-28 Ultra;
- 2 – высокотемпературный нагреватель; 3 – узлы прижима волокон; 4 – подвижные каретки; 5 – блок питания нагревателя; 6 – блок электропривода;
- 7 – место сварки пигтейла с волокном SMF-28 Ultra;
- 8 – источник оптического излучения; 9 – фотодетектор; 10 – блок управления; 11 – персональный компьютер

Заранее подготовленные и очищенные на длине ≈ 35 мм от защитного внешнего покрытия участки волокон SMF-28 Ultra соединялись между собой с помощью скрутки вокруг продольной оси на один полный оборот (рис. 3), образуя участок разветвления для формирования мультиплексора, закреплялись на каретках и помещались в нагреватель.

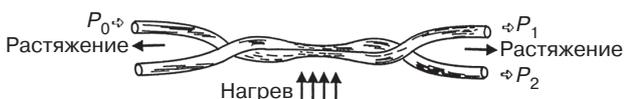


Рис. 3. Участок разветвления из двух скрученных ОВ

Во время изготовления мультиплексоров контролировались текущие значения мощности излучения P_1 и P_2 , поступающего с выходных каналов

мультиплексора на фотоприемники компьютеризированной измерительной системы [9]. Процесс прекращался при достижении определенной длины области связи (z), необходимой для спектральной селекции двух длин волн (рис. 4) [10, 11].

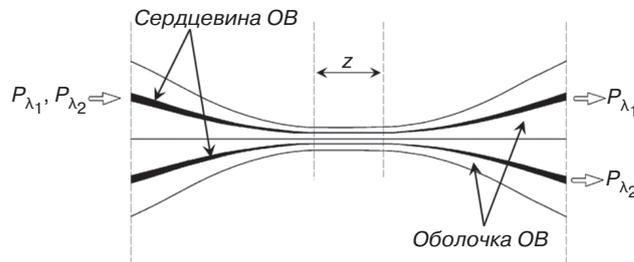


Рис. 4. Схематическое изображение FBT-мультиплексора

Одними из основных характеристик сплавных WDM-мультиплексоров являются вносимые потери $A_{вн}$ и коэффициент изоляции $K_{из}$, который определяет уровень ослабления сигнала в каналах, где этот сигнал не является основным. Для данного устройства указанные выше параметры определяются следующими выражениями:

$$A_{вн} = 10 \lg \frac{P_0}{P_i}; K_{из} = 10 \lg \frac{P_0}{P_j}; j \neq i = 1, 2, \quad (1)$$

где P_0 – оптическая мощность во входном канале на длине волны λ_i ; P_i – оптическая мощность на выходе i -го (основного) канала на длине волны λ_i ; P_j – оптическая мощность в j -м (неосновном) канале на длине волны λ_j .

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к оптическим разветвителям для систем спектрального уплотнения, являются обеспечение заданного коэффициента деления между каналами с минимальными отклонениями от заданного значения и минимальная величина вносимого затухания в пределах всего рабочего спектрального диапазона [12, 13].

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ WDM-МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ

В настоящей работе FBT-мультиплексоры изготавливались на японской установке FCI-0201 фирмы NTT AT с керамическим микронагревателем [14–16].

На рис. 5 представлен метод формирования световодных биконических структур [17].

Для успешного изготовления WDM-мультиплексоров на основе волокна SMF-28 Ultra была отработана технология с оптимальными температурно-временными параметрами процесса. Температура нагрева зоны сплавления волокон составляла 1500–1550 °С, скорость растяжения уменьшалась с 60 мкм/с в начале процесса до 10 мкм/с в конце.

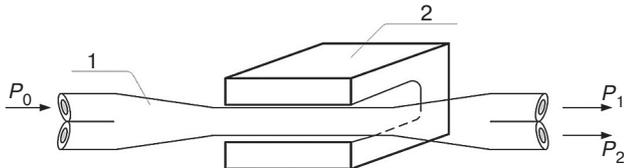


Рис. 5. Метод изготовления мультиплексоров:
1 – оптические волокна SMF-28 Ultra;
2 – керамический микронагреватель

В процессе растяжения и формирования биконической перетяжки отображалось изменение мощности излучения P_1 и P_2 в волоконных выходах мультиплексора, и контролировались вносимые потери для длины волны 1550 нм (рис. 6). Время растяжения образца при сплавлении составляло около 431 с. Длина биконического сужения после сплавления составляла 17.26 мм, а общая длина световодной структуры мультиплексора – 53 мм. Вносимые потери изготовленного образца не превышали 0.1 дБ. Коэффициент оптической изоляции каналов WDM-мультиплексора составил 20–22 дБ.

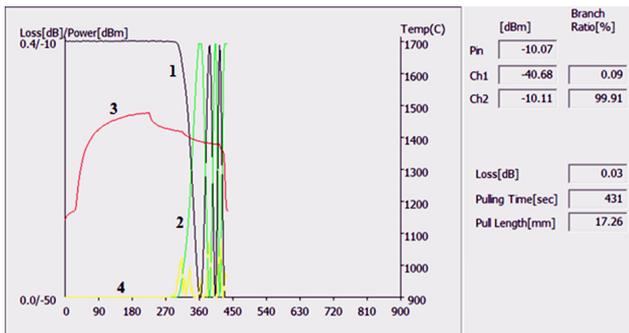


Рис. 6. Результат изготовления WDM-мультиплексора:

- 1 – мощность излучения P_1 на выходе канала Ch1;
- 2 – мощность излучения P_2 на выходе канала Ch2;
- 3 – температура нагрева зоны сплавления волокон;
- 4 – вносимые потери

Стабильность характеристик WDM-мультиплексоров в условиях эксплуатации в значительной степени зависит от их световодной структуры. Различные механические воздействия, которым может подвергаться мультиплексор в процессе эксплуатации, могут приводить к деформации его биконической структуры и, как следствие, к уменьшению коэффициента изоляции и нарушению работы линии передачи [18].

Одним из возможных механических воздействий, влияющих на перераспределение оптической мощности в каналах и изменение величины оптической изоляции, может являться скручивание

световодной структуры сформированных мультиплексоров. Такой эффект наблюдался при исследовании мультиплексоров на основе стандартного волокна SMF-28e+ [19].

Был проведен эксперимент с мультиплексорами, изготовленными на основе изгибоустойчивых волокон SMF-28 Ultra, по исследованию влияния скручивания сплавной структуры на оптическую изоляцию каналов. Для этого один участок (1) волоконных выводов (2) мультиплексора со стороны источника оптического излучения вращался вокруг оптической оси биконической структуры, а другой участок (3) со стороны оптического приемника был зафиксирован (рис. 7). Расстояние l между участками 1 и 2 волокон составляло 200 мм. В процессе эксперимента проводилось непрерывное измерение коэффициентов изоляции на двух рабочих длинах волн $\lambda_1 = 1310$ нм и $\lambda_2 = 1550$ нм.

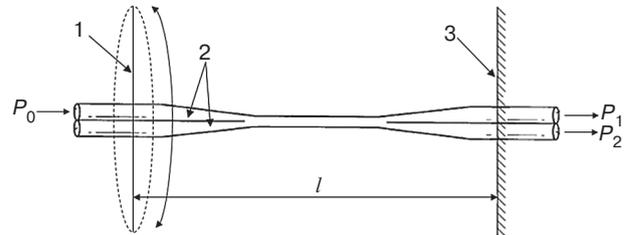


Рис. 7. Схематическое изображение скручивания волоконной структуры WDM-мультиплексора

В результате проведенного исследования установлено, что при возникновении механических напряжений в сплавленной структуре мультиплексора изменение коэффициента оптической изоляции на двух рабочих длинах волн не превышало 1 дБ. Применение кварцевых волокон SMF-28 Ultra позволило существенно снизить девиацию оптической изоляции каналов при возникновении механических напряжений в световодной структуре мультиплексоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведен метод изготовления сплавных одномодовых мультиплексоров из волокна Corning SMF-28 Ultra. Исследованы оптические характеристики изготовленных образцов. Рассмотрены возможные механизмы влияния скручивания волоконных выводов мультиплексора на оптическую изоляцию каналов. Экспериментально показана возможность создания двухволновых мультиплексоров с малыми изгибными потерями и оптической изоляцией до 20–22 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лутченко С.С., Копытов Е.Ю., Богачков И.В. Оценка надежности ВОЛС с учетом влияния внешних факторов. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017;5(4):34–39. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2017-5-4-34-39>
2. Иванов В.И. *Применение технологии WDM в современных сетях передачи информации*. Казань: ЗАО «Новое знание»; 2012. 223 с. ISBN 978-5-89347-679-8
3. Беспрозванных В.Г., Мосунова И.Д. Оптические характеристики одномодовых изгибоустойчивых волокон при укладке в малых замкнутых объектах. *Инновационная наука*. 2019;1:19–23.
4. Мосунова И.Д., Селезнев Д.А., Ременникова М.В. Исследование спектрального пропускания оптического волокна при малых изгибах. *Прикладная фотоника*. 2019;6(1–2):17–23.
5. Matthijsse P., Kuyt G. Влияние изгибов оптических волокон на их характеристики. *Кабели и провода*. 2005;4(293):17–22.
6. Дорожкин А., Наний О., Трещиков В., Шихалиев И. Волокно с малыми изгибными потерями – новая жизнь для систем связи диапазона C+L. *Первая Милля*. 2018;8(77):48–53. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2018.77.8.48.53>
7. Рождественский Ю.В. Сплавные волоконно-оптические мультиплексоры/демультиплексоры и их применение в телекоммуникационных системах. *Фотон-Экспресс*. 2004;1(31):16–18.
8. Берикашвили В.Ш., Елизаров С.Г., Ключник Н.Т., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Волоконные WDM-мультиплексоры с уменьшенным спектральным интервалом между каналами. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2014;14(5):112–115.
9. Басиладзе Г.Д., Бержанский В.Н., Долгов А.И., Милукова Е.Т. Преобразование сердцевин волокон в условиях слабого и сильного сплавления оптического разветвителя. *Вестник Физико-технического института Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского*. 2010;23(62):75–80.
10. Берикашвили В.Ш., Дементьев С.Г., Ключник Н.Т., Яковлев М.Я. Спектрально-селективные оптические разветвители с повышенной изоляцией каналов. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2011;11(1):190–193.
11. Hui R., O’Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier; 2009. 672 p. ISBN: 978-0-12-373865-3
12. Базакуца П.В., Боев М.А., Никитин А.И. Исследование спектральных характеристик оптических разветвителей. *Фотон-Экспресс*. 2019;6(158):178–179. <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16089>
13. Шестаков И.И. Анализ применимости FBT-разветвителей 1×2 в сетях PON. *Век качества*. 2019;3:137–148.
14. Takeuchi Y., et al. Characteristics of ceramic microheater for fiber coupler fabrication. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998;37(6):3665–3668. <https://doi.org/10.1143/JJAP.37.3665>
15. Takeuchi Y., Horiguchi M. Microheater control of wavelength-flattened fiber coupler properties. *Appl. Opt.* 1994;33(6):1029–1034. <https://doi.org/10.1364/AO.33.001029>

REFERENCES

1. Lutchenko S.S., Kopytov E.Yu., Bogachkov I.V. Evaluation of FOCL reliability taking into account the impact of external factors. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin = Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2017;5(4):34–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2017-5-4-34-39>
2. Ivanov V.I. *Primenenie tekhnologii WDM v sovremennykh setyakh peredachi informatsii (Application of WDM technology in modern information transmission networks)*. Kazan: Novoe znanie; 2012. 223 p. (in Russ.). ISBN 978-5-89347-679-8
3. Besprozvannykh V.G., Mosunova I.D. Optical characteristics of single-mode bend-resistant fibers at construction in small closed objects. *Innovatsionnaya Nauka = Innovation Science*. 2019;1:19–23 (in Russ.).
4. Mosunova I.D., Seleznev D.A., Remennikova M.V. Research of the spectral transmittance of optical fibers at small bends. *Prikladnaya fotonika = Applied Photonics*. 2019;6(1–2):17–23 (in Russ.).
5. Matthijsse P., Kuyt G. Influence of bending of optical fibers on their characteristics. *Kabeli i Provoda = Cables and Wires*. 2005;4(293):17–22 (in Russ.).
6. Dorozhkin A., Nanii O., Treshchikov V., Shikhaliyev I. Low bending loss fiber – a new life for C+L communication systems. *Pervaya Milya = Last Mile*. 2018;8(77):48–53 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2018.77.8.48.53>
7. Rozhdestvenskii Yu.V. Fusion fiber-optic multiplexers/demultiplexers and their application in telecommunication systems. *Foton-Express*. 2004;1(31):16–18 (in Russ.).
8. Berikashvili V.Sh., Elizarov S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. WDM fiber multiplexers with reduced spectral spacing between channels. *Fundamental’nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya = Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction*. 2014;5:112–115 (in Russ.).
9. Basiladze G.D., Berzhanskiy V.N., Dolgov A.I., Milyukova E.T. Transformation of the fiber cores under conditions of weak and strong fusing of optical coupler. *Vestnik Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Physics and Mathematics Sciences*. 2010;23(62):75–80 (in Russ.).
10. Berikashvili V.Sh., Dement’ev S.G., Klyuchnik N.T., Yakovlev M.Ya. Spectral selective optical splitters with increased channel isolation. *Fundamental’nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya = Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction*. 2011;11(1):190–193 (in Russ.).
11. Hui R., O’Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier; 2009. 672 p. ISBN: 978-0-12-373865-3
12. Bazakutsa P.V., Boyev M.A., Nikitin A.I. Investigation of the spectral characteristics of optical splitters. *Foton-Express = Foton-Express*. 2019;6(158):178–179 (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16089>
13. Shestakov I.I. Analysis of applicability of FBT 1×2 splitters on PON networks. *Vek kachestva = Age of Quality*. 2019;3:137–148 (in Russ.).

16. Takeuchi Y. Characteristics analysis of wavelength-division-multiplexing fiber couplers fabricated with a microheater. *Appl. Opt.* 1996;35(9):1478–1484. <https://doi.org/10.1364/ao.35.001478>
17. Дементьев С.Г., Ключник Н.Т., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Волоконно-оптические демультиплексоры для систем передачи информации. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2010;2:43–46.
18. Беспрозванных В.Г., Мосунова И.Д., Носова Е.А., Кривошеев А.И. Исследование характеристик сплавных волоконных разветвителей на основе изгибоустойчивого волокна. *Прикладная фотоника*. 2021;8(1):51–67.
19. Ключник Н.Т., Дементьев С.Г., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Одномодовые спектрально-селективные разветвители с повышенной механической стойкостью. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2010;10(1):164–167.
14. Takeuchi Y., et al. Characteristics of ceramic microheater for fiber coupler fabrication. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998;37(6):3665–3668. <https://doi.org/10.1143/JJAP37.3665>
15. Takeuchi Y., Horiguchi M. Microheater control of wavelength-flattened fiber coupler properties. *Appl. Opt.* 1994;33(6):1029–1034. <https://doi.org/10.1364/AO.33.001029>
16. Takeuchi Y. Characteristics analysis of wavelength-division-multiplexing fiber couplers fabricated with a microheater. *Appl. Opt.* 1996;35(9):1478–1484. <https://doi.org/10.1364/ao.35.001478>
17. Dement'ev S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. Fiber-optic demultiplexers for information transmission systems. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*. 2010;2:43–36 (in Russ.).
18. Besprozvannykh V.G., Mosunova I.D., Nosova E.A., Krivosheev A.I. Investigation of the characteristics of fusion fiber splitters based on bend-resistant fiber. *Prikladnaya fotonika = Applied Photonics*. 2021;8(1):51–67 (in Russ.).
19. Dement'ev S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. Singlemode wavelength-selective splitters with increased mechanical resistance. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya = Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction*. 2010;10(1):164–167 (in Russ.).

Об авторе

Иванов Дмитрий Александрович, аспирант кафедры оптико-электронных приборов и систем Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: d.ivanov@tmvos.com. <https://orcid.org/0000-0001-5437-7522>

About the author

Dmitry A. Ivanov, Postgraduate Student, Department of Optoelectronic Devices and Systems, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: d.ivanov@tmvos.com. <https://orcid.org/0000-0001-5437-7522>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621: 624: 614.7.8
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-14-27>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Безопасность электромагнитных факторов на компьютерных рабочих местах в жилых помещениях

Ю.Г. Рябов¹,
Н.М. Легкий^{1, @},
Г.В. Ломаев²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, Ижевск, 426069 Россия

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

Резюме

Цель. Проанализировать электромагнитную безопасность электрических сетей промышленной частоты (ПЧ) 50 Гц в жилых домах при длительной работе на рабочих местах (РМ) с персональными компьютерами (ПК). Выработать рекомендации по уменьшению воздействия уровней электромагнитных полей (ЭМП) ПЧ на здоровье людей в жилых помещениях.

Методы. В соответствии с российскими и международными нормативными документами проведены измерения и расчеты электромагнитных полей в жилых помещениях, где применяется однофазная система электроснабжения типа TN ПЧ, регламентированная правилами эксплуатации электроустановок.

Результаты. Выявлено, что на РМ с ПК электромагнитные поля, индуцируемые сетями типа TN, существенно возрастают, превышая предельно допустимые уровни: 25 В/м и 0.25 мкТл, рекомендуемые санитарно-эпидемиологическими требованиями. На жилые здания требования служб Энергонадзора не распространяются, поэтому любые непрофессиональные переделки электрических сетей в квартирах и использование несертифицированных удлинителей приводят к искрообразованию, появлению высокочастотных гармоник и, в свою очередь, к дискомфортным условиям, влияющим на здоровье, а также к электропоражениям, пожарам и взрывам газа.

Выводы. Показано, что двухфазные симметричные электрические сети системы IT (TT) эффективно функционируют без аварий и воздействия ЭМП ПЧ на людей десятки лет и используются в медицинских, оборонных предприятиях и госучреждениях. С целью уменьшения техногенных катастроф в жилых домах необходимо законодательно перейти на систему IT (TT) в жилых домах, заменить существующие системы электроснабжения TN на систему IT (TT) и, кроме того, законодательно повысить требования к бытовым устройствам защиты и коммутации.

Ключевые слова: жилое помещение, дистанционная работа, несовместимые нормы, опасности однофазной электросети, эффективность симметричной сети, рекомендуемые условия, самоконтроль

• Поступила: 09.08.2021 • Доработана: 24.09.2021 • Принята к опубликованию: 28.02.2022

Для цитирования: Рябов Ю.Г., Легкий Н.М., Ломаев Г.В. Безопасность электромагнитных факторов на компьютерных рабочих местах в жилых помещениях. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):14–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-14-27>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Safety of electromagnetic factors for the workplace equipped with personal computers in residential premises

Yuri G. Ryabov¹,
Nikolai M. Legkiy^{1, @},
Geliy V. Lomaev²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² M. T. Kalashnikov Izhevsky State Technical University, Izhevsk, 426069 Russia

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

Abstract

Objectives. The aim of this paper is to analyze the electromagnetic safety of 50Hz industrial frequency electrical networks in residential buildings when using workplaces equipped with personal computers (PCs), as well as to develop recommendations on reducing the impact of levels of industrial frequency electromagnetic fields on human health in residential premises.

Methods. Electromagnetic fields in residential premises with the single-phase TN mode industrial frequency power supply system regulated by the Rules of Electrical Installations Design were measured and calculated in accordance with Russian and international legislative documents.

Results. It was established that electromagnetic fields induced by TN networks in workplaces equipped with PCs might increase significantly and even exceed the maximum permissible level of 25 V/m and 0.25 μ T recommended by Sanitary and Epidemiological Standards. Residential buildings are not subject to the requirements of the Energy Supervision services; therefore, any unprofessional modification of electrical networks in residential premises, including the use of unapproved extension cords, may result in sparking, high-frequency harmonics, and, in turn, conditions which impact human health, as well as electric injuries, fires, and gas explosions.

Conclusions. It has been shown that IT (TT) mode symmetrical two-phase electrical networks may function efficiently for decades without accidents and effects of industrial frequency electromagnetic field on humans, as they are used in medical institutions, defense enterprises, and state institutions. Thus, legislative transition to installing IT (TT) systems in residential buildings, replacement of existing TN power supply systems with IT (TT) system, and legislative strengthening of requirements for household protection and commutation devices, may also be required to reduce man-made disaster risks in residential buildings.

Keywords: residential premises, remote workplace, incompatible standards, dangers of the single-phase electrical network, symmetric network efficiency, ungrounded network efficiency, recommended conditions, self-monitoring

• Submitted: 09.08.2021 • Revised: 24.09.2021 • Accepted: 28.02.2022

For citation: Ryabov Yu.G., Legkiy N.M., Lomaev G.V. Safety of electromagnetic factors for the workplace equipped with personal computers in residential premises. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):14–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-14-27>

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 практике даже при использовании одного рабочего места с персональным компьютером (РМ с ПК) (иногда более 8 ч, ночью) в жилом помещении обнаруживаются проблемы, нарушающие жизнедеятельность и здоровье работника (учащегося), а также других проживающих. Есть семьи, где в помещении, квартире развернуты три и более РМ с ПК. Исключая негативные (стрессовые) воздействия на человека бытовых и семейных проявлений, по результатам частных опросов и жалоб дистанционных работников были отмечены многие факты глубокого утомления, усталости и снижения работоспособности в конце рабочего дня по сравнению с условиями работы на РМ в офисах.

В соответствии с Приказом Минтруда¹ № 33н от 24.01.2014 г. практически отменена специальная оценка условий труда на РМ пользователей ПК. К тому же, с 01.03.2021 г. действует новая редакция СанПиН² 1.2. 3685-21, утвержденная Роспотребнадзором без какого-либо гигиенического обоснования и обсуждения в сети Интернет со специалистами, где «шведские нормы» электромагнитных помех для РМ с ПК (п. 7.2.7 СанПиН³ 2.2.4.3359-16, табл. 1) также исключены, и отменен сам СанПиН.

¹ Приказ Минтруда РФ № 33н от 24.01.2014 «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению» (ред. от 27.04.2020). [Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation No. 33n of January 24, 2014 on the endorsement of the Method of special assessment of working conditions, Classifier of adverse and/or hazardous production factors, form of report of the carried out special assessment of working conditions and its filling instruction. Amended on April 27, 2020 (in Russ.).]

² СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Правила утверждены Постановлением № 2 от 28.01.2021 Главного санитарного врача РФ. [SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic Standards and Requirements for Ensuring Safety and/or Harmlessness of Environmental Factors for Humans. Approved by the Order No. 2 of 28.01.2021 of the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation (in Russ.).]

³ СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. Правила утверждены Постановлением № 81 от 21.06.2016 Главного санитарного врача РФ. [SanPiN 2.2.4.3359-16 Sanitary and Epidemiological requirements for physical factors in the workplace. Approved by the Order No. 81 of 21.06.2016 of the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation (in Russ.).]

При дистанционной работе РМ с ПК изначально обустроивают в помещениях жилых зданий, часто фактически не приспособленных для этих целей (электроснабжение, Интернет, оргтехника, связь). По сравнению с условиями офисных РМ с ПК, где работодатель отвечает за безопасность, в случае дистанционной работы надзорные службы ведомств МЧС, энергетики и санитарии пожарную, электрическую и электромагнитную безопасности РМ не контролируют и за них не отвечают.

Все ведомственные документы в части обеспечения безопасных условий в жилищно-коммунальных хозяйствах (ЖКХ) ссылаются на п. 1 ст. 161 Жилищного Кодекса РФ от 03.04.2018 № 59-ФЗ⁴ «Управление многоквартирным домом должно обеспечивать благоприятные и безопасные условия проживания граждан», где также предлагается общая декларация. Поэтому, теперь сам пользователь должен (обязан) контролировать условия проживания в помещении и безопасность на РМ с ПК, чтобы сохранить свое здоровье и других проживающих.

Длительное пребывание в помещении дома становится дискомфортным и опасным в условиях ослабленного геомагнитного и искаженного геоэлектрического поля (ГМП и ГЭП), а также в условиях повышенных техногенных ЭМП. Сегодня проживающие даже не представляют и не знают, что в их помещениях, на РМ с ПК, в спальне, кухне ослаблены природные или повышены техногенные ЭМП. Санитарная пропаганда, МЧС, СМИ не мотивируют проживающих на проведение самоконтроля условий ЭМП в своих помещениях, несмотря на то что такой контроль сегодня выполнить не сложнее пользования смартфоном [1–7].

В результате многолетнего контроля по жалобам жителей домов на опасные и дискомфортные условия в помещениях было установлено, что в 60% всех случаев причиной были электросети с глухо заземленной нейтралью системы электроснабжения типа TN⁵ (франц.: terre – земля, neuter – нейтраль), установленные

⁴ Федеральный закон от 03.04.2018 № 59-ФЗ «О внесении изменений в Жилищный кодекс Российской Федерации». [Federal Law on Amendments to Housing Code of Russian Federation No. 59-FZ, dated April 3, 2018 (in Russ.).]

⁵ Электрическая сеть с глухозаземленной нейтралью в соответствии п. 1.7.3 Правил устройства электроустановок. [Electrical network with solidly grounded neutral in accordance with PUE, paragraph 1.7.3 (in Russ.).]

Правилами устройства электроустановок (ПУЭ)⁶ для жилых помещений (п. 7.1.13 ПУЭ) и для общественных зданий (п. 7.2.9 ПУЭ) [1]. В бытовых условиях без надзора в течение многих лет электросети TN являются периодическими причинами искрений и коротких замыканий (КЗ). Это приводит к многочисленным авариям: взрывам, пожарам, электропоражениям, вызывающим разрушения зданий и гибель людей.

В отличие от международных стандартов по электробезопасности, в электросетях России применяют автоматические выключатели (АВ) и устройства защитного отключения (УЗО) с пониженными требованиями по надежности, которые усугубляют риски взрыво-, пожаро- и электроопасностей в зданиях, где используют однофазное электроснабжение типа TN. Поэтому в жилых и общественных зданиях, где практически отсутствует надзор за состоянием сети (до отказа или аварии), следует применять двухфазные симметричные электросети IT (TT)⁷, критерии безопасности которых на порядок выше, чем для сетей TN.

В 2017–2018 гг. в России произошло 44 случая взрыва бытового газа в жилых домах, которые привели к жертвам и пострадавшим. Самыми разрушительными стали взрывы в Ижевске (09.11.2017 г.) и в Магнитогорске (31.12.2018 г.). В последнем случае затраты на восстановление оценивают в сумму свыше 5 млрд руб. Последние взрывы 08.09.2021 г. – в Ногинске и Екатеринбурге, 11.08.2021 г. – в Ельце. Более десяти погибших и около сотни пострадавших. Общие ущерб бюджету и затраты пострадавшего населения – миллиарды рублей.

Еще С.К. Шойгу, как Министр МЧС, заявлял, что каждый третий пожар и взрыв в ЖКХ вызван электросетями типа TN. Каждый год от поражения электрическим током в РФ погибает до 30 тыс. чел. Уровень электротравматизма в быту России более чем на порядок превышает аналогичный показатель в США и Японии⁸.

Сети TN промышленной частоты (ПЧ) 50 Гц, удлинители сети, шнуры приборов и адаптеров, включенные в сеть, индуцируют в пространство жилого помещения (РМ с ПК, спальню, кухню) на расстояние более 0.5 м широкий спектр гармоник

⁶ Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Утверждены Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204 [Rules of Electrical Installations Design (PUE). Approved by the Order No. 204 of the Ministry of Energy of the Russian Federation on July 8, 2002 (in Russ.).]

⁷ Электрическая сеть с изолированной нейтралью в соответствии п. 1.7.3 ПУЭ [Electrical network with isolated neutral in accordance with PUE, paragraph 1.7.3 (in Russ.).]

⁸ Об активных фильтрах гармоник для «чайников» и правилах выбора фильтрокомпенсирующих устройств. <https://www.mircond.com/blog/ob-aktivnykh-filtrakh-garmonik/>, дата обращения 20.04.2020 [About active harmonic filters for “weasels” and the rules for choosing filter compensating devices. URL: <https://www.mircond.com/blog/ob-aktivnykh-filtrakh-garmonik/>. Accessed April 20, 2020 (in Russ.).]

ЭМП с амплитудой, превышающей предельно допустимые уровни (ПДУ) для РМ с ПК – 25 В/м СанПиН 2.2.4.3359-16, создавая дискомфортные условия для работы и проживания [1].

НЕСОВМЕСТИМОСТЬ САНПИН ПО ЭМП ПЧ ДЛЯ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ И УСЛОВИЙ НА РМ С ПК

Нормы ПДУ ЭМП ПЧ (электрического и магнитного полей – ЭП и МП) СанПиН 2.1.2.2645⁹ для проживающих в помещениях жилых зданиях не соответствуют требованиям ПДУ на РМ с ПК последних СанПиН 2.2.4.3359-16 (п. 7.2.7).

В табл. 1 приведены ПДУ СанПиН 2.2.4.3359-16 значимых (1-й очереди офисного контроля) факторов ЭМП для РМ с ПК в сравнении с ПДУ ЭМП (ЭП и МП) ПЧ СанПиН 2.1.2.2645-10 для условий проживания в жилом помещении. На эти ПДУ (500 В/м и 5 мкТл) много лет ссылаются строители и энергетики, чтобы в жилых и общественных зданиях вместо потенциально опасной в быту сети TN не применять двухфазную симметричную безопасную систему электроснабжения типа IT (ПУЭ, рис. 1.7.4), применение которой снижает риски аварий и не создает дискомфортные условия факторов ЭМП ПЧ [1].

С целью снижения риска аварий, сохранения здоровья дистанционных работников – пользователей РМ с ПК, защиты от неконтролируемых воздействий дискомфортных ЭМП ПЧ и других значимых факторов ЭМП в настоящем исследовании предложены рекомендуемые, достижимые на практике критерии безопасных условий факторов ЭМП при их комплексном действии на РМ с ПК. Рекомендуемые критерии разработаны на основании наших опытных данных, совместимы с показателями ЭМП СанПиН 2.2.4.3359-16 (табл. 1), критериями стандарта STANDARD DER BAUBIOLOGISCHEN MESSTECHNIK 2015 (SBM-2015)¹⁰ (Германия) для спальных мест и принципами Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [1, 2].

⁹ СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях. Правила утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 10.06.2010 г. № 64. [SanPiN 2.1.2.2645-10 Sanitary and Epidemiological Requirements for Living Conditions in Residential Buildings and Premises. Approved by the Order No. 64 of 10.06.2010 of the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation (in Russ.).]

¹⁰ Supplement to the Standard of Building Biology Testing Methods SBM-2015 and the associated Building Biology Evaluation Guidelines for Sleeping Areas. [Acting from 5th Draft 5/2015]. Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN; 2015. 18 p. [Supplement to the Standard of Building Biology Testing Methods SBM-2015 and the associated Building Biology Evaluation Guidelines for Sleeping Areas. [Acting from 5th Draft 5/2015]. Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN; 2015, p. 18.]

Таблица 1. Сравнение ПДУ ЭМП на РМ с ПК и ПДУ ЭМП для жилого помещения

| СанПиН 2.2.4.3359-16 (8 ч) | | ПДУ фона | СанПиН 2.1.2.2810-10* (24 ч) | ПДУ |
|------------------------------------|----------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Напряженность ЭП | 5–2000 Гц | 25 В/м | 50 ± 2 Гц фон ЭП в помещении | 500 В/м |
| | 2–400 кГц | 2.5 В/м | | |
| Напряженность МП | 5–2000 Гц | 0.25 мкТл | 50 ± 2 Гц фон МП в помещении | 5(4) мкТл (А/м) |
| | 2–400 кГц | 25 нТл | | |
| Энергия СВЧ | 300–300000 МГц | 10 мкВт/см ² | 300–300000 МГц | 10 мкВт/см ² |
| Напряженность ЭСП | | 15 кВ/м | – | 15 кВ/м |
| Коэффициент ослабления ГМП – K_r | | $K_r \leq 2.0$ | – | $K_r \leq 1.5$ |

Примечания:

1. ЭСП – электростатическое поле, измеряемое по п. 7.3.7.е СанПиН 2.2.4.3359-16. Характеризует суперпозицию полей ГЭП и статического электрического поля в помещении.
2. ГМП – геомагнитное поле; K_r – коэффициент ослабления ГМП по ГОСТ Р 51724 – 01(08)**.

* СанПиН 2.1.2.2801-10. Изменения и дополнения № 1 к СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях (с изменениями, внесенными постановлением Правительства Российской Федерации от 31.12.2020 г. № 2403)». [SanPiN 2.1.2.2801-10 Amendments and additions No. 1 to SanPiN 2.1.2.2645-10 Sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises (with amendments approved by the Order No. 2403 of the Russian Government dated 31.12.2020) (in Russ.).]

** ГОСТ Р 51724-2001. Экранированные объекты, помещения, технические средства. Поле гипогеомагнитное. Методы измерений и оценки соответствия уровней полей техническим требованиям и гигиеническим нормативам. М.: ИПК Издательство стандартов; 2001. [GOST R 51724-2001. Shielded facilities, spaces, installations. Reduced geomagnetic field. Methods of measuring and assessment of field intensity compliance with technical requirements and hygiene standards. Moscow: Standartinform; 2001 (in Russ.).]

Основные задачи данной работы – показать причины опасностей при эксплуатации сетей TN в жилых помещениях, безопасность и эффективность использования сетей IT, необходимость самоконтроля рекомендуемых критериев показателей ЭМП ПЧ на РМ с ПК.

Сегодня дискомфортные ЭМП в помещениях зависят не только от качества строительства и внешних условий, но и от самого проживающего, его подготовленности, от использования средств самоконтроля, умения и возможности нормализовать эти условия. Обустройство РМ с ПК необходимо проводить при непрерывном контроле ЭМП ПЧ и других факторов (табл. 1). Периодический контроль нужно выполнять при эксплуатации РМ с ПК, а также при изменении условий в помещении. Используемые приборы контроля – индивидуальные регистраторы изучения (ИРИ) относятся к средствам неразрушающего контроля и не подлежат государственной поверке (ст. 1.23. ФЗ от 26.06.2008 № 102-ФЗ¹¹, ред. от 23.06.2014).

¹¹ Федеральный закон № 102-ФЗ от 26.06.2008 «Об обеспечении единства измерений». [Federal Law No. 102-FZ On Ensuring the Uniformity of Measurements, dated 26.06.2008 (in Russ.).]

ПРИЧИНЫ ДИСКОМФОРТНЫХ УСЛОВИЙ НА РМ С ПК ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ РАБОТНИКОВ В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

На миллионах РМ с ПК в офисах, учебных классах, производстве действуют требования и нормы ЭМП (табл. 1), которые должны быть обеспечены для пользователя и при дистанционной работе в жилом помещении. Эти требования впервые были приведены в стандарте MPR 1990¹² (Швеция) и использовались во всем мире в качестве ПДУ на РМ с ПК с дисплеями с электронной трубкой. В 2000-х гг. на РМ с ПК стали применять новые, более безопасные ЖКТ-дисплеи. В тоже время на РМ с ПК стали массово использовать вторичные источники импульсного питания (ВИП): адаптеры, электроприборы, источники света и др., которые искажают токи и

¹² «Шведский стандарт» MPR 1990:10 1990-12-31 комплекса стандартов MPR-II. Справочное руководство пользователя для оценки качества дисплеев. Введен в качестве общеевропейского стандарта с июня 1992 г. директивой Совета ЕЭС от 29.05.1990 г. № 90/270/ЕЕС. [Standard MPR 1990:10 1990-12-31 within MPR II standards developed by the Swedish Board for Technical Accreditation (SWEDAC) as the User's Handbook for Evaluating Visual Display Units. Adopted as European Standard in June 1992 by the Council Directive 90/270/EEC of May 29, 1990.]

напряжения ПЧ 50 Гц в сети TN, индуцируя теперь в помещении паразитный спектр ЭП и МП практически в тех же полосах частот стандарта MPR 1990.

На рис. 1 показаны типичные искажения формы напряжения и тока в трехфазной электросети 50 Гц жилого здания.

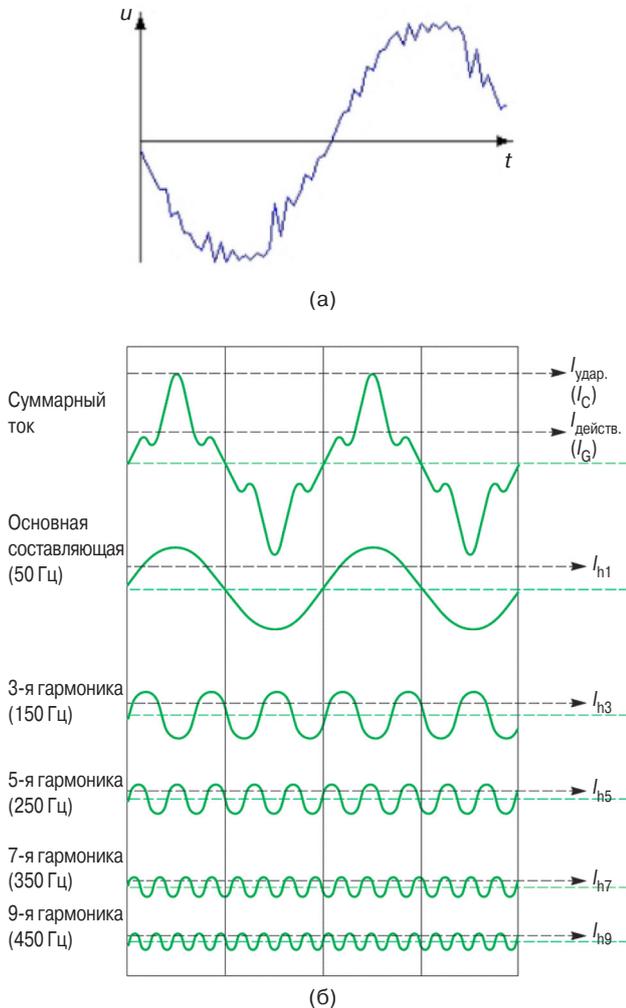


Рис. 1. Типичные искажения форм:
(а) – напряжения;

(б) – токов и их гармоник, искажающих форму тока в трехфазной электросети жилого здания.
Ось x – время t , ось y – амплитуда параметра

Основные причины искажений токов вызваны несимметрией нагрузок потребителей здания по фазам сети и нелинейными нагрузками токов в фазах. Каждая гармоника тока (напряжения) фазы сети TN индуцирует в пространство помещения МП (ЭП), образуя широкополосный спектр, энергия которого может быть больше энергии 1-й гармоники. В СанПиН 2.2.4.3359-16 для офисного РМ с ПК были сохранены требования ЭМП ПЧ (табл. 1) шведского стандарта, поскольку за прошедшее время они продемонстрировали свою эффективность с точки зрения предотвращения вредного воздействия на

пользователей и безаварийность. Сегодня в России действует большой парк приборов, обеспечивающих контроль этих требований.

В новом СанПиН 1.2.3685-21, утвержденном без какого-либо гигиенического обоснования и обсуждения в сети Интернет со специалистами нормы ЭМП для РМ с ПК п. 7.2.7 СанПиН 2.2.4.3359-16 (табл. 1) вообще исключены, а сам СанПиН отменен. Последствия этой инициативы для здоровья пользователей РМ с ПК в офисах теперь непредсказуемы, особенно при дистанционной работе в жилых помещениях, где электросети TN индуцируют неконтролируемые высокие ЭМП ПЧ, превышающие ПДУ для РМ с ПК. Ведь сегодня даже предприниматели и администраторы (строители и энергетики) заинтересованы в условиях безаварийности и сохранении здоровья своих дистанционных работников, от эффективности которых зависит их бизнес, не говоря уже о здоровье детей, беременных женщин, студентов и др.

Показатели СанПиН 2.1.2.2645-10 (табл. 1) и методы их контроля не отражают гигиеническую вредность ЭМП ПЧ в натуральных условиях жилых помещений (соответственно и на организуемых РМ с ПК), включая следующие причины:

1. Сегодня до 80% паразитной энергии спектра индукции гармоник ЭП и МП ПЧ, фактически воздействующих на человека в жилых помещениях (рис. 1), не контролируется. Согласно критериям «тепловой концепции», декларируемые в России и используемые в нормативах других стран, например, в «Директиве 2013/35/ЕС»¹³ от 26.07.2013, в диапазоне низких частот нормы ПДУ индукций должны снижаться пропорционально увеличению частоты (минус 6 дБ на октаву). В СанПиН действуют плоские нормы ПДУ, независимо от частоты.

Известно, что плоские, широкополосные нормы ПДУ экспозиций ЭМП полосовых частот в диапазоне 10 кГц – 300 ГГц были установлены еще в СССР в 1960-х гг. (приведены и в новом СанПиН 1.2.3685-21) из соображений секретности, чтобы при измерениях нельзя было узнать узкополосные частоты кодов, излучений гетеродинов, приемо-передатчиков,

¹³ Директива N 2013/35/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского Союза «О минимальных требованиях безопасности для работников в отношении рисков, связанных с физическим воздействием (электромагнитные поля) (20-я отдельная Директива в значении статьи 16 (1) Директивы 89/391/ЕЭС), и об отмене Директивы 2004/40/ЕС» [Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC]

антенн. Несовместимость зарубежных норм удельного коэффициента поглощения (SAR) (англ. specific absorption rate) и ПДУ СанПиН требуют лишних затрат на контроль ввозимых средств. Такой подход не приближает гармонизацию российского санитарно-гигиенического нормирования со стандартами развитых стран Запада.

Гармоники в сети вызывают дополнительный нагрев обмоток силовых трансформаторов. Снижается их номинальная мощность и остаточный ресурс. Уровни гармоник в сети производственных зданий (но не в жилых) промышленные стандарты уже нормируют до гармоник № 40 (до 2000 Гц): ГОСТ 32144-2013¹⁴ (по напряжению) и ГОСТ IEC 61000-3-2-2017¹⁵ (по току). Поэтому в ЖКХ чаще повреждается силовое оборудование и происходит несанкционированное отключения электричества.

2. Источниками индукции ЭП и МП ПЧ в помещении (и на РМ с ПК) являются все цепи TN: сети к розеткам и освещению, удлинители сети и др. Самыми интенсивными источниками ЭП, близкими к пользователю, являются только включенные в сеть ~220 В 50Гц удлинители и шнуры ВИП, двухпроводные сети даже без нагрузки. Из-за особенности схемы ВИП (адаптеров) их шнуры индуцируют спектр частот 100–500(2000) Гц ЭП напряженностью $E \geq 25$ В/м на расстоянии до 0.5 м, где первая гармоника ЭП от проводов 100 Гц, а не 50 Гц [3].
3. Энергия экспозиции гармоник ЭП и МП в помещениях будет возрастать в результате массового внедрения источников беспроводной передачи энергии (БПЭ) для зарядки мобильных и переносных устройств, бытовых электроприборов, электромобилей. В США уже более 30% мобильных телефонов заряжаются от источников БПЭ.
4. В СанПиН 2.1.2.2810-10 (табл.1) приведены ПДУ ЭМП ПЧ исходя из того, что в жилых

¹⁴ ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ; 2014. [GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow: Standartinform; 2014 (in Russ.).]

¹⁵ ГОСТ IEC 61000-3-2-2017. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2. Нормы. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А в одной фазе). М.: Стандартинформ; 2020. [GOST IEC 61000-3-2-2017. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3–2. Limits. Limits for harmonic current emissions (equipment input current no more 16 A per phase). Moscow: Standartinform; 2020 (in Russ.).]

помещениях действуют индукции ЭП и МП только от однофазных сетей. Но места в помещении и РМ с ПК могут оказаться в зоне вращающихся ЭМП (ВЭМП) ПЧ (ВЭП и ВМП составляющих), индуцируемых трехфазными раскладками кабелей в здании: к кухонным плитам, трансформаторам, инженерному оборудованию здания, этажным щитам, лифтам.

Воздействие ВМП на живые организмы более опасно по сравнению с действием МП от однофазной цепи. ВМП правого направления воздействует менее деструктивно, чем левое. Воздействие левого ВМП является более опасным даже при малых уровнях. Норм на направления ВЭМП нет. Помещение для дистанционной работы должно быть проверено на отсутствие ВМП и ВЭП от внешних и внутренних источников [8–10].

Результаты измерений зон пространственных распределений по четырем направлениям уровней индукций ЭМП ПЧ 50 Гц (МП, ЭП и их эллиптичности) по методике п. 7.3.4. СанПиН 2.2.4.3359-16, индуцируемых 5 видами сухих трансформаторов с литой изоляцией ряда от 1000 кВА до 2500 кВА, которые используются в городских трансформаторных подстанциях и на объектах, приведены в [11].

Около 40 встроенных и пристроенных к зданию в Москве, Московской области и Самаре трансформаторных подстанций оборудованы экранами (тонкостенные стальные листы с решеткой между ними), преобразующими эллиптическое ВМП ПЧ источника в квазилинейную составляющую МП ПЧ (менее опасную), по способу, описанному в [11].

5. Сегодня зарубежные «зеленые организации» рекомендуют (принуждают) строителям обеспечивать в жилых домах жесткие нормы стандарта SBM-2015 (8-я редакция), где рекомендуемый фон ПЧ 50 Гц в помещениях не более 5 В/м и 0.1 мкТл, мотивируя предупредительными принципами ВОЗ в условиях действия на проживающих комплекса бытовых ЭМП и других вредных факторов. Стандарт SBM-2015 методов строительной биологии используется в качестве руководства для профессионалов и независимого тестирования жилых домов по всему миру, в том числе в Европе, Израиле, США, Канаде, Австралии и Новой Зеландии [12].
6. Переход к нормам МП ПЧ на уровне 0.2–0.4 мкТл рассматривается в странах Европейского союза как перспективная цель на ближайшие годы. Принятие решений на уровне ВОЗ ожидается в 2022–2024 гг. [13].

ПРИЧИНЫ ОПАСНЫХ УСЛОВИЙ В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ, СОЗДАВАЕМЫХ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ TN

В СМИ электросети типа TN часто называют в числе причин и условий аварий в жилых и общественных зданиях, сопровождаемых жертвами и пострадавшими. По степени потенциального вреда качеству жизни и здоровью людей, затрат на лечение пострадавших, ущерба результатам труда, по затратам на последующее восстановление и ремонт такие аварии следует отнести к чрезвычайно опасным, так как они часто сопровождаются катастрофическим ущербом.

Двухпроводная сеть TN-C¹⁶ среди других типов TN является наиболее частой причиной периодических взрывов бытового газа, пожаров, электротравм и паразитных индукций полей ПЧ 50 Гц в помещениях. Такие сети встречаются в стенах зданий в направлении к розеткам и источникам света (из-за ошибок строителей), при неисправности контакта третьего провода PE¹⁷ и в нештатных удлинителях. Двухпроводную сеть обнаруживают по увеличенной индукции ЭП.

При КЗ проводов сети TN-C неминуем пожар. При обрыве или выгорании нулевого провода PEN¹⁸ на клеммах провода L (фаза) напряжение возрастет до 0.4 кВ. Это опасное для людей напряжение появляется в помещении на всех металлических частях, соединенных согласно п.7.1.78 ПУЭ с проводом PEN. Выгорают включенные в розетки незащищенные электроприборы, адаптеры и источники освещения. Сегодня в России применение сетей TN-C и использование двухпроводных удлинителей сети запрещено пожарными службами.

Несмотря на применение в жилых зданиях модернизированных систем электроснабжения – TN-S¹⁹ и TN-C-S²⁰, установленных ПУЭ (п. 7.1.13),

¹⁶ Электрическая сеть TN с совмещенным заземляющим (PE) и нулевым (N) проводами. [TN electrical network with combined earthing (PE) and neutral (N) wires.]

¹⁷ PE – Protect Earth (защитная земля), защитное заземление. Служит для защиты от поражения электричеством и аварийного отключения дифференциальной защиты и автоматического выключателя при повреждении изоляции в электроприборе с заземленным корпусом. [PE is protective earthing. It is used for protection against electric shock and emergency shutdown of differential protection and circuit breakers in case of insulation failure in electrical appliances with earthed enclosure.]

¹⁸ PEN – проводник, совмещающий функции рабочего и защитного заземления. [Protective earthed neutral (PEN) conductor is a single conductor combining the function of the neutral and protective earth conductor.]

¹⁹ Электрическая сеть TN с отдельными заземляющим (PE) и нулевым (N) проводами [TN electrical network with earthing (PE) and neutral (N) wires.]

²⁰ Электрическая сеть TN с совмещенным в начале сети заземляющим (PE) и нулевым (N) проводами и с отдельными далее заземляющим (PE) и нулевым (N) проводами. [TN electrical network with combined earthing (PE) and neutral (N) wires at the network beginning and separate earthing (PE) and neutral (N) wires further on.]

в домах недавней застройки также периодически происходят взрывы газа, пожары, электропоражения людей. Из ежегодных взрывов бытового газа в домах России около 30–50% инициируется искрением в электросети TN, как правило, при коммутации выключателей освещения, контактов розеток, электроприборов и т.п. Интенсивность искры увеличивается из-за дополнительной энергии разряда распределенной емкости $C_p = 110...130$ пФ/м провода фазы относительно «земли». Поэтому сети TN не рекомендуют использовать в местах возможных концентраций воздушных и пылевых взрывоопасных смесей. Искровой разряд может быть опасен для электронных приборов в случае нарушения цепи заземления (пропадания контакта) и т.п.

Сегодня вся защита от электропоражения и КЗ в сетях TN-S и TN-C-S зданий зависит от скорости срабатывания АВ и УЗО. Часто пожары и электропоражения происходят от низкой надежности контактов этих электромеханических устройств и большого времени срабатывания (до 5 с, п. 1.7.79 ПУЭ) в сетях жилых и общественных зданий. Заключение экспертизы о причине пожара в ТЦ «Зимняя вишня»: «Пожар начался в светодиодном светильнике, который залила талая вода с крыши. Защитные автоматы, которые должны были отключить прибор освещения, а затем и электросеть, не сработали»²¹.

К энергии удара током и искровой коммутации тока в электросетях TN здания всегда добавляется энергия разряда распределенной емкости C_p , вызывая деградацию (эрозию) контактов. В системе TN электромеханические АВ и УЗО нельзя считать средством 100% защиты от КЗ и электропоражений. Необходимы устройства защиты с временем отключения на два порядка меньше, чем в требованиях ПУЭ [1, 2].

ПРИЧИНЫ ДИСКОМФОРТНЫХ УСЛОВИЙ НА РМ С ПК ОТ ЭМП ПЧ ПРИ ДИСТАНЦИОННОЙ РАБОТЕ

Жалобы людей на дискомфортные условия в жилых помещениях часто вызваны воздействиями индукций ПЧ 50 Гц ЭП и МП, даже не превышающими ПДУ СанПиН 2.1.2.2810-10 (табл. 1). Напряжения в электросетях TN, проложенных в стенах, потолке и полу, возбуждают строительную металлическую арматуру и сетки в стенах (не заземленные), индуцируя в помещении паразитное (вторичное) ЭП напряженностью до 25 В/м (ПДУ для РМ с ПК) на расстоянии 0.4–1.0 м от стены. Удлинители сети под ногами пользователя, особенно двухпроводные (на РМ

²¹ Газета «Коммерсантъ» от 24.08.2018 г. [The Kommersant newspaper of August 24, 2018 (in Russ.).]

в России их более 50%), шнуры приборов и адаптеров, настольные (настенные) лампы индуцируют ЭП в окружающее пространство, возбуждая вторичное ЭП в близких к телу металлических предметах: столешница, стул, кресло, поставка, пружинный матрас и др.

Поэтому в процессе размещения РМ с ПК условия на месте пользователя становятся дискомфортными даже тогда, когда все шнуры приборов ИТ-техники, адаптеры только включены в розетки и колодки удлинителей электросети ~220 В типа TN. Напряженность ЭП ПЧ на расстоянии 0.1 м от шнуров и трехпроводных удлинителей может достигать 100–125 В/м, что в 4–5 раз больше установленного СанПиН 2.2.4.3359-16 (табл. 1) ПДУ (25 В/м) для РМ с ПК [1, 2].

Из-за необходимости размножения сети TN (включения шнуров приборов, адаптеров и др.) удлинителями, увеличения числа коммутаций тока при обустройстве и эксплуатации РМ с ПК в жилых помещениях повышается риск взрыво-, пожаро-, электро-, искроопасных и дискомфортных для здоровья пользователя условий, которые никто не контролирует и не обеспечивает. В сети TN опасные условия в помещении часто возникают при обрыве или нарушении контакта проводов рабочего и защитного заземлений еще до помещения, квартиры, этажного щитка и т.д.

В нашей практике было несколько случаев, когда кроватку ребенка-грудничка, где была зарегистрирована напряженность ЭП ~(80–100) В/м от подключенных в розетку шнуров приборов (подогреватель, аэроионизатор, радио-няня и др.), переставляли в другое место помещения и нормализовали условия ЭП менее 10 В/м, и непрерывные болезни ребенка прекращались [2].

БЕЗОПАСНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РМ С ПК ПРИ ДИСТАНЦИОННОЙ РАБОТЕ

Практически отсутствует статистика аварий и превышение значений ЭП и МП ПЧ в помещениях медицинских учреждений, оборонных предприятий, банков, использующих потенциально надежные, симметричные двухфазные электросети типа IT (TT), выполненные по ГОСТ 50571.28-2006 (МЭК 60364-7-710:2002)²² (рис. 1.7.4 ПУЭ).

²² ГОСТ Р 50571.28-2006 (МЭК 60364-7-710: 2002). Электроустановки зданий Часть 7-710 требования к специальным электроустановкам. Электроустановки медицинских помещений. М.: Стандартинформ; 2007. [GOST R 50571.28-2006 (IEC 60364-7-710: 2002). Electrical installations of buildings. Part 7-710: Requirements for special installations or locations. Medical locations. Moscow: Standartinform; 2007 (in Russ.).]

По результатам испытаний и контроля в зданиях, выполненных в соответствии с РД 153-34.0-15.501-00²³ и РД 153-34.0-15.502-2002²⁴, считаем, что эффективность электросетей IT выше, чем эффективность электросетей TN, по оценке следующих показателей:

- рискам взрыво- и пожароопасности – до 5 раз;
- электробезопасности – более 10 раз;
- электромагнитной безопасности – не менее 10 раз;
- импульсной (молниевой) стойкости – в 1.5–3 раза (гражданская оборона);
- по энергосбережению (снижение утечки тока) – до 5%;
- по сохранению ресурса: изоляции сетей, контактов коммутирующих устройств и снижения скорости электрокоррозии коммуникаций здания – в 2–3 раза и т.д.

Прикосновение к любому проводу сети IT безопасно, вторичные индукции от незаземленных предметов не возникают. Снижаются индукции ЭП ПЧ от удлинителей сети. Традиционные устройства защиты АВ и УЗО, а также электромагнитные экраны в этих сетях более эффективны. При коммутациях тока нагрузок и КЗ энергия искры в несколько раз ниже в результате отсутствия разряда емкости C_p , энергия которой компенсируется разнонаправленными токами смещения от каждого провода сети. Случаи взрыва бытового газа неизвестны [1–3].

В случае КЗ одного из проводников сети IT на «землю», даже если автоматы защиты не сработали, сеть IT превращается условно в сеть TN-C до того момента, пока неисправность не будет устранена. Только при замыкании второго проводника на землю аварийную сеть необходимо отключать от источника питания. Напряжение относительно «земли» от каждого провода сети IT около 110 В. На расстоянии 0.1 м от проводов напряженность ЭП составляет 1–2 В/м, а МП – порядка 10 нТл [2].

Сегодня в квартире или коттедже в месте ввода трехфазной сети TN ~220 В инициативные люди

²³ РД 153-34.0-15.501-00. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 1. Контроль качества электрической энергии (утв. Минэнерго России 27.12.2000) [RD 153-34.0-15.501-00 Guidelines for monitoring and analyzing the quality of electric energy in general-purpose power supply systems. Part 1. Electrical energy quality control (approved by Ministry of Energy of the Russian Federation on December 27, 2000) (in Russ.).]

²⁴ РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии (утв. Госэнергонадзором 15.07.2002). [RD 153-34.0-15.502-2002 Methodological guidelines for control and analysis of power quality in power supply systems for general purposes. Part 2. Analysis of power quality (approved by Rostekhnadzor on July 15, 2002) (in Russ.).]

устанавливают развязывающий (разделительный, п. 1.7.85 ПУЭ) до 15.0 кВт трансформатор, который транслирует в жилые помещения, на РМ с ПК по тем же проводам уже потенциально безопасную электросеть ИТ или сеть ТТ с заземленной средней точкой (рис. 1.7.5 ПУЭ). Для защиты коттеджей от паразитных индукций ЭП и МП, от заноса паразитных помех по электросети, возникающих при грозе, КЗ, обрыве проводов, развязывающий трансформатор с разделенными обмотками (или с заземленным экраном) и ограничителями перенапряжений устанавливаются на границе участка [2].

Для защиты РМ с ПК от ЭП ПЧ сети TN ~220 В используют удобные для применения при дистанционной работе нейтрализаторы, развязывающие ~220 В от «земли», подавляющие ЭП в диапазоне от 5 Гц до 400 кГц, имеющие уровень шума до 20 дБ, например, типа «Циклон-650» (производитель АО НПП «Циклон-Тест»²⁵) с 4 розетками.

²⁵ www.ciklon.ru

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И КРИТЕРИИ УСЛОВИЙ ЭМП ДЛЯ РМ С ПК ПРИ ДИСТАНЦИОННОЙ РАБОТЕ

В табл. 2 приведены значения факторов ЭМП, рекомендуемые для различных по степени вредности и/или опасности РМ с ПК критериев: 1 – комфортные, 2 – допустимые, 3 – безопасные и 4 – недопустимые. Данные значения гармонизированы с критериями стандарта SBM-2015 и принципами ВОЗ.

Контроль уровней факторов ЭМП на РМ с ПК (табл. 2) можно выполнять по методикам п. 7.3.7 и приложения 11 СанПиН 2.2.4.3359-16 до появления новых рекомендованных методик. Критерии 1 и 2 (комфортных и допустимых условий) ЭМП ПЧ в жилых помещениях (и на РМ с ПК) надежно выполняются при условии использования сети ИТ (или сети ТТ) и отсутствии индукций и излучений от внешних источников, превышающих критерии, указанные в табл. 2.

Таблица 2. Рекомендуемые показатели и критерии условий ЭМП на РМ с ПК для дистанционной работы

| Показатели | | Ед. измерен. | Критерии условий | | | |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Напряженность ЭП относительно земли | 5–2000 Гц | В/м | <1 | 1–5 | 5–25 | >25 |
| | 2–400 кГц | В/м | <0.1 | 0.1–0.25 | 0.25–2.5 | >2.5 |
| Напряженность ЭП без заземления | 5–2000 Гц | В/м | <0.3 | 0.3–1.5 | 1.5–10 | >10 |
| | 2–400 кГц | В/м | <0.02 | 0.02–0.1 | 0.1–0.5 | >0.5 |
| Напряженность МП | 5–2000 Гц | нТл | <2.5 | 2.5–7.5 | 7.5–25 | >50 |
| | 2–400 кГц | нТл | <0.25 | 0.25–0.75 | 0.75–25 | >5 |
| Энергия ППЭ СВЧ | 300–300000 МГц | мкВт/м ² мкВт/см ² | <1.0 <10 ⁻⁴ | 1–100 10 ⁻⁴ –10 ⁻² | 100–1000 10 ⁻² –0.1 | >1000 >0.1 |
| Напряженность ЭСП | <i>E</i> | кВ/м | <0.1 | 0.1–0.5 | 0.5–3.0 | >+3.0 |
| Время утечки ЭСП при влажности | <i>t_y</i> (30–60)% | сек | <2.0 | 2.0–6.0 | 6.0–15 | >15 |
| Коэффициент ослабления ГМП – <i>K_r</i> | <i>K_r = H_O/H_П</i> | Отношение | <1.1 | 1.1–1.3 | 1.3–1.5 | >1.5 |

Примечания:

1. Измерения напряженности ЭСП (*E*) при имитации условий на РМ с ПК и времени утечки (*t_y*) наведенного заряда ЭСП на полу и диэлектрических материалах РМ с ПК (в том числе учитывая электризацию (одежды, обуви) тела пользователя в движении) по ГОСТ 31610.32-2-2016 / IEC 60079-32-2:2015*.
2. Анализ безопасности, контроль и обоснования рекомендуемых критериев факторов СВЧ, ЭСП и ГМП на РМ с ПК в жилых помещениях, где осуществляется дистанционная работа, будут приведены в последующих статьях.
3. *H_O* – интенсивность ГМП открытого пространства; *H_П* – интенсивность ГМП внутри помещения.

* ГОСТ 31610.32-2-2016/ IEC 60079-32-2:2015. Межгосударственный стандарт. Взрывоопасные среды. Часть 32-2. Электростатика. Опасные проявления. Методы испытаний. М.: Стандартинформ; 2017. [GOST 31610.32-2-2016/IEC 60079-32-2:2015. Explosive atmospheres. Part 32-2. Electrostatic hazards. Tests. Moscow: Standartinform; 2017 (in Russ.).]

ОБОСНОВАНИЯ РЕКОМЕНДУЕМЫХ КРИТЕРИЕВ ЭМП (ТАБЛ. 2) НА РМ С ПК

На рис. 2 приведен пример паразитного ЭП 23 В/м, индуцируемого шнуром включенного в сеть ~220 В адаптера на расстоянии ~0.5 м (деревянная линейка), близкого к ПДУ ЭП ПЧ для РМ с ПК (табл. 1). Но по СанПиН 2.1.2.1002-003²⁶ п. 6.4.3.1 (и сегодня) показатель ПДУ ЭМП измеряется на расстоянии 0.1 м от изделия (где для всех ВИП РМ с ПК должно быть ≤ 25 В/м).



Рис. 2. Индукция ЭП 23 В/м на расстоянии ~0.5 м от шнура, включенного в сеть ~220 В адаптера

На рис. 3 приведен пример домашнего РМ с ПК [14]. Видно, что шнуры проводов питания компьютера, ЖКТ-дисплея и ноутбука опускаются вниз по металлической столешнице и включены в розетки колодки удлинителя. Если используется сеть TN, то вторичная индукция ЭП и МП (в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц) от столешницы и шнуров около колен пользователя может составить до 80 В/м и 0.6 мкТл вместо допустимых ПДУ 25 В/м и 0.25 мкТл.

²⁶ СанПиН 2.1.2.1002-00. 2.1.2. Проектирование, строительство и эксплуатация жилых зданий, предприятий коммунально-бытового обслуживания, учреждений образования, культуры, отдыха, спорта. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. Санитарные-эпидемиологические правила и нормативы (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 15.12.2000 г., ред. от 21.08.2007 г.). [SanPiN 2.1.2.1002-00. 2.1.2. Design, construction and operation of residential buildings, public utilities companies, education, culture, recreation, and sport institutions. Sanitary and epidemiological requirements for residential buildings and premises. Sanitary and epidemiological rules and regulations (Approved by the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation, December 15, 2000, edited August 21, 2007) (in Russ.).]



Рис. 3. Пример домашнего РМ с ПК [14]

Другими дискомфортными факторами (рис. 3) могут быть следующие: индукции МП, ЭП, ВМП ПЧ от силовых кабелей за стенами; индукции обратных направлений векторов ГЭП или ЭСП кресла, подставки для ног и ламината пола; ослабление ГМП металлоконструкциями стен; излучения СВЧ от близких приборов: устройства Wi-Fi, платы ноутбука, мобильного телефона (особенно в системе связи GSM). Если используется сеть IT, то ЭП и МП ПЧ будут *автоматически* соответствовать условиям табл. 2.

На РМ с ПК для дистанционной работы надо стремиться обеспечивать показатели и критерии ЭМП (табл. 2), а не ПДУ ЭМП СанПиН (табл. 1) для условий проживания по следующим причинам:

1. Санитарные документы для жилых помещений Научно-исследовательского института медицины труда (НИИМТ – разработчик) содержат ПДУ только для однокомпонентных воздействий факторов ЭМП (табл. 1). К тому же эти ПДУ (500 В/м и 5 мкТл) несовместимы с нормами ЭМП СанПиН 2.2.4.3359-16 для РМ с ПК офисов (25 В/м и 0.25 мкТл).
2. Сегодня в условиях РМ с ПК на пользователя воздействует комплекс факторов ЭМП, каждый из которых может действовать деструктивно на здоровье. Судя по работам медицинских и других специалистов, восприимчивыми к воздействию каждого из факторов ЭМП (табл. 1) являются следующие системы организма: нервная, сердечно-сосудистая, гормональная, иммунная, пищеварительная и репродуктивная [10]. При действии комплекса факторов ЭМП на РМ с ПК, чтобы снизить деструктивные действия на организм пользователя, интенсивность каждого фактора надо снижать.
3. Рекомендованные критерии показателей факторов 4 (табл. 2) более жесткие, чем ПДУ ЭМП

(табл. 1). Учитывалось следующее: использование безопасной сети IT (TT) в помещении, здании; действия ослабленных и искаженных факторов ГМП и ГЭП в помещении; достижимость критериев показателей табл. 2 на практике; снижение ПДУ других физических факторов для 24-часового пребывания, вместо 8-часового – в офисе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исходя из приведенных результатов, считаем необходимым в жилых зданиях в законодательном порядке выполнить следующие первоочередные мероприятия:
 - заменить систему электроснабжения TN на систему IT (TT);
 - применять более надежные системы коммутации и защиты;
 - внедрить систему самоконтроля условий физических факторов самими проживающими и пользователями РМ с ПК в жилых помещениях, используя современные мобильные средства.
2. Довести до сведения Правительства РФ, региональных властей, населения, инвесторов, строителей, энергетиков следующие требования: при проектировании новых жилых и общественных зданий, реконструкции и капитальном ремонте использовать незаземленную систему электроснабжения типа IT; в процессе эксплуатации зданий рекомендовать на РМ с ПК и спальных местах обеспечивать безопасные и комфортные условия факторов ЭМП, приведенные в табл. 2.
3. Просить руководителя Роспотребнадзора РФ:
 - 3.1. Включить в новый СанПиН 1.2.3685-21 исключенную табл. 7.12 СанПиН 2.2.4.3359-16 – ПДУ показателей ЭМП на РМ с ПК (желательно в редакции показателей табл. 1 данной статьи).
 - 3.2. Способствовать пропаганде самоконтроля условий безопасности ЭМП РМ с ПК дистанционными работниками.

Вклад авторов

Ю.Г. Рябов – формирование идеи статьи; проведение исследований, в т.ч. анализ норм на воздействие ЭМП в российских и зарубежных нормативных документах, анализ опасных условий для РМ с ПК в существующих электрических сетях жилых домов; разработка рекомендаций по уменьшению ЭМП и

формулировка рекомендуемых показателей ЭМП для РМ с ПК в жилых помещениях; написание текста статьи.

Н.М. Легкий – развитие ключевых целей и задач; проведение исследований, в т.ч. анализ средств защиты от электропоражения и КЗ в электрических сетях; анализ «безопасных» систем электроснабжения, необходимых для РМ с ПК в жилых домах; анализ и обобщение данных литературы; формулировка рекомендуемых показателей ЭМП для РМ с ПК для жилых домов; подготовка, создание и форматирование работы.

Г.В. Ломаев – развитие ключевых целей и задач; проведение исследований, в т.ч. анализ параметров российских нормативных документов на ЭМП и интерпретация полученных данных; разработка критериев оценки безопасности электрических сетей в жилых домах; анализ и обобщение данных литературы; формулировка рекомендуемых показателей ЭМП для РМ с ПК для жилых домов; критический пересмотр статьи с внесением ценных замечаний.

Все авторы – утверждение окончательного варианта статьи; интерпретация результатов исследования; формулировка выводов.

Authors' contribution

Yu.G. Ryabov—development of the research concept; conducting research, in particular, analysis of standards for the impact of EMF in Russian and foreign regulatory documents and analysis of dangerous conditions for RM PCs in existing electrical networks of residential buildings; development of recommendations for reducing EMF and formulation of required EMF indicators for RM PC in residential buildings; writing the text of the article.

N.M. Legkiy—design of key goals and objectives; conducting research, in particular, analysis of means of protection against electric shocks and short circuits in electrical networks; analysis of safe power supply systems required for RM PCs in residential buildings; analysis of literature data; formulation of required EMF indicators for RM PCs in residential buildings; writing and editing the text of the article.

G.V. Lomaev—design of key goals and objectives; conducting research, in particular, analysis of the Russian regulatory documents for EMF and interpretation of the data obtained; development of criteria for assessing the safety of electrical networks in residential buildings; analysis of literature data; formulation of required EMF indicators for RM PC in residential buildings; critical revision of the article with the introduction of valuable comments.

All authors—interpreting the study results, formulating the conclusions, and final approval of the version to be published.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябов Ю.Г., Яковлев Г.Н., Ломаев Г.В., Яшин А.А., Билецкий С.Э. Погода в доме. *Охрана труда и социальное страхование*. 2014;4:60–70.
2. Репин А.А., Ломаев Г.В., Рябов Ю.Г. Преимущества электроснабжения IT (TT) вместо TN в жилых домах. *Стандарты и Качество*. 2020;4:105–109.

REFERENCES

1. Ryabov Yu.G., Yakovlev G.N., Lomaev G.V., Yashin A.A., Biletskii S.E. Weather in the house. *Okhrana truda i sotsial'noe strakhovanie*. 2014;4:60–70 (in Russ.).
2. Repin A.A., Lomaev G.V., Ryabov Yu.G. The advantages of the IT (TT) systems in residential buildings. *Standarty i Kachestvo = Standards and Quality*. 2020;4:105–109 (in Russ.).

3. Dugan R., McGranaghan M., Santoso A., Beaty H. *Electrical power systems quality*. 3rd ed. New-York: McGraw-Hill; 2012. 580 p.
4. Johnson D.O., Hassan K.A. Issues of power quality in electrical systems. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 2016;5(4):148–154. <http://doi.org/10.11648/j.ijepe.20160504.12>
5. Khalid S., Dwivedi B. Power quality issues, problems, standards & their effects in industry with corrective means. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2011;1(2):1–11.
6. Canteli M.M. Power Quality monitoring. In: Moreno-Muñoz A. (Ed.). *Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment*. London: Springer; 2007. P. 15–40.
7. Большаков О.В., Васильева О.А. О происхождении и измерении гармонических искажений в электрических сетях. В сб.: *Управление качеством электрической энергии*. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. М.: ООО «Центр полиграфических услуг Радуга»; 2017. С. 57–75.
8. Архипов М.Э., Куротченко Л.В., Новиков А. С., Субботина Т.И., Хадартцев А.А., Яшин А.А. *Воздействие право- и левовращающихся электромагнитных полей на биообъекты: физические модели и эксперимент*; под ред. Т.И. Субботиной и А.А. Яшина. М.: Триада; 2007. 200 с. ISBN 978-5-94789-249-9
9. Drandić A., Trkulja B. Transformer electric field calculation using BEM and FEM. *Procedia Engineering*. 2017;202:312–318. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.719>
10. Легкий Н.М., Шумилин В.К., Елин А.М. *Современные подходы по организации и проведению работ по оценке и снижению профессиональных и производственных рисков*. М.: Онтопринт; 2021. 512 с.
11. Dixon L.H. *Magnetic field evaluation in transformers and inductors*. Texas Instruments Application Note SLUP171. 2004. 14 p. URL: <https://www.ti.com/lit/ml/slup171/slup171.pdf>
12. Glaria F., Arnedo I., Sánchez-Ostiz A. Advances in residential design related to the Influence of geomagnetism. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018;15(2):387. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020387>
13. Стурман В.И. Пространственное распределение электромагнитных полей промышленной частоты в городе Пушкин (Санкт-Петербург). *Известия Русского географического общества*. 2019;151(6):58–68. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151658-68>
14. Бинги В.Н. *Принципы электромагнитной биофизики*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2011. 592 с. ISBN 978-5-9221-1333-5
3. Dugan R., McGranaghan M., Santoso A., Beaty H. *Electrical power systems quality*. 3rd ed. New-York: McGraw-Hill; 2012. 580 p.
4. Johnson D.O., Hassan K.A. Issues of power quality in electrical systems. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 2016;5(4):148–154. <http://doi.org/10.11648/j.ijepe.20160504.12>
5. Khalid S., Dwivedi B. Power quality issues, problems, standards & their effects in industry with corrective means. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2011;1(2):1–11.
6. Canteli M.M. Power Quality monitoring. In: Moreno-Muñoz A. (Ed.). *Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment*. London: Springer; 2007. P. 15–40.
7. Bol'shakov O.V., Vasil'eva O.A. On the origin and measurement of harmonic distortions in electrical networks. In: *Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii: (Power Quality Management): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Moscow: Tsentr poligraficheskikh uslug Raduga; 2017. P. 57–75 (in Russ.).
8. Arhipov M.E., Kurotchenko L.V., Novikov A.S., Subbotina T.I., Khadartsev A.A., Yashin A.A. *Vozdeistvie pravo- i levovrashchayushchikhsya elektromagnitnykh polei na bioob"ekty: fizicheskie modeli i eksperiment. (Impact of right and left rotating electromagnetic fields on biological objects: physical models and experiment)*. Subbotina T.I., Yashin A.A. (Eds.). Moscow: Triada; 2007. 200 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94789-249-9
9. Drandić A., Trkulja B. Transformer electric field calculation using BEM and FEM. *Procedia Engineering*. 2017;202:312–318. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.719>
10. Legkiy N.M., Shumilin V.K., Elin A.M. *Sovremennye podkhody po organizatsii i provedeniyu rabot po otsenke i snizheniyu professional'nykh i proizvodstvennykh riskov (Modern approaches to organizing and carrying out work to assess and reduce professional and industrial risks)*. Moscow: Ontoprint; 2021. 512 p. (in Russ.).
11. Dixon L.H. *Magnetic field evaluation in transformers and inductors*. Texas Instruments Application Note SLUP171. 2004. 14 p. Available from URL: <https://www.ti.com/lit/ml/slup171/slup171.pdf>
12. Glaria F., Arnedo I., Sánchez-Ostiz A. Advances in residential design related to the influence of geomagnetism. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018;15(2):387. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020387>
13. Sturman V.I. The pattern of power frequency electromagnetic fields in the Pushkin municipal area of Saint Petersburg. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2019;151(6):58–68 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151658-68>
14. Bingi V.N. *Printsipy elektromagnitnoi biofiziki (Principles of electromagnetic biophysics)*. Moscow: FIZMATLIT; 2011. 592 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-1333-5

Об авторах

Рябов Юрий Георгиевич, к.т.н., доцент кафедры инженерной экологии техносферы Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: riabovug@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-3028-8776>

Легкий Николай Михайлович, д.т.н., заведующий кафедрой инженерной экологии техносферы Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: legki@mirea.ru. Scopus Author ID 56178415900. <http://orcid.org/0000-0003-1242-5113>

Ломаев Гелий Васильевич, д.т.н., профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова (426069, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, д. 7).

About the authors

Yuri G. Ryabov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Ecology of the Technosphere, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: riabovug@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-3028-8776>

Nikolai M. Legkiy, Dr. Sci. (Eng.), Head, Department of Engineering Ecology of the Technosphere, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: legki@mirea.ru. Scopus Author ID 56178415900, <http://orcid.org/0000-0003-1242-5113>

Geliy V. Lomaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department “Instruments and Methods of Measurement, Control, Diagnostics,” Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya ul., Izhevsk, 426069 Russia).

УДК: 537.226
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-28-34>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Локальные пьезоэлектрические свойства перфорированных сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция

Н.Э. Шерстюк [®]

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

Резюме

Цели. Методика травления фокусированным ионным пучком остается одной из наиболее востребованных для изготовления двумерных фотонных кристаллов и структур на основе функциональных материалов. Данная методика достаточно хорошо отработана для полупроводников. Но в то же время изменение свойств сегнетоэлектрических материалов под действием фокусированного ионного пучка, в т.ч. параметров распределения и переключения поляризационного состояния под действием электрического поля, остается слабоизученным. Цель работы – определение локальных пьезоэлектрических параметров в перфорированных сегнетоэлектрических пленках титаната бария-стронция ($Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$) с упорядоченными вертикальными воздушными каналами, изготовленными методом травления фокусированным ионным пучком.

Методы. Экспериментальные исследования проведены методом силовой микроскопии пьезоотклика при приложении электрического поля в планарной геометрии.

Результаты. Показано, что перфорация сегнетоэлектрической пленки приводит не только к формированию значительных неоднородностей в распределении пьезоэлектрического отклика в структуре, но и к заметному росту величины как вертикальной, так и латеральной компоненты пьезоотклика вблизи отверстий перфорации. Результаты расчета показали, что наибольшее усиление наблюдается для латеральной компоненты пьезоотклика: от 5 пм/В для неперфорированной пленки до 65 пм/В в области перфорации.

Выводы. Наиболее вероятным механизмом подобного изменения свойств является влияние нарушенного слоя, возникающего на границе и внутренней поверхности вертикальных воздушных каналов. Свойства этого слоя обусловлены двумя факторами: аморфизацией структуры в результате травления фокусированным ионным пучком и возникновением вблизи отверстия закрепленных доменных состояний, приводящих к формированию сложного распределения пьезоотклика как на границе отверстий, так и в промежутке между отверстиями перфорации. Полученная информация имеет значение для понимания особенностей формирования локальных пьезо- и сегнетоэлектрических откликов фотонных кристаллов, изготовленных травлением фокусированным ионным пучком, а также для поиска путей управления их состоянием при приложении внешнего электрического поля.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, фотонные кристаллы, силовая микроскопия пьезоотклика, травление фокусированным ионным пучком

• Поступила: 04.08.2021 • Доработана: 18.10.2021 • Принята к опубликованию: 02.03.2022

Для цитирования: Шерстюк Н.Э. Локальные пьезоэлектрические свойства перфорированных сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):28–34. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-28-34>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Local piezoelectric properties of perforated ferroelectric barium–strontium titanate films

Natalia E. Sherstyuk [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Focused ion beam etching remains one of the most common methods for fabricating 2D photonic crystals and structures based on functional materials. This technique is quite well developed for semiconductors. But at the same time, the change in the properties of ferroelectric materials under the action of a focused ion beam, including parameters of distribution and switching of the polarization state under the action of an electric field, remains poorly studied. The purpose of this work is to determine the local piezoelectric parameters in perforated ferroelectric films of barium strontium titanate ($\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$) with ordered vertical air channels fabricated by focused ion beam etching.

Methods. Experimental studies were conducted using piezoresponse force microscopy under applied electric field in planar geometry.

Results. It is shown that the perforation of a ferroelectric film leads not only to the formation of significant inhomogeneities in the piezoelectric response distribution in the structure, but also to the noticeable increase in the magnitude of both the vertical and lateral components of the piezoresponse near the perforation holes. The calculation results showed that the greatest enhancement is observed for the lateral component of the piezoresponse: from 5 pm/V for a nonperforated film to 65 pm/V in the perforated area.

Conclusions. The most probable mechanism for such a change in properties is the influence of a disturbed layer that occurs at the boundary and the inner surface of vertical air channels. The properties of this layer are due to two factors: amorphization of the structure as a result of the focused ion beam etching and the appearance of pinned domain states near the hole, leading to the formation of the complex piezoresponse distribution both at the hole boundary and in the gap between the perforations. The information obtained is important for understanding the peculiarities of the formation of local piezoelectric and ferroelectric responses in photonic crystals fabricated by focused ion beam etching, as well as for finding ways to control their state when an external electric field is applied.

Keywords: ferroelectrics, photonic crystals, piezoresponse force microscopy, focused ion beam etching

• Submitted: 04.08.2021 • Revised: 18.10.2021 • Accepted: 02.03.2022

For citation: Sherstyuk N.E. Local piezoelectric properties of perforated ferroelectric barium–strontium titanate films. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):28–34. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-28-34>

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

Практическое применение сегнетоэлектрических тонких пленок обусловлено особенностями формирования доменной структуры и ее изменения под действием внешнего электрического поля. При толщинах пленки менее 100 нм средний размер домена становится близким к толщине пленки, а на распределение доменов в единице объема оказывают существенное влияние дефекты различной природы, топология поверхности и свойства границ раздела. Эти факторы приводят не только к заметным искажениям параметров переключения (например, изменяется величина коэрцитивного поля, возникает асимметрия петли гистерезиса и т.д.), но также к изменениям оптических и нелинейно-оптических свойств сегнетоэлектрической пленки, обусловленных ее поляризационным состоянием [1, 2]. Тем не менее, этот подход открывает возможность для создания в рамках одной технологии широкого спектра функциональных элементов интегральной электроники и фотоники с контролируемым изменением параметров за счет формирования на поверхности или в объеме функционального материала упорядоченных структур с определенной геометрией – сверхрешеток и фотонных кристаллов (ФК).

С развитием интегральной фотоники и разработкой новых принципов функционирования ее элементов особую актуальность приобретают системы, основанные на комбинации ФК нескольких типов (например, одномерные – двумерные) или на комбинации ФК одного типа, но с разными геометрическими параметрами, что обеспечивает реализацию в рамках чипа различных процессов. Этот подход уже используется в конструкции гибридных электронно-фотонных чипов, основанных на полупроводниковых материалах. Аналогичные устройства на основе двумерных сегнетоэлектрических фотонных кристаллов (СЭФК), очевидно, не столь распространены, однако принципиальная возможность создания с их помощью перестраиваемых устройств, управляемых при помощи электрического поля, поддерживает постоянный интерес исследователей к этим материалам [3–6].

Одной из наиболее распространенных методик изготовления двумерных СЭФК является методика травления фокусированным ионным пучком (focused ion beam, FIB), которая, по сравнению с методиками литографии, обладает рядом преимуществ. Она легче адаптируется к различным материалам и обеспечивает возможность изготовления структур с разной геометрией в рамках одного технологического цикла, обеспечивая при этом сравнительно низкие энергозатраты при достаточно высоком, вплоть до 5 нм, пространственном разрешении [7].

В работе [8] на основании численного моделирования было показано, что доменная структура двумерных СЭФК, представляющих собой упорядоченный массив суб-микроразмерных отверстий, достаточно сложна даже в условиях упрощенной модели, не учитывающей дефекты структуры и приповерхностного слоя. В этом случае распределение поляризации зависит от числа и взаимного расположения каналов, а также от деполяризующего поля, возникающего на внутренней поверхности каналов. В частности, было показано, что периодическая перфорация однородной сегнетоэлектрической пленки цилиндрическими вертикальными воздушными каналами приводит к формированию поляризационных вихрей на краю отверстий, которые, в свою очередь значительно усиливают электрическое поле в области между отверстиями. Это утверждение было частично подтверждено методом электросилового микроскопии и генерации второй оптической гармоники (ГВГ) в работах [9–11]. Однако результаты, полученные методом ГВГ, благодаря пространственному разрешению методики, ограниченному длиной волны используемого излучения, позволяют получить только качественное совпадение с результатами работы [8].

Несмотря на значительное число проведенных исследований, вопрос влияния метода изготовления и геометрических параметров элементов СЭФК на распределение поляризации в перфорированной области и, следовательно, на возможность управлять состоянием и свойствами материала при приложении внешнего электрического поля, остается слабоизученным. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования методом силовой микроскопии пьезоотклика (piezoresponse force microscopy, PFM) состояния сегнетоэлектрической поляризации в краевой области отверстий перфорированных сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция при приложении электрического поля в планарной геометрии. Такая структура позволяет проводить локальные исследования процесса переключения, как в пленке, так и в приэлектродной области, при этом, в отличие от z-геометрии, регистрируемый пьезоотклик не усредняется по всей толщине пленки.

ИССЛЕДУЕМЫЕ СТРУКТУРЫ И ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкие пленки титаната бария-стронция $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ (BST) толщиной 1 мкм были эпитаксиально выращены на подложке MgO(001) методом высокочастотного распыления керамических мишеней [12]. Внешнее электрическое поле формировалось в плоскости пленки при помощи алюминиевой встречно-штыревой системы электродов (ВШСЭ)

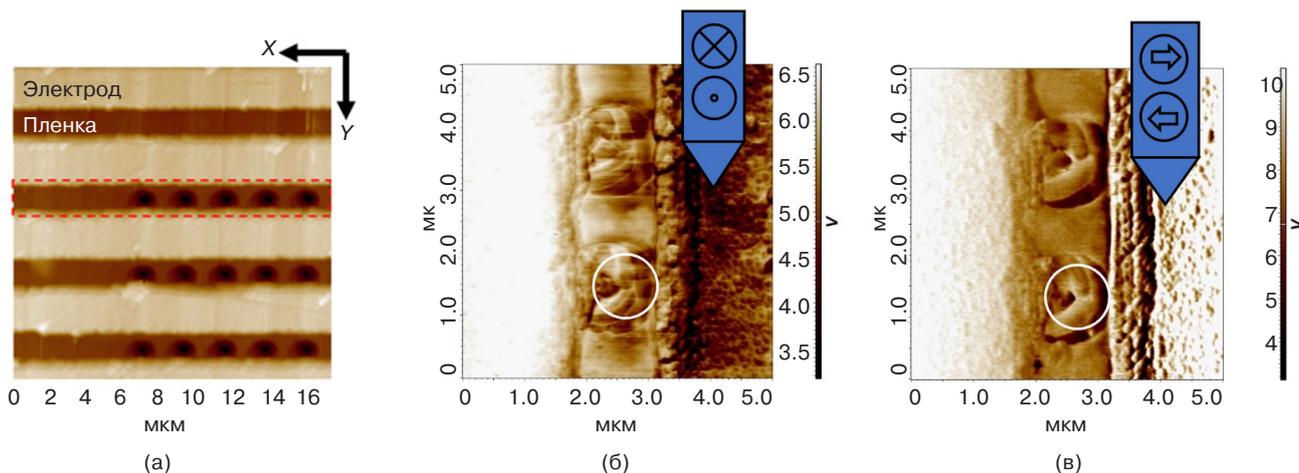


Рис. 1. Топография исследуемой структуры в области перфорации, полученная методом атомно-силовой микроскопии (а) и распределения вертикальной (б) и латеральной (в) компонент пьезоотклика, полученных методом PFM для двух соседних отверстий перфорации в области, выделенной пунктиром на позиции (а). Белым кружком отмечена граница вертикального канала

с шириной зазора между электродами 1 мкм и периодом 2 мкм; высота электрода составляла 200 нм. Методом FIB в зазорах между электродами была сформирована система упорядоченных вертикальных воздушных каналов с диаметром отверстия порядка 880 нм. Для травления использовался микроскоп Quanta 3D (FEI Technology, США), травление проводилось ионами галлия, ток травления составлял 0.5–0.7 нА (рис. 1а). Глубина отверстий оценивалась по времени травления и составляла порядка 1 мкм.

Исследование локальных пьезоэлектрических свойств полученной структуры проводилось методом PFM с использованием контактной моды сканирующего зондового микроскопа Ntegra Aura (НТ-МДТ, Москва, Россия) в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 1б, 1в), соответственно. Во время сканирования движение кантилевера было сильно ограничено сложной структурой соединительных электродов и значительными колебаниями топографии образца. Поэтому сканирование проводилось только в одном направлении, перпендикулярном электродам (по оси Y на рис. 1а). Для измерений использовались кантилеверы серии PPP-EFM (резонансная частота 45–115 кГц; силовая константа 0.5–9.5 Н/м, NANOSENSORS, Швейцария). К ВШСЭ прикладывалось напряжение в диапазоне 5–30 В. Измерения методом PFM проводились при приложении переменного напряжения с частотой 50 кГц и амплитудой 5 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры PFM-изображений вертикальной (vertical piezoresponse force microscopy, VPFM) и латеральной (lateral piezoresponse force microscopy,

LPFM) компонент пьезоотклика на краю воздушного канала (область 1) и в области, расположенной примерно посередине между двумя каналами (область 2), приведены на рис. 1б и 1в, соответственно. Видно, что распределения пьезоотклика в этих областях отчетливо различаются. В неперфорированной области между электродами распределения обеих составляющих пьезоотклика более или менее однородны. При подаче напряжения на электроды в неперфорированной структуре максимальное значение пьезоотклика локализуется в приэлектродной области. Это согласуется с результатами работы [13], где показано, что на границе электрода происходит резкое возрастание обеих компонент электрического поля. В наших измерениях снижение интенсивности от максимального до среднего значения в зазоре наблюдается на расстоянии примерно 250 нм как для латеральной, так и для вертикальной компоненты. При приложении поля противоположного знака околоэлектродный пик пьезоотклика имеет другое значение: максимум интенсивности пьезоотклика при приложении постоянного напряжения +10 В существенно (в 2.8 раза для латеральной и примерно в 1.7 раза для вертикальной компоненты пьезоотклика) превышает аналогичное значение при воздействии постоянного напряжения –10 В. Одной из причин этого различия может быть непереключаемая поляризация, обычно возникающая на границе раздела пленка/подложка из-за механического стресса, обусловленного рассогласованием периодов кристаллических решеток. Однако при толщине пленки 1 мкм влияние этой поляризации на боковую составляющую пьезоотклика вблизи поверхности можно считать незначительным. Другим объяснением этой разницы в пьезоотклике может быть вклад в регистрируемый сигнал за счет изменения профиля

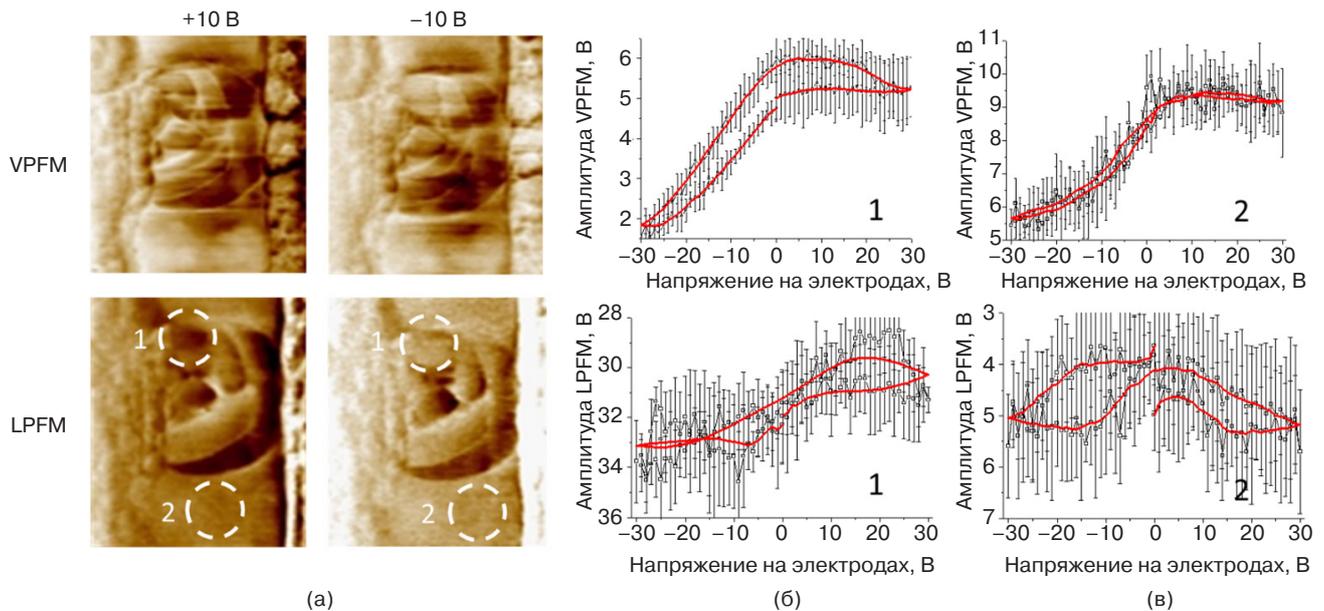


Рис. 2. Карты распределения пьезоотклика в области одного отверстия перфорированной структуры при приложении внешнего поля к встречно-штыревым электродам (а) и зависимость амплитуды вертикального (верхние панели) и латерального (нижние панели) пьезоотклика от напряжения на электродах встречно-штыревой системы электродов, измеренные в областях 1 (рис. 2б) и 2 (рис. 2в). Красная линия – результат усреднения по 5 измерениям для каждого цикла

всей структуры, вызванного пьезоэффектом в пленке под электродами. Ранее нами было показано [9], что электрическое поле может приводить к изменению профиля структуры в пределах нескольких сотен нанометров. При подаче напряжения +10 В изменение профиля не превышает 50 нм, но этого может быть достаточно для заметного смещения лазерного луча в системе регистрации атомно-силового микроскопа, что в результате проявляется в асимметрии пьезоотклика. Этот вопрос требует уточнения.

Как видно из рис. 2а, на границе отверстия перфорированной структуры можно выделить точки, в которых наблюдается изменение (переключение) поляризации при приложении к электродам противоположной разности потенциалов (например, область 1), и точки, сохраняющие свое состояние при любом значении приложенного поля. Такое распределение объясняется влиянием не только особенностей рельефа, но и нескольких механизмов. Прежде всего, на распределение пьезоотклика влияют структурные дефекты, возникающие на внутренней поверхности и на краю отверстия в результате травления. Воздействие ионов высокой энергии выражается, во-первых, в имплантации высокоэнергетических ионов Ga^+ в структуру материала, а во-вторых – в формировании большого числа микроразрушений на поверхности и, как следствие, в аморфизации приповерхностного слоя. Эти факторы создают на поверхности структуры (на краю отверстия и на внутренней поверхности воздушного канала) дефектный слой, свойства которого могут существенно отличаться от свойств основного

материала [14, 15]. В работе [15] было показано, кроме того, что поврежденная область не ограничивается структурой, заданной электронным шаблоном, а распространяется не менее, чем на 1 мкм от ее края вглубь области, не подвергшейся травлению. Эти повреждения и связанные с ними искажения свойств тем более существенны, чем более сложной и более зависимой от локальных поляризационных свойств является структура ФК-элементов. Грубая оценка параметров зерен в области отверстий, выполненная с помощью программного обеспечения сканирующего зондового микроскопа Ntegra Aura компании НТ-МДТ, показала, что большинство зерен в отверстиях имеют средний размер менее 100 нм, что соответствует аморфной структуре.

Еще одним фактором, оказывающим влияние на неоднородность итогового распределения пьезоотклика, является пиннинг доменов к внутренней поверхности воздушного канала, которые взаимодействуют с боковой поверхностью проводящей иглы кантилевера. В результате общий пьезоотклик в области отверстия имеет гораздо большую интенсивность и неоднородность, чем типичный отклик аморфной структуры.

Для исследования влияния дефектного слоя на параметры пьезоотклика были измерены петли пьезоэлектрического гистерезиса в области, содержащей переключаемый домен (область 1 на рис. 2а) и в промежутке между двумя воздушными каналами (область 2 на рис. 2а). Детали методики измерения приведены в работе [9]. Так как структура обладает значительным числом дефектов, проводилось

усреднение по 5 измерениям для каждого цикла. Результаты отдельных измерений, усредненное значение и погрешности для вертикального и латерального пьезоотклика представлены на рис. 2б и 2в, соответственно. При измерениях внешнее напряжение смещения изменялось от начального состояния (0 В) к положительному значению и обратно.

Как видно из рис. 2, петля вертикального пьезоотклика в области 1 не симметрична и имеет сравнительно низкое насыщенное состояние при +10 В и большое, порядка 3 ГВ/м, поле насыщения при отрицательном значении приложенного поля. Петля вертикального пьезоотклика в области 2 (в зазоре между отверстиями) более симметрична и немного смещена в отрицательную часть. Непереключаемая поляризация, вызванная механическими напряжениями на границе с подложкой, не оказывает влияния на формирование пьезоотклика. Следовательно, такой сдвиг можно объяснить влиянием закрепленных доменных состояний вблизи границы отверстия воздушного канала. Возможность образования короткодействующих мезомасштабных доменов в перфорированной сегнетоэлектрической структуре подтверждается в ряде работ (например, в [16]).

Полевые зависимости латерального пьезоотклика, зарегистрированного в области 1, демонстрируют более сложное пьезоэлектрическое поведение по сравнению с тем, которое наблюдается в промежутке между отверстиями (область 2). Такое поведение согласуется с релаксацией механической деформации вблизи отверстий, где материал пленки удаляется ионным травлением [17]. Однако важной особенностью этих результатов является то, что перфорированная структура показала высокий отклик в сигнале LPFM даже при гистерезисном поведении. Увеличение сигнала PFM и различные тенденции завершения петли можно объяснить предположением, что домены LPFM сформировали замкнутую структуру вокруг отверстия с противоположной ориентацией пространственных доменов. В соответствии с этим предположением сигнал LPFM во второй области формируется в условиях взаимовлияния двух 180-градусных доменов от соседних отверстий, в результате чего между отверстиями образуются 90-градусные домены, которые визуализируются посредством измерения VPFM. Этот механизм отчасти согласуется с результатами моделирования, представленными в работе [8], и требует дальнейшего детального исследования.

На основании измеренных пьезоэлектрических гистерезисов были проведены оценки величины пьезокоэффициентов в областях 1 и 2 в соответствии с подходом, изложенным в работах [9, 10], где принимается, что эффективные пьезокоэффициенты вертикального d_V и латерального d_L отклика равны: $d_V \approx d_{33}$, $d_L \approx d_{15} \pm d_{31}$.

Результаты расчета показали, что перфорация сегнетоэлектрической пленки приводит к увеличению латеральной компоненты пьезоотклика от $d_L = 5$ пм/В для неперфорированной пленки до 65 пм/В в области перфорации. Тензор VPFM также увеличился, но не так резко – с 11 пм/В до 40 пм/В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При формировании упорядоченной структуры вертикальных воздушных каналов в эпитаксиальной пленке сегнетоэлектрика $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ методом травления фокусированным ионным пучком на внутренней поверхности воздушного канала образуется нарушенный слой, свойства которого обусловлены двумя факторами: аморфизацией структуры и возникновением вблизи границы канала закрепленных доменных состояний. Это, в свою очередь приводит к формированию сложного распределения пьезоотклика в области отверстия перфорации. Если в неперфорированной структуре преобладает вертикальная компонента пьезоотклика, то в перфорированной структуре вклад латеральной компоненты возрастает за счет формирования в прилегающей к границе отверстия области сложной структуры с противоположной ориентацией доменов. Перфорация приводит к увеличению по сравнению с неперфорированной пленкой как вертикальной, так и латеральной компонент пьезоотклика. Полученные результаты необходимо принимать во внимание при расчете и моделировании распределения пьезоэлектрических свойств двумерных фотонных кристаллов на основе сегнетоэлектрических пленок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит М.С. Иванова (Университет Авейро, Португалия) за помощь в проведении исследований методом PFM.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Scott J.F., Paz de Araujo C.A. Ferroelectric memories. *Science*. 1989;246(4936):1400–1405. <https://doi.org/10.1126/science.246.4936.1400>
2. Wang Y.G., Zhong W.L., Zhang P.L. Surface and size effects on ferroelectric films with domain structures. *Phys. Rev. B*. 1995;51(8):5311–5314. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.5311>
3. Lin P.T., Yi F., Ho S.-T., Wessels B.W. Two-dimensional ferroelectric photonic crystal waveguides: simulation, fabrication, and optical characterization. *J. Lightwave Technol.* 2009;27(19):4330–4337. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2023808>
4. Matveev O., Morozova M., Romanenko D. Concept of using composite multiferroic structure magnonic crystal – ferroelectric slab as memory unit. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1389(1):012041(1–5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1389/1/012041>

5. Hu X., Gong Q., Feng S., Cheng B., Zhang D. Tunable multichannel filter in nonlinear ferroelectric photonic crystal. *Opt. Commun.* 2005;253(1–3):138–144. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.04.056>
6. Takeda H., Yoshino K. Tunable photonic band gaps in two-dimensional photonic crystals by temporal modulation based on the Pockels effect. *Phys. Rev. E.* 2004;69(1Pt2):016605(1–5). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.016605>
7. Ferri A., Rémiens D., Desfeux R., Da Costa A., Deresmes D., Troadec D. Evaluation of damages induced by Ga⁺-focused ion beam in piezoelectric nanostructures. In: Wang Z. (Ed.). *FIB Nanostructures. Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology*. Cham: Springer; 2013. V. 20. P. 417–434.
8. Леванюк А.П., Misirlioglu I.B., Мишина Е.Д., Сигов А.С. Эффекты деполаризующего поля в перфорированной пленке двухосного сегнетоэлектрика. *Физика твердого тела.* 2012;54(11):2109–2117. [Levanyuk A.P., Misirlioglu I.B., Mishina E.D., Sigov A.S. Effects of the depolarization field in a perforated film of the biaxial ferroelectric. *Phys. Solid State.* 2012;54(11):2243–2252. <https://doi.org/10.1134/S1063783412110170>]
9. Sherstyuk N.E., Ivanov M.S., Ilyin N.A., Grishunin K.A., Mukhortov V.M., Kholkin A.L., Mishina E.D. Local electric field distribution in ferroelectric films and photonic crystals during polarization reversal. *Ferroelectrics.* 2016;503(1):138–148. <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1217143>
10. Ivanov M.S., Sherstyuk N.E., Mishina E.D., Khomchenko V.A., Tselev A., Mukhortov V.M., Paixao J.A., Kholkin A.L. Enhancement of local piezoelectric properties of a perforated ferroelectric thin film visualized via piezoresponse force microscopy. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017;50(42):425303(1–6). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa8604>
11. Mishina E., Zaitsev A., Ilyin N., Sherstyuk N., Sigov A., Golovko Yu., Muhortov V., Kolesnikov A., Lozovik Yu., Yemsova M., Rasing Th. Switchable nonlinear metalloferroelectric photonic crystals. *Appl. Phys. Lett.* 2007;91(4):041107(1–6). <https://doi.org/10.1063/1.2762284>
12. Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N., Klevtsov A.N. The synthesis mechanism of complex oxide films formed in dense RF – plasma by reactive sputtering of stoichiometric targets. *Ferroelectrics.* 2000;247(1):75–83. <https://doi.org/10.1080/00150190008214943>
13. Брехов К.А. Напряженность электрического поля в планарном конденсаторе на основе тонкой сегнетоэлектрической пленки BaSrTiO₃. *Нано- и микро-системная техника.* 2018;20(9):555–561. <https://doi.org/10.17587/nmst.20.555-561> [Brekhov K.A. Electric field intensity in a planar capacitor based on thin BaSrTiO₃ Ferroelectric Film. *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika = Nano- and Microsystems Technology.* 2018;20(9):555–561 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/nmst.20.555-561>]
14. Volkert C.A., Minor A.M. Focused ion beam microscopy and micromachining. *MRS Bulletin.* 2007;32(05):389–399. <https://doi.org/10.1557/mrs2007.62>
15. Morelli A., Johann F., Schammelt N., Vrejoiu I. Ferroelectric nanostructures fabricated by focused-ion-beam milling in epitaxial BiFeO₃ thin films. *Nanotechnology.* 2011;22(26):265303(1–6). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/26/265303>
16. Kholkin A.L., Kalinin S.V., Roelofs A., Gruverman A. *Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale.* Kalinin S., Gruverman A. (Eds.). New York: Springer; 2006. 988 p.
17. Nagarajan V., Roytburd A., Stanishevsky A., Prasertchoung S., Zhao T., Chen L., Melngailis J., Auciello O., Ramesh R. Dynamics of ferroelastic domains in ferroelectric thin films. *Nat. Mater.* 2003;2(1):43–47. <https://doi.org/10.1038/nmat800>

Об авторе

Шерстюк Наталия Эдуардовна, к.ф.-м.н., доцент кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nesherstuk@mail.ru. Scopus Author ID 6602267129, ResearcherID A-3460-2014. <https://orcid.org/0000-0002-7068-4028>

About the author

Natalia E. Sherstyuk, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nesherstuk@mail.ru. Scopus Author ID 6602267129, ResearcherID A-3460-2014. <https://orcid.org/0000-0002-7068-4028>

УДК 62-214.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-35-42>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Применение комплексного метода для улучшения качества изготовления деталей приборов радиоэлектронной борьбы

А.В. Крюков [®]

ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, Москва, 107078 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: minyuc@yandex.ru

Резюме

Цель. Разработка технологических приемов, направленных на повышение конструктивной прочности изделий оборонного машиностроения, может осуществляться с помощью создания новых способов получения и обработки деталей или улучшения традиционных приемов на основе комплексного (синергетического) подхода. В статье приводится комплексный метод обработки поверхности деталей, оценки твердости и шероховатости поверхности исходной заготовки из сплавов системы Al-Mg для улучшения качества изготовления корпусов модулей изделия МСП-418К, относящегося к приборам систем радиоэлектронной борьбы.

Методы. Данный подход заключался в видении металлического материала как системы, подвергаемой цепочке технологических воздействий в химическом, термодинамическом и механическом взаимодействии своих составляющих. Заготовки получали методом обработки металла давлением по различным схемам и в различных температурных режимах, затем обрабатывали их лезвийным инструментом с использованием динамометра и исследовали полученный рез металлографическим способом по всему торцу от наружного диаметра к центру образца.

Результаты. На примере Al-Mg сплавов проведены эксперименты, позволившие обнаружить зависимость между параметрами изменения структуры обрабатываемого материала и стабильностью процесса обработки резанием, а также качеством поверхности при чистовом точении детали.

Выводы. Предложенные технологические решения на основе синергетического подхода обеспечили сбалансированное улучшение параметров материала за счет устранения недостатков исходного полуфабриката. На основании полученных опытных данных сделан вывод о том, что проводимая деформация заготовок по сложным схемам при пониженной температуре благотворно влияет на обрабатываемость металлического материала, упорядочивание структуры и повышает качество поверхности деталей. При применении синергетического подхода есть возможность исправить плохую технологическую наследственность свойств материалов, полученную на предыдущих операциях; повысить качество поверхности заготовок за счет сплошности обрабатываемого материала; улучшить прочностные свойства деталей ответственного и особо ответственного назначения. Благодаря полученным результатам на практике подвергнут изменению существующий технологический процесс изготовления детали «лепесток», который позволил улучшить ее технологические и технические характеристики.

Ключевые слова: обрабатываемость, отжиг, качество поверхности, нагрузка на режущий инструмент, структура материала, горячекатаные плиты, прессованный пруток

• Поступила: 11.11.2021 • Доработана: 08.12.2021 • Принята к опубликованию: 01.03.2022

Для цитирования: Крюков А.В. Применение комплексного метода для улучшения качества изготовления деталей приборов радиоэлектронной борьбы. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):35–42. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-35-42>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Application of an integrated method to improve the quality of manufacturing parts of electronic warfare devices

Anton V. Kryukov @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: minyyc@yandex.ru

Abstract

Objectives. The development of technological methods with the purpose of increasing the structural strength of defense engineering products can be carried out by creating new methods for obtaining and processing parts or improving traditional methods based on an integrated (synergistic) approach. The article presents a complex method for surface treatment of parts and assessment of the hardness and surface roughness of the initial workpiece from alloys of the Al–Mg system to improve the quality of manufacturing the module cases of the *MSP-418K* product related to electronic warfare devices.

Methods. This approach consists in the vision of a metallic material as a system subjected to a chain of technological impacts in the process of chemical, thermodynamic, and mechanical interaction of its components. The workpieces were obtained by metal pressure treatment according to various schemes and temperature conditions. Then they were processed with a blade tool using a dynamometer. The resulting cut was examined using a metallographic method along the entire end face from the outer surface to the center of the sample of workpieces.

Results. Experiments were carried out for the case of Al–Mg alloys. It made it possible to reveal the relationship between the parameters of the change in the structure of the material being processed and the stability of the cutting process, as well as the quality of the surface during finishing turning.

Conclusions. The proposed technological solutions based on a synergistic approach provided a balanced improvement in material parameters by eliminating the shortcomings of the original semi-finished product. The obtained experimental data allowed concluding the deformation of workpieces according to complex schemes at low temperature has a beneficial effect on the machinability of the metal material, ordering the structure and improving the quality of the surface of the parts. Using a synergistic approach, it became possible to correct the poor technological heredity of material properties obtained in previous operations: the surface quality of the workpieces due to the continuity of the processed material and the strength properties of parts for critical and especially critical purposes were improved. The existing technological process for manufacturing the “petal” part was changed in practice using an integrated method, which made it possible to improve its technological and technical characteristics.

Keywords: machinability, annealing, surface quality, cutting tool load, material structure, hot-rolled plates, extruded bar

• Submitted: 11.11.2021 • Revised: 08.12.2021 • Accepted: 01.03.2022

For citation: Kryukov A.V. Application of an integrated method to improve the quality of manufacturing parts of electronic warfare devices. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):35–42. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-35-42>

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

Радиоэлектронная борьба (РЭБ) – вооруженная борьба, в ходе которой осуществляется воздействие радиоизлучениями (радиопомехами) на радиоэлектронные средства систем управления, связи и разведки противника. Изделия РЭБ применяются для защиты электронного оборудования от воздействия на него мощного электромагнитного и акустического излучения, а также высокоточного оружия, оснащенного пассивными приборами самонаведения на источники радиоизлучения. Применение селективно направленного оружия против радиоэлектронных средств (РЭС), как правило, не приводит к катастрофическим разрушениям и невозполнимым потерям [1]. Такое оружие лишает радиоэлектронные устройства возможности нормального, штатного функционирования. К одному из таких изделий относится малая станция помех МСП-418К (рис. 1).

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ WDM-МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ/ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ С МАЛЫМИ ИЗГИБНЫМИ ПОТЕРЯМИ

Станция предназначена для оснащения мишеней, авиационных ложных целей, индивидуальной и индивидуально-взаимной защиты малоразмерных летательных аппаратов, например, МиГ29, МиГ31 путем

создания преднамеренных активных помех радиоэлектронных средств управления оружием (РЭС УО), входящим в зенитно-ракетные, зенитно-артиллерийские и авиационно-ракетные комплексы. Данная станция относится к средствам радиоэлектронного подавления (РЭП) пятого поколения, так как позволяет существенно расширять боевые возможности авиации.

Станция обеспечивает одновременное создание преднамеренных прицельных активных помех не менее чем четырем РЭС УО, в том числе радиоловушкам самонаведения (РГСН), при разносе их несущих частот более 100 МГц. Чувствительность в диапазоне рабочих частот по входу для импульсного сигнала составляет не более 51 дБ Вт, для непрерывного сигнала, квазинепрерывного сигнала и длинного (импульсного) сигнала – не более 68 дБ Вт. Масса изделия составляет не более 170 кг, диапазон рабочих частот – от 4 до 18 ГГц.

Станция МСП-418К состоит из нескольких блоков, двух переключателей ПК-1-2, комплекта кабельных сборок ККС Л-281-1, комплекта низкочастотных жгутов КНЧЖ Л-281-1, комплекта аттенуаторов Кат Л-281-1, двух комплектов монтажных частей КМЧ Л-281-1, а также КМЧ (У) Л-281-1.

Изделие Л-281-1 построено на основе цифровой обработки сигналов с использованием технологии цифровой радиочастотной памяти и предназначено для противодействия РЭС УО, работающим

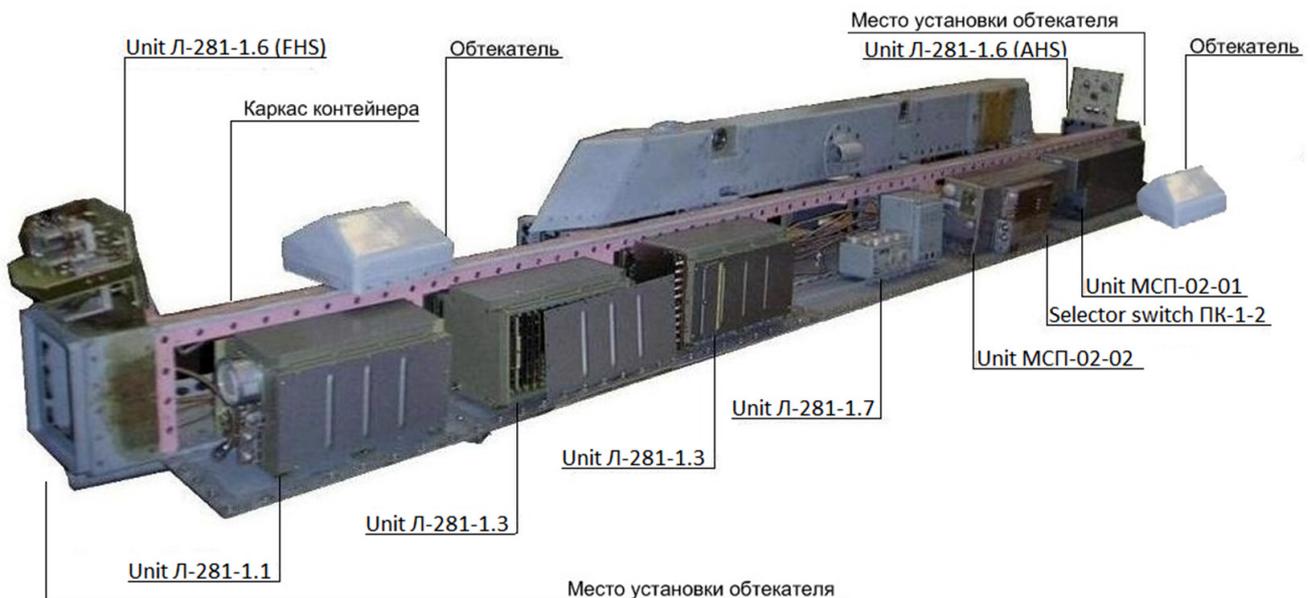


Рис. 1. Конструкция малой станции помех МСП-418К

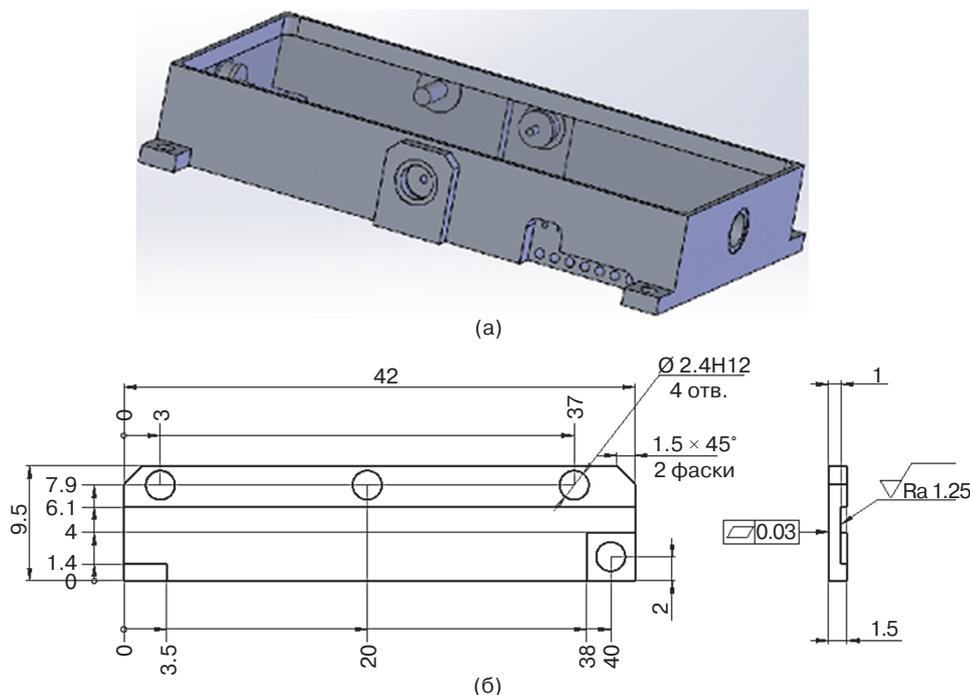


Рис. 2. Модель корпуса (а) и чертеж рамки (б) из МД-40

в импульсном, непрерывном, импульсно-доплеровском и длинноимпульсном режимах¹. В блоки станции входят различные типовые модули, которые состоят из корпуса и электронной начинки, а также типовых деталей микросборок (рис. 2).

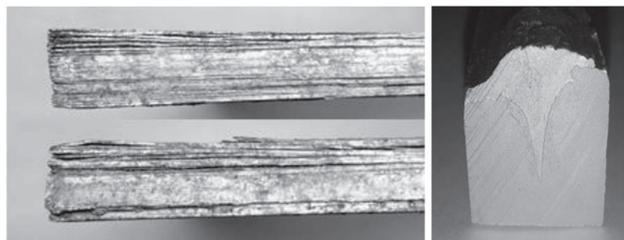
Эти детали относятся к классу ответственного и особо ответственного назначения. Они обеспечивают вакуумную плотность и геометрическую точность при полном сроке эксплуатации. При этом, несмотря на многолетнюю практику изготовления, распространенной причиной электрического пробоя и выхода из строя их электронной начинки являются нарушения вакуумной плотности корпусов и геометрии деталей микросборок [2].

Корпуса микросборок изготавливают из горячекатаных плит на основе алюминиевых сплавов системы Al-Mg (рис. 3а). Их применение обосновывается простотой технологического процесса^{2, 3}.

При этом не учитывается высокий уровень полученных в процессе прокатки внутренних напряжений в материале (рис. 3б), которые тем выше, чем больше толщина плиты [2, 3]. Кроме того, в структуре горячекатаных плит формируются «строчки» интерметаллидных фаз Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 , причем особенно активно это происходит в зонах локализации деформаций и разрыва их скоростей (рис. 3в) [4].



(а)



(б)

(в)

Рис. 3. Процесс изготовления корпусов микросборок из горячекатаных алюминиевых сплавов системы Al-Mg (а); результат расслоения плиты из-за межкристаллитной коррозии (б); дефект в материалах горячекатаной плиты (в)

¹ Малогабаритная станция активных помех МСП-418К (COMPACT JAMMER MSP-418K). Журнал оборонно-промышленного комплекса. 18.08.2009. URL: <http://bastion-karpenko.ru/compact-jammer-msp-418k/>, дата обращения 10.11.2021. [Compact JAMMER MSP-418K. Zhurnal oboronno-promyshlennogo kompleksa. 18.08.2009 (in Russ.). URL: <http://bastion-karpenko.ru/compact-jammer-msp-418k/>. Accessed November 10, 2021 (in Russ.).]

² ГОСТ 17232–99. Плиты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2000. 10 с. [GOST 17232–99. Aluminium and aluminium alloys plates. Specifications. Moscow: Izd. standartov; 2000. 10 p. (in Russ.).]

³ ГОСТ 4784–97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Изд-во стандартов, 2001. 12 с.; изм. [GOST 4784–97. Aluminium and wrought aluminium alloys. Grades. Moscow: Izd. standartov; 2001. 12 p. Edited (in Russ.).]

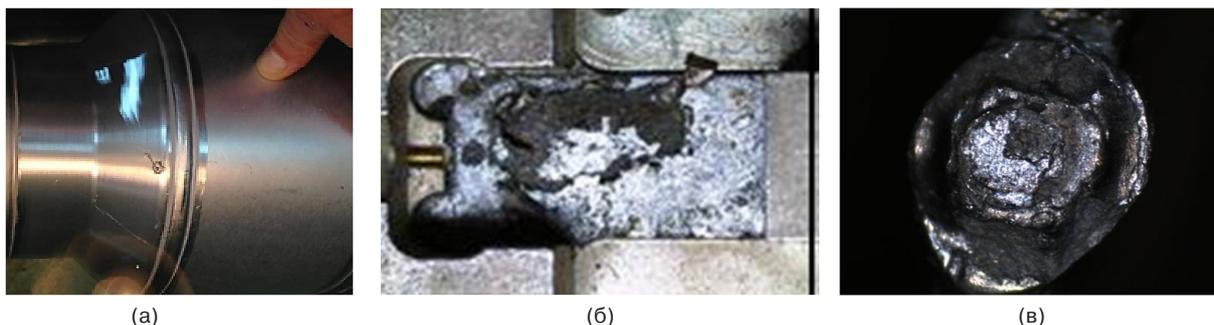


Рис. 4. Виды повреждений поверхности корпусов из-за «течи по материалу» корпуса (а); отслоения покрытия основного материала (б) и «течи по трещинам» (в)

Потеря герметичности корпусов микросборок, как показывает производственная практика [5], происходит из-за «течи по материалу» корпуса (рис. 4а), отслоения покрытия от основного материала (рис. 4б) или «течи по трещинам», образовавшимся в процессе химического никелирования корпуса и крышки микросборки перед пайкой (рис. 4в). Данной проблеме посвящен целый ряд работ, например, [6, 7], но в них не учитывается влияние структуры и свойств материала этих корпусов.

В статье [7] рассмотрен метод повышения качества готовых деталей блоков в изделии МСП-418К путем введения дополнительной технологической операции по оптимизации структуры исходного материала при изготовлении деталей РЭБ. Это позволяет исключить инвариантность наследственных факторов, полученных на предыдущих технологических операциях⁴.

С увеличением размера зерна повышается склонность металлического материала к разрушению из-за разделения фаз и термодиффузии веществ расплава, которая приводит к росту количества вытесняемых из объема дефектов и примесей. Пластическая деформация во время прокатки позволяет противостоять этому процессу [8]. Претерпевшие дополнительную деформацию заготовки обычно отличаются повышенными прочностными свойствами материала. В зависимости от предъявляемых к материалу заготовки требований назначается одна из рекомендованных ковочных схем и выбирается температура нагрева материала перед ковкой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На примере алюминиевых сплавов системы Al-Mg проведены эксперименты по применению комплексного технологического процесса изготовления деталей РЭБ. Технологический процесс

⁴ Ковка и штамповка деформируемых алюминиевых сплавов: Произв. инструкция ПИ 1.2.085–78. [Утв. ВИАМ]. 01.09.1978. 17 с. [Kovka i shtampovka deformiruemyykh alyuminievykh spлавov: Proizv. Instruktsiya (Forging and stamping of wrought aluminum alloys: Prod. Instruction) PI 1.2.085–78. [Approved VIAM]. 01.09.1978. 17 p. (in Russ.).]

включает в себя ковку исходных прутковых заготовок по различным схемам Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов ВИАМ (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) [9, 10] и температурным параметрам; стабилизирующий отжиг трех поковок при 320 °С в сравнении с тремя поковками, проведенными при температуре 420 °С, в течение 1 ч с последующим охлаждением каждой партии поковок на воздухе; обработку образцов на токарно-винторезном станке; динамометрические и металлографические исследования для измерения твердости и шероховатости обработанной поверхности образцов.

Изготовление детали в разных температурных режимах необходимо для увеличения прочностных свойств материала [11]. Количество дефектов и примесей в исходном материале растет с увеличением размера зерна. Дробление зерна в процессековки уменьшает содержание зернограничных примесей, делая материал детали более однородным и сбалансированным по свойствам.

Температура для стабилизированного отжига выбиралась в соответствии с рекомендациями ВИАМ. Рекомендованные температурыковки составляют 350–430 °С [12]. Однако на базе ранее проведенных исследований принято решение в эксперименте сделать ограничение температурыковки по верхнему и нижнему значениям: 420 °С и 320 °С, соответственно.

Исследования проводились на шести поковках (образцы № 1–6) с размерами $\varnothing 70 \times 140$ мм в сравнении с исходным материалом заготовки (прессованного прутка) размером $\varnothing 70 \times 120$ мм (образец № 0). Допустимая степень деформации при ковке на «молоте» кузнечно-прессового оборудования составляла 50% [11]. В электрической муфельной печи (SNOL) нагрев заготовки (образцов № 1–3) осуществлялся до температуры 420 °С, а образцов № 4–6 – до температуры 320 °С. Осадка составила до 60 мм.

После стабилизированного отжига образцы обрабатывались на токарно-винторезном станке 16К20 с использованием динамометра (рис. 5а). На рис. 5б показано, что при проточке по образующей

(диаметру) и по торцу экспериментальных образцов сила нагрузки на режущий инструмент (резец) распределена по трем координатам: P_x – сила подачи, P_y – радиальная сила и P_z – сила резания [7].

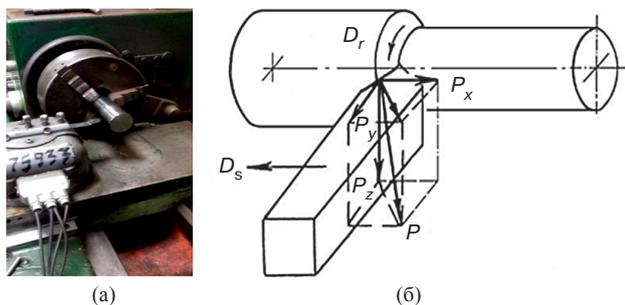


Рис. 5. Общий вид токарно-винторезного станка 16К20 с автоматизированным динамометром УДМ 600 (а); схематическое описание распределения силы нагрузки на резец во время обработки образцов на токарно-винторезном станке (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамометрический метод исследования показал, что распределение сил нагрузки на режущий инструмент (резец) во время обработки образцов по трем координатам соответствует классическому их соотношению: величина силы подачи P_x изменяется в пределах от $1/8$ до $1/4$, а радиальная сила P_y – от $1/4$ до $1/2$ величины силы резания P_z . Сравнительные испытания в процессе токарно-механической обработки экспериментальных образцов (рис. 6а) с исходной прутковой заготовкой (рис. 6б) позволили установить, что при обработке образцов с одинаковой ориентированной структурой в материале, полученной ковочными операциями, удастся обеспечить наименьшую шероховатость обработанной поверхности. Это объясняется тем, что достигается более эффективное динамическое гашение колебаний при резании путем большой диссипативной силы сопротивления материала

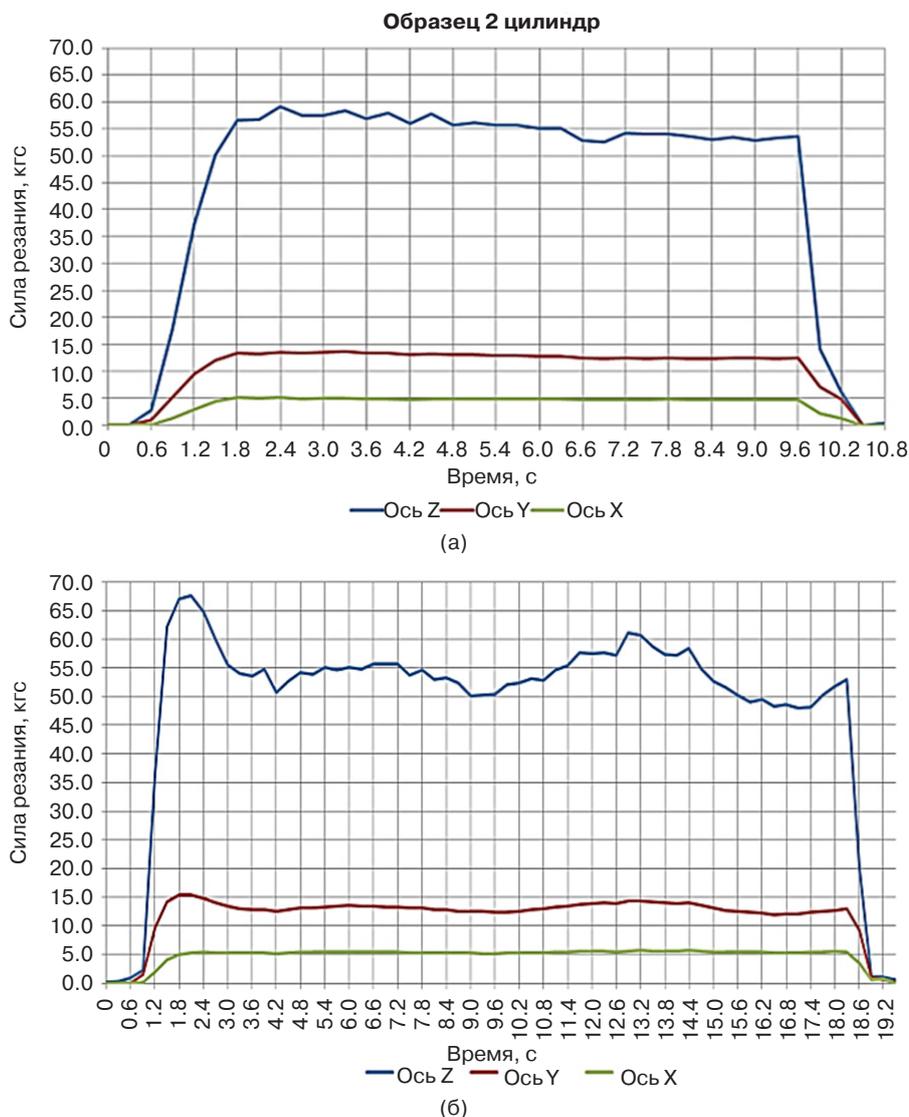


Рис. 6. График распределения шероховатости поверхности экспериментальных поковок (а) и исходной заготовки (б)

заготовки с ориентированной в разных направлениях текстурой деформационно-проработанного металла.

Сравнение микроструктуры и шероховатости (фактуры) поверхности исходной заготовки показало, что совпадение размера зерна и величины силы съема и подачи инструмента приводит к вырыву в материале исходной заготовки и налипанию материала на резец (рис. 7а). При этом вырыв обычно происходит у тройных стыков зерен, где имеются места скопления примесных фаз [13].

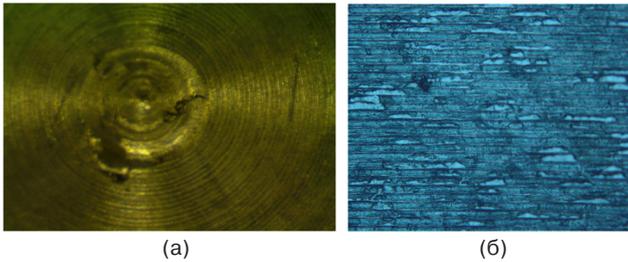


Рис. 7. Поверхность исходной заготовки с вырывом материала в процессе токарно-механической обработки и стружкой на ее поверхности (а); полученная послековки поверхность с прослойками включений (б)

В то же время увеличение плотности и твердости материала заготовок облегчает сход стружки и повышает качество их поверхности после проточки (рис. 7б). Вытянутые неметаллические включения, располагающиеся вдоль границ реза, слабо связаны с металлической матрицей или резко отличаются от нее по упругим характеристикам. Микроскопические несплошности металла вблизи границ неметаллических включений располагаются по-разному в отношении прикладываемого в процессе течения внешнего воздействия. Все данные несовершенства (прослойки включений) усиливают рассеивание энергии колебаний во время токарно-механической обработки экспериментальных образцов послековки.

Анализируя величину и характер нагрузок на резец при точении по образующей и по торцу

исходного прутка и экспериментальных поковок, а также шероховатость (фактуру) обработанной поверхности и твердость материала обработанных заготовок в различных точках, можно сделать некоторые выводы.

Во-первых, сила нагрузки на резец растет с увеличением поковки и уменьшением температуры деформации. При этом сила становится кинематической (равномерной) по сравнению с обработкой исходного материала заготовки.

Во-вторых, ковка по сложным схемам при пониженных температурах не только улучшает характеристики вакуумной плотности и коррозионной стойкости металлического материала, но и уменьшает шероховатость обработанной поверхности образцов. Напротив, чем меньше достигнутая деформационная проработка, тем крупнее зерно материала и цепочки интерметаллидных фаз, а также мягче материал образца и грубее его поверхность после механической обработки лезвийным инструментом на токарно-винторезном станке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен комплексный метод повышения качества изготовления деталей РЭБ на основе сплавов системы Al-Mg. Равномерная деформационная проработка позволяет получать сбалансированный комплекс технологических и специальных свойств. Хорошая обрабатываемость и качество поверхности заготовок резанием достигается повышенной твердостью материала заготовки одновременно с критически важными для ряда деталей стойкостью материала к развитию коррозионных процессов, его герметичностью и вакуумной плотностью.

Изготовление корпуса микросборки из полученной по схеме сложной ковки заготовки обеспечивает равномерное нанесение никелевого покрытия с минимальным уровнем сформированных в поверхностном слое материала заготовки растягивающих напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. *Силовое поражение радиоэлектронных систем*. М.: Вузовская книга; 2007. С. 10–16.
2. Хади О.Ш., Литвинов А.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния корпусов микросборок в процессе их изготовления и эксплуатации. В сб.: *Динамика и прочность*. Избранные труды Всеросс. научн. конф. по проблемам науки и технологий. М.: РАН; 2013. С. 3–26.
3. Головкин П.А., Фесенко С.А., Крюков А.В. Управление механизмами деформации как инструмент

REFERENCES

1. Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G., Shustov L.N. *Silovoe porazhenie radioelektronnykh sistem (Force defeat of radio-electronic systems)*. Moscow: Vuzovskaya kniga; 2007. P. 10–16 (in Russ.).
2. Khadi O.Sh., Litvinov A.N. Simulation of the stress-strain state of microassembly housings during their manufacture and operation. In: *Dynamics and strength*. Proceedings. Moscow: Ross. Akad. Nauk; 2013. P. 3–26 (in Russ.).
3. Golovkin P.A., Fesenko S.A., Kryukov A.V. Deformation mechanism control as a tool to improve the quality of titanium alloy forgings. In: *Progressive developments of*

- повышения качества поковок из титановых сплавов. В сб.: *Прогрессивные разработки ученых – новым изделиям ракетно-космической техники*. Сб. научн. трудов. 2013. С. 189–194.
4. Степанов В.Г., Клецов М.И. *Поверхностное упрочнение корпусных конструкций*. Л.: Судостроение; 1977. 197 с.
 5. Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С. *Технологическая наследственность в машиностроительном производстве*. М.: Изд-во МАИ; 2000. 360 с. ISBN 5-7035-2322-2
 6. Горенский Б.М., Лапина Л.А., Любанова А.Ш. и др. *Моделирование процессов и объектов в металлургии*. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2008. 145 с. ISBN 978-5-7638-1266-4
 7. Литвинов А.Н., Хади О.Ш. Оценка точности приближенного метода определения допустимого давления для корпусов микросборок. В сб.: *Актуальные проблемы современного машиностроения*. Сборник трудов Междунар. научно-практ. конф. 11–12 декабря 2014 г. Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2014. С. 191–194.
 8. Кишкина С.И., Фридляндер И.Н. (науч. ред.). *Авиационные материалы: справочник в 9 т. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы*. Часть 1. *Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия*, Кн. 1. М.: ВИАМ; 1982. 628 с.
 9. Амосов И.С., Скраган В.А. *Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке*; под общ. ред. М.А. Ансерова. Л.: Машгиз; 1958. 91 с.
 10. Телешов В.В., Чурюмов А.Ю. Анализ влияния характеристик двухфазной матричной структуры на вязкость разрушения деформируемых алюминиевых сплавов. *Технология легких сплавов*. 2012;2:22–40.
 11. Головкин П.А. Повышение качества корпусов микросборок электронных СВЧ-приборов с использованием ковочных операций. *Технология машиностроения*. 2020;9:5–7.
 12. Крюков А.В., Волков А.В., Головкин П.А., Галкин В.И. Повышение качества корпусов микросборок электронных СВЧ-приборов за счет оптимизации структурных изменений. *Вестник РАЕН*. 2019;19(3):36–41.
 13. Вербовой Ф.П., Калугин А.А. и др. Зависимость качества поковок из сплава AlMg₆ от исходной заготовки и величины деформации при ковке. *Алюминиевые сплавы и специальные материалы*. Сб. трудов. ВИАМ. 1975. Вып. 9.
- scientists – new products of rocket and space technology. Collection of scientific papers; 2013. P. 189–194 (in Russ.).
 4. Stepanov V.G., Klestov M.I. *Poverkhnostnoe uprochnenie korpusnykh konstruksii (Surface hardening of hull structures)*. Leningrad: Sudostroenie; 1977. 197 p. (in Russ.).
 5. Dal'skii A.M., Bazrov B.M., Vasil'ev A.S. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroitel'nom proizvodstve (Technological heredity in machine-building production)*. Moscow: MAI; 2000. 360 p. (in Russ.). ISBN 5-7035-2322-2
 6. Gorenskii B.M., Lapina L.A., Lyubanova A.Sh., et al. *Modelirovanie protsessov i ob'ektov v metallurgii (Modeling of processes and objects in metallurgy)*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2008. 145 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7638-1266-4
 7. Litvinov A.N., Khadi O.Sh. Estimation of the accuracy of an approximate method for determining the allowable pressure for microassembly bodies. In: *Actual problems of modern mechanical engineering*. Proceedings of the Intern. scientific and practical. conf. Tomsk: Tomsk. Politekh. Inst.; 2014. P. 191–194 (in Russ.).
 8. Kishkina S.I., Fridlyander I.N. (sci. eds.). *Aviatsionnye materialy: spravochnik v 9 t. T. 4. Alyuminievye i berillievye splavy. Chast' 1. Deformiruemye alyuminievye splavy i splavy na osnove berilliya (Aviation materials: a reference book in 9 v. V. 4. Aluminum and beryllium alloys. Part 1: Wrought aluminum alloys and beryllium-based alloys)*. Moscow: VIAM; 1982. 628 p. (in Russ.).
 9. Amosov I.S., Skragan V.A. *Tochnost', vibratsii i chistota poverkhnosti pri tokarnoi obrabotke (Accuracy, vibration and surface finish in turning)*. Anserov M.A. (Ed.). Leningrad: Mashgiz; 1958. 91 p. (in Russ.).
 10. Teleshov V.V., Churyumov A.Yu. Analysis of the influence of the characteristics of a two-phase matrix structure on the fracture toughness of wrought aluminum alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of Light Alloys*. 2012;2:22–40 (in Russ.).
 11. Golovkin P.A. Improving the microassemblies cases quality of the electronic microwave devices be using forging operations. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2020;9:5–7 (in Russ.).
 12. Kryukov A.V., Volkov A.V., Golovkin P.A., Galkin V.I. Improving the quality of microwave electron microwave instruments – detailed at optimization of structural changes. *Vestnik RAEN = Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2019;19(3):36–41 (in Russ.).
 13. Verbovoi F.P., Kalugin A.A., et al. Dependence of the quality of forgings from the AlMg₆ alloy on the initial billet and the magnitude of the deformation during forging. *Alyuminievye splavy i spetsial'nye materialy (Aluminum alloys and special materials)*. Sb. trudov. VIAM = Proceedings of VIAM. 1975. V. 9.

Об авторе

Крюков Антон Вячеславович, инженер-технолог, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» (107078, Россия, Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9). E-mail: minyuc@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9840-1408>

About the author

Anton V. Kryukov, Process Engineer, Academician A.I. Berg Central Research and Development Institute (20-9, Novaya Basmannaya ul., Moscow, 107078 Russia). E-mail: minyuc@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9840-1408>

УДК 621.374
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование надежностных характеристик кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах

М.И. Бойчук^{1, 2, @},
В.Е. Кривоногов²,
С.А. Микаева¹,
Л.А. Васильева^{1, 2}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Акционерное общество «ЛИТ-ФОНОН», Москва, 107076 Россия

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

Резюме

Цели. При разработке современных приборов радиоэлектроники и связи большое значение имеет выполнение требований, предъявляемых к ее надежности, стабильности генерируемых частот, избирательности приемной аппаратуры. Применение кварцевых резонаторов, широко используемых в радиосхемах сегодня, частично позволило повысить надежность средств связи и гарантировало высокую стабильность частоты без усложнения схемы. Современные мировые тренды разработки электротехнической аппаратуры связаны с ее миниатюризацией. Габариты кварцевых резонаторов с каждым годом уменьшаются, при этом требования к надежностным характеристикам остаются высокими. Цель работы – оценка возможности применения кварцевых резонаторов, представленных в миниатюрном керамическом корпусе размером $2.5 \times 2.0 \times 0.6$ мм, в условиях повышенной температуры окружающей среды, а также выработка оптимальных требований к режиму термотренировки, который является базовой технологической операцией для стабилизации частоты колебаний.

Методы. Испытание кварцевых резонаторов на безотказность и методы статистического моделирования в радиотехнике.

Результаты. Установлены требования к надежностным характеристикам кварцевых резонаторов РК588 в миниатюрных керамических корпусах размером $2.5 \times 2.0 \times 0.6$ мм при воздействии повышенной температуры окружающей среды $+85$ °С и $+125$ °С. Установлены требования по уходу частоты при воздействии повышенной температуры окружающей среды на тип кристаллической пластины, созданной на основе патента РФ № 27122426 «Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов». Оптимизирован способ термотренировки и установлены коэффициенты старения.

Выводы. Расчетный коэффициент старения резонаторов в процессе испытаний на безотказность для партии № 1 при температуре $+85$ °С составил 0.75, а для партии № 2 при температуре $+125$ °С составил 0.18. Для данного типа пьезоэлемента размером 1.5×1.0 мм при рабочей температуре $+125$ °С коэффициент старения ниже в 4 раза, чем при температуре $+85$ °С, что говорит о возможности применения резонатора РК588 в условиях повышенной температуры окружающей среды.

Ключевые слова: кварцевый резонатор, надежность, керамический корпус, частота колебаний, температура

• Поступила: 21.12.2021 • Доработана: 27.12.2021 • Принята к опубликованию: 24.02.2022

Для цитирования: Бойчук М.И., Кривоногов В.Е., Микаева С.А., Васильева Л.А. Исследование надежностных характеристик кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):43–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Study of the reliability of quartz resonators in miniature ceramic packages

Maksim I. Boychuk^{1, 2, @},
Vladislav E. Krivonogov²,
Svetlana A. Mikaeva¹,
Lyubov A. Vasilieva^{1, 2}

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² LIT-FONON, Moscow, 107076 Russia

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

Abstract

Objectives. In the development of radio electronics and communications, it is important that the requirements for the reliability, stability of the generated frequencies, and selectivity of the receiving equipment are fulfilled. The use of quartz resonators, widely used in radio circuits today, has partially allowed for the reliability of communication devices and guaranteed high frequency stability to be enhanced without complicating the circuit. Modern global trends in the development of electrical equipment are associated with miniaturization. The dimensions of quartz resonators are decreasing every year, while the requirements for reliability remain high. The study aimed to evaluate the possibility of using quartz resonators packaged in a miniature ceramic case $2.5 \times 2.0 \times 0.6$ mm, under conditions of elevated ambient temperature. It has also allowed for the development of optimal requirements for the thermal training regime as the basic technological operation for stabilizing the oscillation frequency.

Methods. Reliability testing of quartz resonators and methods of statistical modeling in radio engineering.

Results. The results established the requirements for the reliability of *RK588* quartz resonators in miniature ceramic cases $2.5 \times 2.0 \times 0.6$ mm in size under the influence of elevated ambient temperatures of $+85$ °C and $+125$ °C. The requirements for frequency drift when exposed to elevated ambient temperature on the crystalline plate type based on RF patent No. 27122426 “Method of manufacturing thin crystalline plates and thin crystalline elements” were also specified. The method of thermal training was optimized and the ageing coefficients were established.

Conclusions. The coefficients of ageing calculated for the resonators during the reliability tests was as follows: Batch No. 1 at a temperature of $+85$ °C was 0.75; and for Batch No. 2 at a temperature of $+125$ °C was 0.18. For this type of piezoelectric element with a size of 1.5×1.0 mm at an operating temperature of $+125$ °C the ageing coefficient is 4 times lower than at a temperature of $+85$ °C. This indicates the possibility of using the *RK588* resonator at elevated ambient temperatures.

Keywords: quartz resonator, reliability, ceramic case, oscillation frequency, temperature

• Submitted: 21.12.2021 • Revised: 27.12.2021 • Accepted: 24.02.2022

For citation: Boychuk M.I., Krivonogov V.E., Mikaeva S.A., Vasilieva L.A. Study of the reliability of quartz resonators in miniature ceramic packages. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):43–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50>

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

При разработке современных приборов радиоэлектроники и связи большое значение имеет выполнение высоких требований, предъявляемых к ее надежности, стабильности генерируемых частот, избирательности приемной аппаратуры. Проблема повышения надежности средств связи частично была решена за счет применения кварцевых резонаторов, которые широко используются в радиосхемах сегодня. Использование кварцевых резонаторов в электрогенераторах позволяет гарантировать высокую стабильность частоты без усложнения схемы. Электрофильтры с кварцевыми резонаторами обладают более высокими параметрами, чем аналогичные фильтры с катушками индуктивности и конденсаторами¹.

В настоящее время производство кварцевых резонаторов считается экономически прибыльным, несмотря на то что появились материалы, стабильность отдельных параметров которых выше, чем у кварца.

Один из способов повышения конкурентоспособности производства – снижение цены изделий, которое можно реализовать, изменив технологию их изготовления. Например, за счет изменения режима термотренировки возможно сократить время производства без снижения качества изделия. Однако не все технологические процессы можно изменить.

Термообработка – выдержка при высокой температуре на протяжении определенного времени – один из важных моментов при изготовлении кварцевого резонатора. Этот процесс идет на финальном этапе производства изделия [1]. Данная технологическая операция предназначена для создания искусственных условий старения кварцевого резонатора.

Процесс старения кварцевого резонатора – это комплекс разных физических процессов, которые с течением времени приводят к изменению резонансной частоты изделия. Поскольку большинство таких процессов стремится вернуться в состояние

термодинамического равновесия, то после их завершения резонатор переходит в стабильное состояние, а уходы частоты становятся незначительными, допустимыми для большинства приборов [2].

Процесс старения считается сложным и многоэтапным, поэтому режим термотренировки подбирается экспериментально, исходя из условий эксплуатации определенного типа кварцевого резонатора.

Чаще всего термотренировка занимает больше времени, чем само изготовление резонатора. Сложность и многообразие самих процессов старения кварцевого резонатора не позволяют оценить поведение каждого конкретного изделия и выполнить для него расчет наиболее подходящих режимов [3].

Цель работы заключается в оценке возможности применения кварцевых резонаторов, представленных в миниатюрном керамическом корпусе размером $2.5 \times 2.0 \times 0.6$ мм, в условиях повышенной температуры окружающей среды, а также выработка оптимальных требований к режиму термотренировки, который является базовой технологической операцией для стабилизации частоты колебаний.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РК588

Изменение частоты кварцевого резонатора во времени происходит при стабильных условиях работы вследствие необратимых изменений свойств кристаллов, крепежных элементов и связанных с ними устройств. При этом наблюдается несколько характерных особенностей:

- в большинстве случаев процесс старения описывается экспоненциальным законом уходов частоты резонаторов во времени. Плавный ход кривой старения нарушается, ее величина и характер зависят от типа резонатора;
- скорость старения увеличивается с повышением температуры;
- относительный уход частоты при старении и его характер зависят от свойств инертного газа в корпусе, где находится кварцевый резонатор [4].

В научно-производственном комплексе «Кварцевые генераторы и резонаторы» акционерного общества «ЛИТ-ФОНОН» есть оборудование, которое позволяет провести эксперимент при температурах $+85$ °C и $+125$ °C. Для эксперимента

¹ Бойчук М.И. *Цифровой термокомпенсированный кварцевый генератор в керамическом корпусе для поверхностного монтажа*: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИРЭА; 2019. 163 с. [Boychuk M.I. *Digital temperature-compensated crystal oscillator in a ceramic case for surface mounting*. Cand. Sci. Thesis. Moscow: MIREA; 2019. 163 p. (in Russ.).]

случайной выборкой были взяты 42 резонатора типа РК588 в керамическом корпусе с габаритными размерами $2.5 \times 2.0 \times 0.6$ мм и номинальной частотой 40 МГц (рис. 1), которые создавались на базе патента РФ № 27122426 «Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов». Размер кварцевого пьезоэлемента с напыленным серебросодержащим электродом составил 1.5×1.0 мм.

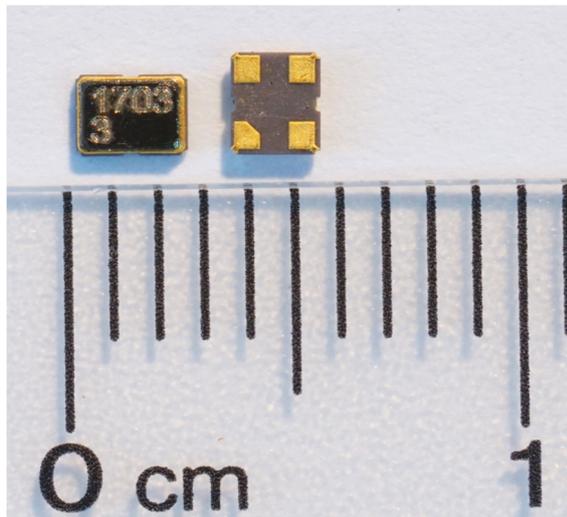


Рис. 1. Внешний вид кварцевого резонатора РК588

Из 42 резонаторов были сформированы 3 партии по 14 в каждой (далее – партия № 1, партия № 2, партия № 3). Партия № 1 состояла из резонаторов, которые подверглись термотренировке при температуре $+85$ °С в течение 1000 ч. Партия № 2 состояла из резонаторов, исследование которых велось при температуре $+125$ °С в течение 1000 ч. Партия № 3 тоже исследовалась при температуре $+125$ °С, но на протяжении 100 ч. Замер частоты резонаторов партий № 1 и № 2 проводился в таком порядке: 125, 250, 500 и 1000 ч; замер партии № 3 проводился ежедневно через каждые 24 ч. Перед началом эксперимента частоты всех резонаторов были замерены при помощи технологического оборудования «Динар» (рис. 2). После замера партии № 1 резонаторы были установлены в термокамеру при температуре $+85$ °С, для партий № 2 и № 3 был установлен температурный режим $+125$ °С. Через каждый установленный промежуток времени термокамера входила в режим медленного остывания. Это позволило избежать большого значения температуры в кристаллическом пьезоэлементе кварцевого резонатора, которое могло бы привести к высокой нагрузке кристалла, электрода и повлиять на его частоту [5].

Через 12 ч после того, как термокамера заканчивала процесс медленного остывания, резонаторы из активного режима достигали термодинамического

равновесия с окружающей средой при комнатной температуре. В таких условиях были проведены измерения частоты, описываемые ниже.



Рис. 2. Термостатирующая частотоизмеряющая установка «Динар»

Все испытания и замеры частот этого эксперимента производились на технологическом оборудовании – частотоизмеряющей установке «Динар». Установка позволяет провести замеры частот резонатора в интервале от 1 Гц до 100 МГц. Точность замера уменьшается с увеличением частоты резонатора. Для того чтобы избежать ошибки в расчетах отклонения частоты от нормы, необходимо определить погрешность замеров для каждого типа резонаторов.

Чаще всего замеры частоты проводятся в относительных единицах [6]:

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{DAC}}} = \frac{f - f_{\text{DAC}}}{f_{\text{DAC}}}, \quad (1)$$

где f_{DAC} – номинальная частота резонанса резонатора, Гц; f – фактическая частота резонатора, Гц.

Для резонаторов в герметизированном корпусе применима размерность относительной частоты, которая выражается в относительных единицах. Чтобы уменьшить вероятность случайной ошибки, замеры резонаторов проводились в одних и тех же колодках (гнездах) установки «Динар».

Было выбрано 14 резонаторов с частотой 40 МГц, которые прошли термотренировку в течение 1000 ч при температуре $+85$ °С. Если допустить, что процессы старения в этих резонаторах прекратились, то распределение частот резонаторов за малый интервал времени можно использовать для определения погрешности частотоизмеряющей установки «Динар».

Замеры проводились при температуре +25 °С, низкой влажности воздуха и нормальном давлении. Сначала определялась частота каждого резонатора данной партии. После этого резонаторы извлекались из установки «Динар» и в течение 4 ч оставались при неизменных условиях². Далее, при тех же условиях проводились повторные замеры частот. В итоге были получены относительные уходы частот, их распределение показано на рис. 3. При повторных замерах уходы частоты менялись, но их интервал не становился больше и находился в промежутке от $-0.5 \cdot 10^{-6}$ до $+0.4 \cdot 10^{-6}$. Из проведенного опыта можно сделать вывод, что погрешность измерения частоты установки «Динар» не превышает $\pm 0.5 \cdot 10^{-6}$, т.е. абсолютная ошибка замеров частоты резонаторов с номинальной частотой 40 МГц на установке «Динар» не более чем 11 Гц.³

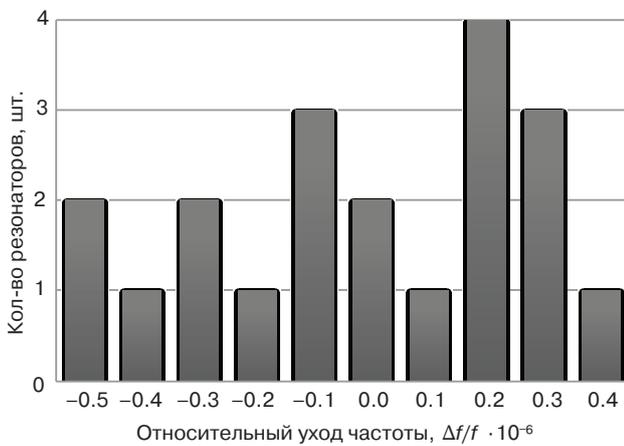


Рис. 3. Диаграмма распределения резонаторов по частотам

В соответствии с требованиями к надежности для резонаторов типа РК588 относительный уход частоты в процессе и после испытаний не должен превышать $\pm 15 \cdot 10^{-6}$. Графики ухода частоты партии № 1 кварцевых резонаторов после выполнения операции термотренировки представлены на рис. 4. Все резонаторы прошли тест на отбраковку, уходы частот при этом не превысили $\pm 15 \cdot 10^{-6}$, что говорит о высоком качестве изделий [7].

² Определение параметров кварцевых резонаторов. URL: http://www.cqham.ru/ua1oj_2.htm, дата обращения: 17.11.2021. [Determination of the parameters of quartz resonators. URL: http://www.cqham.ru/ua1oj_2.htm. Accessed November 17, 2021 (in Russ.).]

³ Обозначение кварцевого резонатора на схеме: принцип работы и конструкция. URL: <https://math-nttt.ru/teoriya/kvarcevyj-rezonator-dlya-chego-nuzhen.html>, дата обращения: 15.11.2021. [Designation of a quartz resonator in the diagram: principle of operation and design. URL: <https://math-nttt.ru/teoriya/kvarcevyj-rezonator-dlya-chego-nuzhen.html>. Accessed November 15, 2021 (in Russ.).]

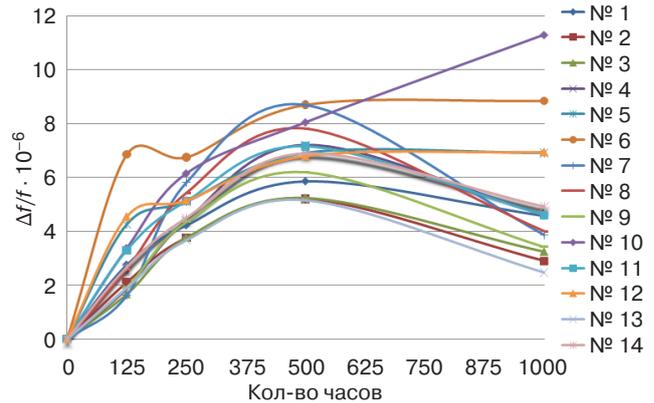


Рис. 4. График зависимости относительного ухода частоты от времени при температуре +85 °С каждого резонатора партии № 1 за 1000 ч

Из представленных графиков можно сделать вывод, что после замера «500 ч» у всех резонаторов уменьшился уход частоты, кроме резонатора № 10, у него уход частоты, наоборот, увеличился, но не превысил норму $\pm 15 \cdot 10^{-6}$. Уход частоты резонаторов №№ 5, 6 и 12 уменьшился, резонаторы стабилизировались [8].

На основе данных, представленных на рис. 4, был рассчитан коэффициент старения резонаторов k , для этого было найдено среднее значение суммы относительных уходов частоты резонаторов в двух ключевых точках:

$$s = \frac{\frac{\Delta f_1}{f_1} + \frac{\Delta f_2}{f_2} + \dots + \frac{\Delta f_n}{f_n}}{n}, \quad (2)$$

где n – количество изделий; $\frac{\Delta f_i}{f_i}$, $i = \overline{1, n}$ – уход частоты каждого отдельного резонатора [9].

Большинство исследователей и разработчиков кварцевых резонаторов, занимающихся прогнозом надежности, считают, что долговременное изменение частоты во времени носит экспоненциальный характер. На первом этапе изменение частоты носит криволинейный характер, на втором этапе наблюдается практически линейный участок с небольшим изменением частоты, которая стабилизируется и плавно опускается вниз. Обратим внимание на тот факт, что большинство изделий стабилизируется в течение 500 ч и выходит на свое верхнее значение частоты, после чего частота начинает плавно снижаться. Поэтому в качестве базовой для расчета коэффициента старения выбрана именно точка экстремума «500 ч». Далее для получения коэффициента старения результирующее среднее значение суммы относительных уходов частоты в конечной точке «1000 ч» делится на среднее значение суммы относительных уходов частоты в точке «500 ч»:

$$k_1 = \frac{5.18}{6.87} = 0.75.$$

Графики ухода частоты кварцевых резонаторов партии № 2 после выполнения операции термотренировки при температуре +125 °С представлены на рис. 5.

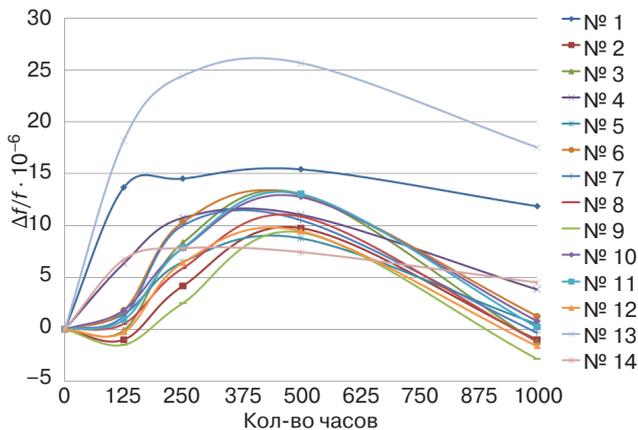


Рис. 5. График зависимости относительного ухода частоты от времени при температуре 125 °С каждого резонатора партии № 2 за 1000 ч

Из графиков на рис. 5 видно, что уходы частоты образцов №№ 2, 3, 5–12 в точке «125 ч» минимальны. Уходы частоты образцов №№ 4 и 14 в точке «125 ч» незначительно превышают $+5 \cdot 10^{-6}$, а уходы частоты образцов №№ 1 и 13 находятся рядом с предельным значением в $+15 \cdot 10^{-6}$. После замера в точке «500 ч» уход частоты у резонаторов постепенно уменьшается, но уходы частоты двух резонаторов №№ 1 и 13 выходят за пределы нормы $\pm 15 \cdot 10^{-6}$, установленной в данном испытании. Следовательно, эти изделия не пройдут испытание на безотказность при такой высокой температуре⁴. По данным, представленным на рис. 5, также был посчитан коэффициент старения:

$$k_2 = \frac{2.3}{12.14} = 0.18.$$

Для того чтобы точнее оценить возможность сокращения времени проведения термотренировки путем увеличения температуры, нужно определить уходы частоты кварцевых резонаторов при температуре +125 °С в течение 100 ч при более частых замерах параметров. На основе полученных ранее результатов планировалось получить уход частот

⁴ Генераторы с кварцевыми резонаторами. URL: <https://inventori-steam.ru/elektroteoriya/kvarcevyj-generator-princip-raboty.html>, дата обращения: 20.11.2021. [Generators with quartz resonators. URL: <https://inventori-steam.ru/elektroteoriya/kvarcevyj-generator-princip-raboty.html>. Accessed November 20, 2021 (in Russ.).]

кварцевых резонаторов таким же, как при температуре +85 °С в течение 250 ч.⁵

На рис. 6 показаны относительные уходы частоты резонаторов партии № 3 после термотренировки при температуре +125 °С с ежедневным замером частоты через каждые 24 ч в течение 100 ч.

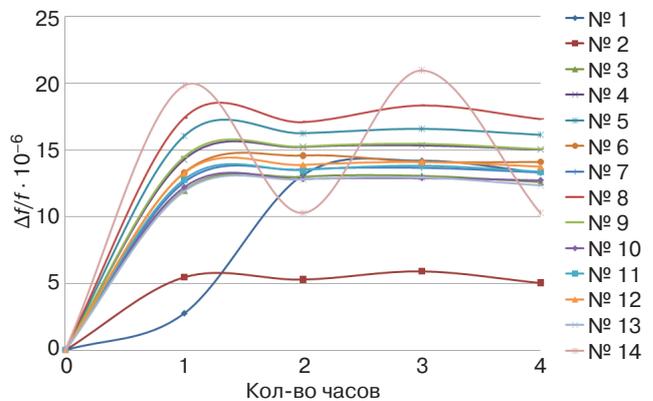


Рис. 6. График зависимости относительного ухода частоты от времени при температуре 125 °С каждого резонатора партии № 3 за 100 ч

Относительный уход частоты практически всех резонаторов партии № 3 за первые сутки значительно выше, чем за остальной период, далее уход частоты стабилизируется. Уход частоты резонаторов за №№ 5, 8 и 14 незначительно превышает норму $\pm 15 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, для стабилизации частоты кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах требуется минимум 24 ч при температуре +125 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были сформулированы требования к надежностным характеристикам кварцевых резонаторов РК588 в миниатюрных керамических корпусах размером $2.5 \times 2.0 \times 0.6$ мм при воздействии повышенной температуры окружающей среды +85 °С и +125 °С. Кроме того, разработаны требования по уходу частоты при воздействии повышенной температуры окружающей среды на данный тип кварцевого резонатора, созданного на основе патента РФ № 27122426 «Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов». Оптимизирован способ термотренировки и установлены коэффициенты старения.

⁵ Кварцевые резонаторы. Виды и применение. Устройство и работа. URL: <https://34rozetki.ru/svet/chto-takoe-kvarcevyj-rezonator.html>, дата обращения: 20.11.2021. [Quartz resonators. Types and application. Device and work. URL: <https://34rozetki.ru/svet/chto-takoe-kvarcevyj-rezonator.html>. Accessed November 20, 2021 (in Russ.).]

Обратим внимание на тот факт, что изделия партии № 1 и партии № 2 при воздействии высоких температур выходят на свое верхнее значение частоты в течение 500 ч, после чего частота резонаторов начинает плавно снижаться, поэтому в качестве базовой для расчета коэффициента старения выбрана именно точка экстремума [10].

Таким образом, расчетный коэффициент старения по результатам испытаний кварцевых резонаторов на безотказность для партии № 1 при температуре +85 °С составил $k_1 = 0.75$, а для партии № 2 при температуре +125 °С составил $k_2 = 0.18$. Отношение коэффициентов в ходе процессов старения составило:

$$d = \frac{k_1}{k_2} = \frac{0.75}{0.18} = 4.1. \quad (3)$$

Для данного типа пьезоэлемента размером 1.5×1.0 мм при рабочей температуре +125 °С коэффициент старения ниже в 4 раза, чем при температуре +85 °С, что говорит о возможности применения резонатора РК588 в условиях повышенной температуры окружающей среды.

Вклад авторов

М.И. Бойчук – организация экспериментальных испытаний на базе АО «ЛИТ-ФОНОН»; создание плана-графика и подбор методов проведения испытаний; подготовка необходимого оборудования и

оснастки; системный анализ результатов; подготовка технического отчета.

В.Е. Кривоногов – проведение начальных и промежуточных замеров кварцевых резонаторов во время и после проведения испытаний; контроль соблюдения сроков испытаний.

С.А. Микаева – анализ технического отчета и результатов испытаний; упорядочивание данных, приведенных в работе; оформление и редактирование текста статьи; консультации по подбору и анализу литературы.

Л.А. Васильева – отбор кварцевых резонаторов на испытания; статистический анализ результатов испытаний; внесение полученных данных по уходам частоты резонаторов при повышенной температуре среды в технический отчет.

Authors' contribution

M.I. Boychuk—organizing experimental tests based on the LIT-FONON equipment, forming a schedule for tests, selecting the test methods, preparing the necessary equipment and tools, system analysis of the obtained results, and preparation of a technical report.

V.E. Krivonogov—carrying out initial and intermediate measurements of quartz resonators during and after tests and monitoring compliance with test deadlines.

S.A. Mikaeva—analysis of the technical report and test results, systematization of the data obtained, writing and editing the text of the article, and consultations on the selection and analysis of the literature used.

L.A. Vasilieva—selection of quartz resonators for tests, statistical analysis of the test results, and entering the data obtained on the frequency drift of the resonators at elevated ambient temperatures in the technical report.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойчук М.И. Влияние креплений на температурно-частотную характеристику резонаторов. *Компоненты и технологии*. 2011;9:188–190.
2. Бойчук М.И., Микаева С.А. Сборка кварцевых генераторов. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2016;10:7–11.
3. Бойчук М.И., Микаева А.С., Микаева С.А. Температурно-частотные характеристики резонаторов. *Автоматизация. Современные технологии*. 2019;73(8):343–348.
4. Бойчук М.И., Микаева С.А. Проведение испытаний и контроль электронной компонентной техники. В сб.: *Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике*. Сб. докладов Российской научно-технической конференции с международным участием. М.: РТУ МИРЭА; 2019. Т. 2. С. 258–261.
5. Бойчук М.И., Власов К.В., Черпухина Г.Н. и др. *Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов*: Пат. РФ № 27122426. Заявка № 2019104435; заявл. 18.02.2019, опубл. 28.01.2020.
6. Хоменко И.В., Косых А.В. *Кварцевые резонаторы и генераторы*. Омск: Издательство ОмГТУ; 2018. 160 с.

REFERENCES

1. Boychuk M.I. Influence of fastenings on the temperature-frequency response of resonators. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*. 2011;9:188–190 (in Russ.).
2. Boychuk M.I., Mikaeva S.A. Build crystal oscillators. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making*. 2016;10:7–11 (in Russ.).
3. Boychuk M.I., Mikaeva A.S., Mikaeva S.A. Temperature-frequency characteristics of the resonators. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*. 2019;73(8):343–348 (in Russ.).
4. Boychuk M.I., Mikaeva S.A. Testing and control of electronic component technology. In: *Computer science and technology. Innovative technologies in industry and informatics*. Russian scientific and technical conference with international participation. Collection of conference reports. Moscow: RTU MIREA; 2019. V. 2. P. 258–261 (in Russ.).
5. Boychuk M.I., Vlasov K.V., Cherpukhina G.N., et al. *Method of making thin crystal plates and thin crystalline elements*: Pat. RF 27122426. Publ. 28.01.2020 (in Russ.).
6. Khomenko I.V., Kosykh A.V. *Kvartsevye rezonatory i generatory (Quartz resonators and generators)*. Omsk: OmGTU; 2018. 160 p. (in Russ.).

7. Бойчук М.И., Васильева Л.А., Микаева С.А. Методика расчета надежности кварцевых резонаторов. *Справочник. Инженерный журнал (с приложением)*. 2020;7(280):53–58. <https://doi.org/10.14489/hb.2020.07.pp.053-058>
8. Васильева Л.А., Бойчук М.И., Микаева С.А. Контроль спая пьезоэлектрических изделий. *Справочник. Инженерный журнал (с приложением)*. 2020;9(282):20–24. <https://doi.org/10.14489/hb.2020.09.pp.020-024>
9. Белов А.А., Степанов А.В. *Описание задачи спецпрактикума. Кварцевые резонаторы*. М.: МГУ; 2012. 18 с. URL: <http://www.osc.phys.msu.ru/mediawiki/upload/9/99/KRR.pdf>
10. Горевой А.В., Лирник А.В. Измерение шумовых параметров резонатора на квази-ПАВ. В сб.: *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. Материалы 25-й Международной Крымской конференции. В 2-х ч. Севастополь; 2015. Ч. 1. С. 900–901.
7. Boychuk M.I., Vasilyeva L.A., Mikaeva S.A. Method for calculating the reliability of quartz resonators. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal (s prilozheniem) = Handbook. An Engineering Journal with Appendix*. 2020;7(280):53–58 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/hb.2020.07.pp.053-058>
8. Vasilyeva L.A., Boychuk M.I., Mikaeva S.A. Control of piezoelectric products junction. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal (s prilozheniem) = Handbook. An Engineering Journal with Appendix*. 2020;9(282):20–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/hb.2020.09.pp.020-024>
9. Belov A.A., Stepanov A.V. *Opisanie zadachi spetspraktikuma. Kvaritsevye rezonatory (Description of the task of the special practice. Quartz resonators)*. Moscow: MGU; 2012. 18 p. (in Russ.). Available from URL: <http://www.osc.phys.msu.ru/mediawiki/upload/9/99/KRR.pdf>
10. Gorevoi A.V., Lirnik A.V. Measurement of noise parameters of a resonator on a quasi-SAW. In: *25th International Crimean Conference of Microwave Engineering and Telecommunication Technologies*. Conference materials. In 2th parts. Sevastopol. 2015. Part 1. P. 900–901 (in Russ.).

Об авторах

Бойчук Максим Иванович, к.т.н., преподаватель, кафедра электроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); начальник службы контроля качества продукции – главный контролер, руководитель испытательной лаборатории АО «ЛИТ-ФОНОН» (107076, Россия, Москва, ул. Краснобогатyrская, д. 44, стр. 1). E-mail: bojchuk@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8217-4546>

Кривонов Владислав Евгеньевич, инженер по качеству, АО «ЛИТ-ФОНОН» (107076, Россия, Москва, ул. Краснобогатyrская, д. 44, стр. 1). E-mail: kerri.41@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6990-3713>

Микаева Светлана Анатольевна, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mikaeva_s@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X>

Васильева Любовь Александровна, аспирант кафедры электроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); ведущий инженер по качеству АО «ЛИТ-ФОНОН» (107076, Россия, Москва, ул. Краснобогатyrская, д. 44, стр. 1). E-mail: vasiliewafonon@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-0092-7549>

About the authors

Maksim I. Boychuk, Cand. Sci. (Eng.), Teacher, Department of Electronics, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Head of Product Quality Control Service – Chief Controller, Head of Testing Laboratory, LIT-FONON JSC (1-44, Krasnobogatyrskaya ul., Moscow, 107076 Russia). E-mail: bojchuk@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8217-4546>

Vladislav E. Krivonogov, Quality Engineer, LIT-FONON JSC (1-44, Krasnobogatyrskaya ul., Moscow, 107076 Russia). E-mail: kerri.41@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6990-3713>

Svetlana A. Mikaeva, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Electronics, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mikaeva_s@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X>

Lyubov A. Vasilieva, Postgraduate Student, Department of Electronics, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Lead Quality Engineer, LIT-FONON JSC (1-44, Krasnobogatyrskaya ul., Moscow, 107076 Russia). E-mail: vasiliewafonon@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-0092-7549>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 004.81
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-51-58>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Семантика визуальных моделей в космических исследованиях

В.П. Савиных¹,
С.Г. Господинов²,
С.А. Кудж³,
В.Я. Цветков^{3, @},
И.П. Дешко³

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064 Россия

² Университет архитектуры, строительства и геодезии, София, 1164 Болгария

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: cvj2@mail.ru

Резюме

Цели. Цель работы – разработка методики для оценки семантики слабо структурированных или морфологически сложных визуальных информационных моделей. Для достижения цели вводится критерий отнесения визуальных моделей к сложным и алгоритм получения градиентного изображения с несколькими уровнями плотности. Градиентное изображение не является бинарным, что повышает надежность нахождения границ или контуров. Вводится вспомогательная структурная визуальная модель, и в обработке используется серия изображений разной плотности. Далее вводится понятие условной системы координат изображения, позволяющей переносить информацию с разных визуальных моделей на синтетическую результирующую визуальную модель.

Методы. Использование градиентной обработки изображений и построение новой промежуточной структурной модели, которая позволяет связывать модели с разной плотностью. Введение системы условных координат изображения. Обработка серии моделей с разной плотностью для получения синтетического изображения.

Результаты. Проведена обработка визуальных моделей, полученных с космических снимков со слабой различимостью объектов. Обработаны снимки в системе «Солнце – Земля – Луна». В качестве базиса выбрана система «Солнце – Земля». Для космических снимков характерно то, что яркий свет Солнца «забивает» изображения других объектов с большими фазовыми углами. Применение методики оконтуривания позволило выровнять изображения объектов слабой яркости и большой яркости. Смещение частотной характеристики после выявления всех объектов позволило сформировать четкую визуальную модель.

Выводы. На первичных визуальных моделях изображения слабой яркости не видны. При увеличении экспозиции они появляются, но объекты высокой плотности могут сливаться в один. Из-за этого по одному снимку высокой, средней или слабой плотности принципиально невозможно получить качественное изображение всех объектов или полную семантику визуальной модели. Для получения полной семантики визуальной модели необходима обработка серии изображений с переносом изображений на общее синтетическое изображение. Предложенная методика позволяет решать такие задачи. Сравнение полученных результатов с методами обработки одного изображения показывает надежность и большую информативность метода.

Ключевые слова: математическое моделирование, семантика, визуальная модель, образная модель, визуальная структурная модель, информационное поле, информационная семантика, когнитивная семантика, информационная модель, когнитивная модель

• Поступила: 23.12.2021 • Доработана: 10.01.2022 • Принята к опубликованию: 26.03.2022

Для цитирования: Савиных В.П., Господинов С.Г., Кудж С.А., Цветков В.Я., Дешко И.П. Семантика визуальных моделей в космических исследованиях. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):51–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-51-58>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Semantics of visual models in space research

Viktor P. Savinykh ¹,
Slaveiko G. Gospodinov ²,
Stanislav A. Kudzh ³,
Viktor Ya. Tsvetkov ^{3, @},
Igor P. Deshko ³

¹ *Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 105064 Russia*

² *University of Architecture, Construction and Geodesy, Sofia, 1164 Bulgaria*

³ *MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*

@ *Corresponding author, e-mail: cvj2@mail.ru*

Abstract

Objectives. The aim of the study is to develop a methodology for assessing the semantics of weakly structured or morphologically complex visual information models. In order to achieve the goal, a criterion for classifying visual models as complex and an algorithm for obtaining a gradient image with several levels of density were introduced. The gradient image is not binary, thus increasing the reliability of finding boundaries or contours. An auxiliary structural visual model was introduced, and a series of images of different densities was used in processing. Next, the concept of a conditional image coordinate system was introduced. This allows for information to be transferred from different visual models to a synthetic resulting visual model.

Methods. Using gradient image processing and constructing a new intermediate structural model allows models with different densities to be linked. A system of conditional image coordinates was introduced and a series of models with different densities to obtain a synthetic image was processed.

Results. The visual models obtained from satellite images with poor visibility of objects were processed in the Sun–Earth–Moon system. The Sun–Earth system was chosen as the basis. A characteristic of space images is the fact that the bright light of the Sun “clogs” the images of other objects with large phase angles. The use of the contouring technique allows for the visibility of images of low brightness and high brightness to be equalised. The shift of the frequency response after detection of all objects enabled the formation of a clear visual model.

Conclusions. In primary visual models, low brightness images were not visible. They appeared when exposure was increased, while high-density objects merged into one. Because of this, it is fundamentally impossible to obtain a high-quality image of all objects, or the complete semantics of a visual model from a single high, medium, or low-density image. In order to obtain the complete semantics of the visual model, a series of images need to be processed with the transfer of images to a common synthetic image. The proposed technique allowed for such problems to be resolved. A comparison of the results obtained using the methods of processing a single image proved the reliability and high information content of the method.

Keywords: mathematical modeling, semantics, visual model, figurative model, visual structural model, information field, information semantics, cognitive semantics, information model, cognitive model

• **Submitted:** 23.12.2021 • **Revised:** 10.01.2022 • **Accepted:** 26.03.2022

For citation: Savinykh V.P., Gospodinov S.G., Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya., Deshko I.P. Semantics of visual models in space research. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):51–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-51-58>

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

Широкое использование слабоструктурированных визуальных моделей обусловлено их применением во многих областях: лучевая диагностика, космические исследования, радиолокационные изображения, тепловые снимки, системы лазерного сканирования и т.д. Обработка таких изображений с целью получения семантики изображения является актуальной в настоящее время.

Каждая модель имеет форму представления или описания и содержательную часть. Можно говорить о морфологии или формальном представлении модели и ее семантике. Семантика любой модели означает ее смысловое содержание, включая описание ее структуры и пространственные отношения. Семантика визуальной модели связана с ее информативностью [1, 2]. Многие информационные и визуальные модели отдельно строят формализм модели и ее содержательную часть. На практике эти технологические этапы построения модели называют формализацией и сбором семантики. Обусловлено это тем, что формальная модель может иметь разный смысл и привязывать ее жестко к семантике нецелесообразно. Одна и та же формальная модель может иметь разные смыслы. Например, изображение прямоугольника на визуальной модели может обозначать дом, земельный участок, инженерное сооружение или вычислительный блок (на схеме алгоритма). Смысл визуальной модели или ее семантика определяется путем анализа информации, которая собирается дополнительно. Эта методика практикуется в геоинформатике, в которой отдельно собирают метрическую и атрибутивную информацию.

Среди визуальных моделей можно выделить два типа моделей по критерию познаваемости. Первый тип – это хорошо структурированные и распознаваемые визуальные модели с четкими контурами и известными объектами. Примером являются снимки городской территории, сканированные изображения чертежей или карт. Этот тип визуальных моделей можно охарактеризовать термином «объектные». Для такого типа визуальных моделей имеет место естественная декомпозиция. Для них легко

отдельно собрать семантику, а затем ее объединить с моделью. Второй тип – это визуальные модели с нечеткими контурами или их отсутствием, с изображениями объектов неизвестного класса. Этот тип визуальных моделей можно охарактеризовать термином «образные» или «морфологические». Сбор семантики отдельно для таких моделей затруднен. Такой тип моделей встречается в космических исследованиях, при обработке радиолокационных снимков, на рентгеновских снимках. Для этого типа визуальных моделей нет естественной декомпозиции. Поэтому проблема декомпозиции становится дополнительной задачей для этих моделей. Проблема семантики таких визуальных моделей тесно связана с извлечением неявных знаний [3] о такой модели. Общая проблема содержательности визуальных моделей относится к области искусственного интеллекта. Косвенно эта проблема связана с информационным полем [4, 5], с информационными отношениями и информационно-когнитивной семантикой. Можно ввести термин «информационное восприятие» и термин «когнитивное восприятие». Семантика визуальных моделей имеет когнитивную и информационную и составляющие. Поэтому оба этих фактора необходимо исследовать при анализе семантики визуальных моделей.

1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование осуществлялось методами градиентного, статистического, сравнительного и качественного анализа. В качестве материалов использованы публикации в области анализа и обработки слабоструктурированных изображений, а также космические снимки.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Формирование визуальной модели

В отличие от других информационных моделей, визуальные информационные модели должны иметь три характеристики: морфологию, топологию и пространственные отношения. В некоторых случаях

топология задает структуру. Топология и пространственная логика чаще всего присутствуют в визуальных моделях первого типа. В визуальных моделях второго типа имеются только морфологические признаки и пространственные отношения. По двум типам визуальных моделей можно построить схемы их формирования.

На рис. 1 приведена схема построения визуальной модели первого типа. Источником информации является пространственный образ (снимок пространственного образа), который содержит четкие границы и допускает естественную декомпозицию объектов, входящих в этот образ.

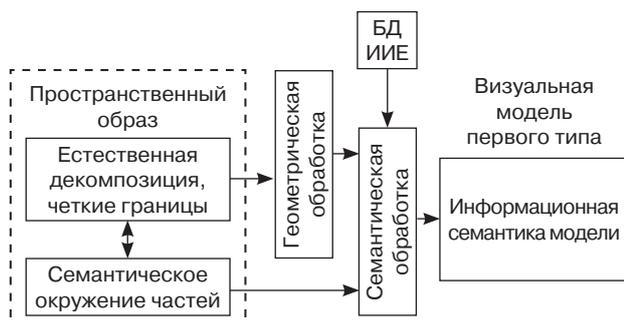


Рис. 1. Построение визуальной модели первого типа. БД ИИЕ – база данных информационных интерпретационных единиц

Естественная декомпозиция и четкие границы создают возможность выявления независимого семантического окружения и описания каждой части пространственного образа (карта, городская территория). Естественная декомпозиция и четкие границы создают возможность разделения визуальной модели на морфологическую и семантическую части. На рис. 1 это показано двусторонней стрелкой между семантическим окружением и морфологической частью. Для визуальных моделей первого типа морфологическая часть и семантика разделимы на

уровне компонент модели. Это разделение дает возможность независимой обработки морфологической части и последующей семантической обработки информации. Такая ситуация приводит к формированию семантики модели, которую можно назвать информационной.

Для формирования семантики модели используют специальную базу данных информационных интерпретационных единиц. Это может быть классификатор условных знаков или тезаурус. Визуальная модель передает смысл пространственного образа в компактной форме. На передачу такой же семантики с помощью естественного или искусственного языка необходимы большие информационные описания.

На рис. 2 приведена схема построения визуальной модели второго типа.

Согласно схеме на рис. 2 пространственный образ не содержит четких границ и четкой декомпозиции частей. Поэтому семантика частей такого образа, а также образа в целом, является неявной. Этот образ передается не в виде разделенных частей, а как информационная ситуация, содержащая объекты и неявные отношения. Поэтому первый этап обработки и извлечения смысла такого образа – это ассоциативная декомпозиция ситуации. Она опирается на базу данных ассоциаций, содержащуюся в когнитивной области эксперта [6] или интеллектуальной системы обработки [7]. Существует большое количество программных средств, которые помогают эксперту в анализе и интерпретации изображений. Такой программный продукт можно использовать для упрощения изображения и создания модели, объединяющей разные изображения одного объекта.

В результате обработки создается когнитивная и информационная семантика визуальной модели, поскольку когнитивный фактор влияет на ее создание на уровне ассоциативной декомпозиции. Для

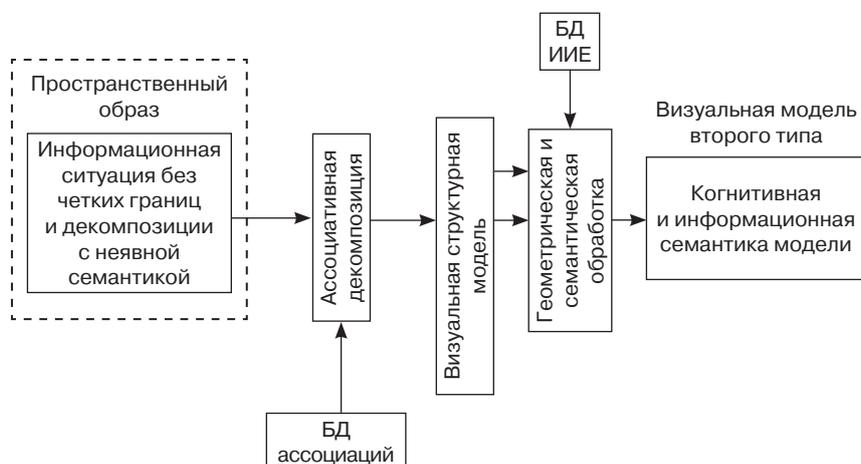


Рис. 2. Построение визуальной модели второго типа

визуальных моделей второго типа семантика является более информативной по сравнению с семантикой моделей первого типа.

2.2. Экспериментальные исследования

При обработке космических снимков целесообразно ввести понятие «первичные снимки». Это снимки, полученные камерами непосредственно в процессе наблюдения без какой-либо обработки.

На последующих рисунках приведены результаты экспериментальных работ. На рис. 3 приведена визуальная модель – первичный снимок, полученный при исходной съемке. На нем дано изображение трех пространственных объектов: Луны, Земли, Солнца. Поскольку прямой свет Солнца «забивает» яркость отраженного света других объектов, то изображения объектов едва видны.

Объекты на рис. 3 обладают следующими характеристиками. Расстояние до Луны – 10897 км; видимый диаметр Луны – $15^{\circ}48'33.8''$; фазовый угол – 166.6° . Расстояние до Земли – 406300 км; видимый диаметр – $1^{\circ}46'16.0''$; фазовый угол – 152.3° . Расстояние до Солнца – 0.99124 а.е.; видимый диаметр – $32'16.2''$. Напомним, что фазовым углом называют угол в системе «Солнце – объект – наблюдатель». Этот угол определяют как угол между падающим и отраженным от объекта светом, получаемым наблюдателем [8].

Снимок плохо опознаваем, поэтому для него сделали градиентную обработку или структурную визуальную модель, которая приведена на рис. 4.

Структурная визуальная модель играет роль карты. Ее можно схематизировать, векторизовать и сделать векторную кальку, чтобы накладывать на другие варианты снимков. Эта векторная калька или структурная векторизованная модель приведена на рис. 5.

На структурной векторизованной модели показаны три базовых объекта и условный объект, положение которого следует определить.

Между рис. 5 и рис. 4 имеется полное информационное геометрическое соответствие [9]. Модель на рис. 5 является типичной информационной пространственной моделью [10], позволяющей производить измерения, то есть подключать информационные факторы к визуальным.

На рис. 5 символ S обозначает Солнце, E – Землю, M – Луну, O – произвольное космическое тело. Визуальная структурная модель или геометрическая модель позволяет задавать условную координатную систему снимка относительно выбранных объектов. Для рис. 5 – это направление «Земля – Солнце». Вторая ось перпендикулярна к этому направлению. По измерениям расстояний на снимке от



Рис. 3. Исходный снимок Солнца, Земли и Луны



Рис. 4. Структурная визуальная модель, полученная на основе градиентной обработки исходного снимка

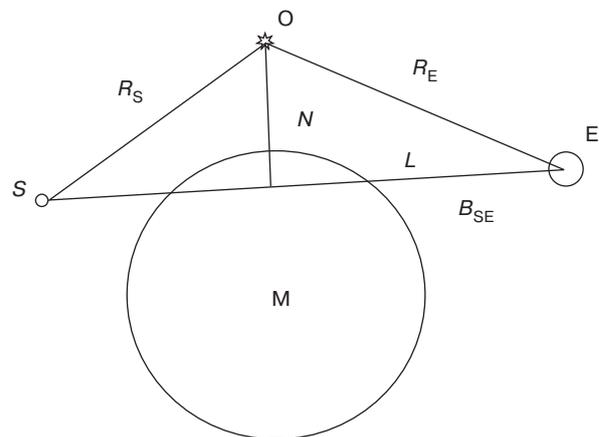


Рис. 5. Векторизованная или геометрическая модель для наложения на серию снимков

произвольного тела до выбранных объектов можно определить координаты объекта в условной системе координат по формулам:

$$N = 2 S_{\text{SOE}}/B_{\text{SE}}, \quad (1)$$

$$L = (R_E^2 - N^2)^{1/2}.$$

Все параметры показаны на рис. 5. В выражении (1) S_{SOE} – площадь треугольника SOE, вычисленная через длины его сторон. Следует подчеркнуть, что величины N и L – это условные координаты снимка, которые больше отражают пространственные отношения, а не реальные пространственные координаты. Изменение характеристической кривой возможно при компьютерной обработке. Поднятие слабых светлых тонов и общее выравнивание тонов дает изображение, показанное на рис. 6.



Рис. 6. Снимок, полученный при обработке первичного снимка

Изображение объектов на рис. 6 дано в псевдоцветах. На рис. 6 хорошо видны звезды, которые не видны на первом снимке. У Солнца хорошо просматривается гало, как совокупность концентрических окружностей разной яркости. По данным рис. 5 можно оценить расположение опознаваемых объектов на рис. 6, который является не исходным, а производным от снимка, показанного на рис. 3.

Использование и получение визуальной структурной модели (ВСМ) дает возможность обрабатывать серии снимков разных плотностей и разной детальности. ВСМ позволяет объединить в общую визуальную модель объекты разной плотности и видимости.

Данный подход основан на переходе от визуальной модели к геометрической информационной модели и последующим подключением геометрической обработки изображений [11]. Он уже применяется в обработке аэрокосмических изображений [12], но с применением регрессионных методов и прямых измерений снимков. Первичные снимки (например, рис. 3) не обладают высокими измерительными свойствами. Предлагаемый метод исключает измерение первичного снимка и использует четкую геометрическую модель (рис. 5). Эта модель позволяет не только выполнять измерения, но повышать качество первичного снимка, делая его более наглядным (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Семантика визуальных моделей содержит не только атрибутивные характеристики, но и характеристики их видимости и пространственных отношений. При анализе сложных визуальных моделей, отображающих сложные или непонятные образы, целесообразно использовать промежуточную визуальную структурную модель. Эта модель может создаваться либо только на основе градиентных характеристик (рис. 4), либо с последующей векторизацией и дополнением «невидимых» на снимке объектов (рис. 5). Введение нового понятия «визуальная структурная модель» создает условия для серийной обработки снимков с разными частотными характеристиками. ВСМ позволяет совмещать снимки из разных спектральных диапазонов. Для сложных визуальных образов допустимо понятие информационной визуальной ситуации.

Информационная визуальная ситуация объединяет объекты и отношения между ними. Для сложных образов типа рентгеновского или радиолокационного изображения такая модель является первичным понятием. Проведенные исследования дают основание ввести понятие ВСМ. Такую модель целесообразно создавать по снимкам с максимальной детальностью. В тоже время ее можно дополнять по другим снимкам. На модели ВСМ могут изображаться объекты, невидимые человеческому глазу на исходном изображении. Проведенные исследования дают основание ввести понятие «семантика сложных визуальных образов». Сложные визуальные образы сложно описать языком, поэтому их можно рассматривать как закодированное сообщение. Визуальные образы информативны, поэтому требуют меньшей памяти. Данная методика позволяет обрабатывать разные снимки в комплексе и делать видимыми объекты, плохо опознаваемые на первичных снимках. Предложенная методика дает возможность обрабатывать визуальные образы, получаемые другими сенсорами, например, тепловыми или акустическими.

Вклад авторов

В.П. Савиных – получение и обработка космических снимков, качественный и сравнительный анализ изображений.

С.Г. Господинов – анализ алгоритмов обработки космических изображений, составление алгоритма для данной методики.

С.А. Кудж – разработка методики обработки изображений.

В.Я. Цветков – разработка методики наложения изображений, обоснование выбора координатной системы изображения.

И.П. Дешко – реализация алгоритма, отладка программного обеспечения, компьютерная обработка.

Authors' contribution

V.P. Savinykh—obtaining and processing satellite images, qualitative and comparative analysis of images.

S.G. Gospodinov—analysis of algorithms for processing space images and compilation of an algorithm for chosen technique.

S.A. Kudzh—development of the image processing technique.

V.Ya. Tsvetkov—development of the image overlay technique and justification of the choice for the image coordinate system.

I.P. Deshko—algorithm implementation, software debugging, and computer processing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Номоконов И.Б. Информативность рентгеновского изображения. *Славянский форум*. 2015;2(8):233–239.
2. Nomokonov I.B. The semantic informativeness. *European Journal of Medicine. Series B*. 2015;3(4):141–147.
3. Bolbakov R.G. Tacit knowledge as a cognitive phenomenon. *European Journal of Technology and Design*. 2016;1(11):4–12.
4. Цветков В.Я. Информационное поле и информационное пространство. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016;1–3:455–456. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=8536>
5. Господинов С.Г. Семантическое дерево в информационном поле. *Славянский форум*. 2018;3(21):73–79.
6. Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya. Cognitive expert assessment. In: Silhavy R. (Ed.). *Artificial Intelligence in Intelligent Systems. proceedings of Computer Science On-line Conference. Ser. "Lecture Notes in Networks and Systems."* 2021. V. 229. P. 742–749. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77445-5_66
7. Zafar B., et al. Intelligent image classification-based on spatial weighted histograms of concentric circles. *Comput. Sci. Inf. Syst.* 2018;15(3):615–633. <https://doi.org/10.2298/CSIS180105025Z>
8. Савиных В.П. Определение линейных параметров планеты по измерению углового диаметра. *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2021;7(1):28–34.
9. Ожерельева Т.А. Информационное соответствие и информационный морфизм в информационном поле. *ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении*. 2017;4(4):86–92
10. Lototsky V.L. Spatial information modeling. *European Journal of Computer Science*. 2016;1(2):38–46.
11. Егосшкин Н.А. Динамические модели геометрической обработки изображений в системах дистанционного зондирования Земли. *Цифровая обработка сигналов*. 2017;1:8–12.
12. Злобин В., Еремеев В. *Обработка аэрокосмических изображений*. ЛитРес; 2018. 287 с.

REFERENCES

1. Nomokonov I.B. Descriptiveness X-ray image. *Slavyanskii forum = Slavic Forum*. 2015;2(8):233–239 (in Russ.).
2. Nomokonov I.B. The semantic informativeness. *European Journal of Medicine. Series B*. 2015;3(4):141–147.
3. Bolbakov R.G. Tacit knowledge as a cognitive phenomenon. *European Journal of Technology and Design*. 2016;1(11):4–12.
4. Tsvetkov V.Ya. Information field and information space. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016;1–3:455–456 (in Russ.). Available from URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=8536>
5. Gospodinov S.G. Semantic tree in the information field. *Slavyanskii forum = Slavic Forum*. 2018;3(21):73–79 (in Russ.).
6. Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya. Cognitive expert assessment. In: Silhavy R. (Ed.). *Artificial Intelligence in Intelligent Systems. proceedings of Computer Science On-line Conference. Ser. "Lecture Notes in Networks and Systems."* 2021. V. 229. P. 742–749. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77445-5_66
7. Zafar B., et al. Intelligent image classification-based on spatial weighted histograms of concentric circles. *Comput. Sci. Inf. Syst.* 2018;15(3):615–633. <https://doi.org/10.2298/CSIS180105025Z>
8. Savinykh V.P. Determination of the linear parameters of the planet by measuring the angular diameter. *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2021;7(1):28–34 (in Russ.).
9. Ozherel'eva T.A. Information conformity and informational morphism in the information field. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*. 2017;4(4):86–92 (in Russ.).
10. Lototsky V.L. Spatial information modeling. *European Journal of Computer Science*. 2016;1(2):38–46.
11. Egoshkin N.A. Dynamic models of geometric image processing in Earth remote sensing systems. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 2017;1:8–12 (in Russ.).
12. Zlobin V., Eremeev V. *Obrabotka aerokosmicheskikh izobrazhenii (Aerospace image processing)*. LitRes; 2018. 287 p. (in Russ.).

Об авторах

Савиных Виктор Петрович, академик РАН, д.т.н., профессор, Президент Московского государственного университета геодезии и картографии (105064, Россия, Москва, Гороховский пер., д. 4). Летчик-космонавт, Дважды Герой Советского союза, Лауреат государственной премии, Лауреат премии Президента РФ, Лауреат премии Правительства РФ. E-mail: president@miigaik.ru. Scopus Author ID 56412838700. <https://orcid.org/0000-0002-9303-5952>

Господинов Славейко Господинов, доктор наук, профессор, проректор по НИР Университета архитектуры, строительства и геодезии (1046, Болгария, София, ж.к. Лозенец, бул. Христо Ботева, д. 1). Академик международной академии наук Евразии, Академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. E-mail: sgospodinov@mail.bg. <https://orcid.org/0000-0002-6127-4342>

Кудж Станислав Алексеевич, д.т.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: rector@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019. <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Цветков Виктор Яковлевич, д.т.н., д.э.н., профессор, профессор кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Лауреат Премии Президента РФ, Лауреат Премии правительства РФ, Академик Российской академии информатизации образования (РАО). Академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ). E-mail: cvj2@mail.ru. Scopus Author ID 56412459400, ResearcherID J-5446-2013. <http://orcid.org/0000-0003-1359-9799>

Дешко Игорь Петрович, к.т.н., доцент кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dip@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0002-8311-4067>

About the authors

Viktor P. Savinykh, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President, Moscow State University of Geodesy and Cartography (4, Gorokhovskiy per., Moscow, 105064 Russia). Pilot-Cosmonaut, Twice Hero of the Soviet Union, State Prize Laureate, RF President Prize Laureate, Laureate of the RF Government Prize. E-mail: president@miigaik.ru. Scopus Author ID 56412838700. <https://orcid.org/0000-0002-9303-5952>

Slaveiko G. Gospodinov, Dr. Sci. (Habil.), Professor, Vice-Rector for Research, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy (1, Hristo Botev Blvd., Lozenets residential complex, Sofia, 1046 Bulgaria). Academician at the International Academy of Sciences of Eurasia, Academician at the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics. E-mail: sgospodinov@mail.bg. <https://orcid.org/0000-0002-6127-4342>

Stanislav A. Kudzh, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: rector@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019. <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Viktor Ya. Tsvetkov, Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Laureate of the Prize of the President of the Russian Federation, Laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation, Academician at the Russian Academy of Education Informatization (RAO), Academician at the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics. (RACC). E-mail: cvj2@mail.ru. Scopus Author ID 56412459400, ResearcherID J-5446-2013. <http://orcid.org/0000-0003-1359-9799>

Igor P. Deshko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dip@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0002-8311-4067>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 004.89
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-59-74>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Применение биоинспирированных алгоритмов глобальной оптимизации для повышения точности прогнозов компактных машин экстремального обучения

Л.А. Демидова[@],
А.В. Горчаков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: demidova.liliya@gmail.com

Резюме

Цели. В результате современных исследований в машинном обучении, направленных на повышение точности и снижение вычислительной сложности алгоритмов анализа данных, была предложена новая архитектура искусственной нейронной сети – машина экстремального обучения. Это нейронная сеть прямого пространства с единственным скрытым слоем. В этой сети веса соединений между входными нейронами и нейронами скрытого слоя инициализируются случайно, а веса соединений между нейронами скрытого слоя и выходными нейронами вычисляются с использованием операции псевдообращения Мура – Пенроуза. Замена итерационного процесса обучения, присущего многим архитектурам нейронных сетей, на случайную инициализацию одной части весов и вычисление другой части делает рассматриваемый инструмент существенно более производительным, с сохранением хорошей обобщающей способности. Однако случайная инициализация входных весов не гарантирует оптимальной точности прогнозов. Цель работы – разработка и исследование подходов к интеллектуальной настройке входных весов в машинах экстремального обучения биоинспирированными алгоритмами для повышения точности прогнозов этого инструмента анализа данных в задачах восстановления регрессии.

Методы. Используются методы теории оптимизации, теории эволюционных вычислений и роевого интеллекта, теории вероятностей и математической статистики, системного анализа.

Результаты. Разработаны и исследованы подходы к интеллектуальной настройке входных весов в машинах экстремального обучения, основанные на применении генетического алгоритма, алгоритма роя частиц, алгоритма поиска косяком рыб, алгоритма хаотического поиска косяком рыб с экспоненциальным убыванием шага, предложенного авторами настоящего исследования. Выявлено, что применение биоинспирированных алгоритмов способно улучшить точность прогнозов машин экстремального обучения в задачах восстановления регрессии, причем машине экстремального обучения с уточненными биоинспирированными алгоритмами весами требуется меньшее число нейронов на скрытом слое для достижения высокой точности прогнозов на тренировочных и тестовых наборах данных. С помощью хаотического алгоритма поиска косяком рыб с экспоненциальным убыванием шага могут быть получены наилучшие конфигурации машин экстремального обучения в рассмотренных задачах.

Выводы. Полученные результаты показывают, что точность прогнозов машин экстремального обучения может быть улучшена посредством применения биоинспирированных алгоритмов интеллектуальной настройки входных весов. Для выполнения настройки весов требуются дополнительные вычисления, поэтому

использование машин экстремального обучения в сочетании с биоинспирированными алгоритмами может быть целесообразно в тех областях, где необходимо получение наиболее точной и компактной конфигурации машины экстремального обучения.

Ключевые слова: нейронные сети, машины экстремального обучения, биоинспирированные алгоритмы, генетический алгоритм, алгоритм роя частиц, алгоритм поиска косяком рыб, машинное обучение, регрессионный анализ

• Поступила: 29.11.2021 • Доработана: 22.12.2021 • Принята к опубликованию: 01.03.2022

Для цитирования: Демидова Л.А., Горчаков А.В. Применение биоинспирированных алгоритмов глобальной оптимизации для повышения точности прогнозов компактных машин экстремального обучения. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):59–74. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-59-74>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Application of bioinspired global optimization algorithms to the improvement of the prediction accuracy of compact extreme learning machines

Liliya A. Demidova[@],
Artyom V. Gorchakov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: demidova.liliya@gmail.com

Abstract

Objectives. Recent research in machine learning and artificial intelligence aimed at improving prediction accuracy and reducing computational complexity resulted in a novel neural network architecture referred to as an extreme learning machine (ELM). An ELM comprises a single-hidden-layer feedforward neural network in which the weights of connections among input-layer neurons and hidden-layer neurons are initialized randomly, while the weights of connections among hidden-layer neurons and output-layer neurons are computed using a generalized Moore–Penrose pseudoinverse operation. The replacement of the iterative learning process currently used in many neural network architectures with the random initialization of input weights and the explicit computation of output weights significantly increases the performance of this novel machine learning algorithm while preserving good generalization performance. However, since the random initialization of input weights does not necessarily guarantee optimal prediction accuracy, the purpose of the present work was to develop and study approaches to intelligent adjustment of input weights in ELMs using bioinspired algorithms in order to improve the prediction accuracy of this data analysis tool in regression problems.

Methods. Methods of optimization theory, theory of evolutionary computation and swarm intelligence, probability theory, mathematical statistics and systems analysis were used.

Results. Approaches to the intelligent adjustment of input weights in ELMs were developed and studied. These approaches are based on the genetic algorithm, the particle swarm algorithm, the fish school search algorithm, as well as the chaotic fish school search algorithm with exponential step decay proposed by the authors.

By adjusting input weights with bioinspired optimization algorithms, it was shown that the prediction accuracy of ELMs in regression problems can be improved to reduce the number of hidden-layer neurons to reach a high prediction accuracy on learning and test datasets. In the considered problems, the best ELM configurations can be obtained using the chaotic fish school search algorithm with exponential step decay.

Conclusions. The obtained results showed that the prediction accuracy of ELMs can be improved by using bioinspired algorithms for the intelligent adjustment of input weights. Additional calculations are required to adjust the weights; therefore, the use of ELMs in combination with bioinspired algorithms may be advisable where it is necessary to obtain the most accurate and most compact ELM configuration.

Keywords: neural networks, extreme learning machine, bioinspired algorithms, genetic algorithm, particle swarm optimization algorithm, fish school search algorithm, machine learning, regression analysis

• Submitted: 29.11.2021 • Revised: 22.12.2021 • Accepted: 01.03.2022

For citation: Demidova L.A., Gorchakov A.V. Application of bioinspired global optimization algorithms to the improvement of the prediction accuracy of compact extreme learning machines. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):59–74. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-59-74>

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

Процесс цифровизации экономики приводит к тому, что все большее число предприятий интегрирует интеллектуальные модули в собственные продукты и корпоративные информационные системы с целью автоматизации и ускорения бизнес-процессов. Данные модули часто представляют собой системы поддержки принятия решений, экспертные и прогностические системы, использующие в процессе функционирования алгоритмы машинного обучения. Такие алгоритмы позволяют автоматизировать выявление скрытых зависимостей в наборах данных с целью выполнения предсказаний без участия человека. Современные требования к производительности алгоритмов машинного обучения повышаются с увеличением объемов данных, обрабатываемых интеллектуальными системами. При этом точность решений, принимаемых в автоматическом режиме, должна быть максимально высокой.

В ходе исследований в области классификации, регрессионного анализа и прогнозирования временных рядов были предложены такие эффективные инструменты машинного обучения, как метод k ближайших соседей [1], метод опорных векторов [2], их гибридные версии [3], ансамбли случайных лесов [4], искусственные нейронные сети [5], позволяющие достигать высокой точности принимаемых решений.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) является широко используемым и эффективным инструментом машинного обучения с учителем, позволяющим автоматизировать принятие решений с помощью эволюции сложной нелинейной системы [6]. Разработано множество архитектур и способов обучения ИНС, показавших высокую эффективность в

решении задач классификации при использовании глубокого обучения, сверточных слоев и слоев проецирования [7], задач регрессии при использовании гибридов популяционных и градиентных алгоритмов обучения ИНС [8, 9]. С целью поиска оптимальных гиперпараметров ИНС часто применяют алгоритмы, вдохновленные живой природой. Так, в работе [10] алгоритм роя частиц был применен для оптимизации гиперпараметров рекуррентной сети с долгой краткосрочной памятью для прогнозирования временных рядов.

Задача обучения ИНС сводится к задаче минимизации некоторой функции оценки потерь ИНС на тренировочном наборе данных. Традиционно исследователи и практики применяют итерационный метод обратного распространения ошибки и алгоритмы, основанные на стохастическом градиентном спуске, для обучения ИНС [11, 12]. Однако с ростом объемов анализируемых данных растет время, необходимое для сходимости градиентных методов, особенно в случае использования глубоких архитектур ИНС. С целью ускорения процесса обучения ИНС исследователями из корпорации Google был предложен распределенный алгоритм стохастического градиентного спуска [13], предполагающий размещение подмножеств из обучающего набора данных на нескольких ведомых узлах вычислительной сети. При этом на каждой итерации ведомые вычислительные узлы вычисляют многомерные матрицы градиентов для собственного подмножества данных. Ведущий узел получает вычисленные многомерные матрицы градиентов от ведомых узлов, вычитает градиенты из матрицы весов ИНС, а затем рассылает обновленную многомерную матрицу весов ведомым узлам, после чего процесс повторяется до выполнения критерия останова. Однако даже в случае применения распределенных

методов обучения ИНС процесс обучения может занимать продолжительное время – от нескольких часов до нескольких суток.

С целью ускорения процесса обучения ИНС Гуан-Бин и соавторы предложили новую архитектуру ИНС [14], названную машиной экстремального обучения (англ. extreme learning machine, ELM). ELM – это ИНС с единственным скрытым слоем, в которой веса соединений между входными нейронами и нейронами скрытого слоя, а также вектор сдвигов скрытого слоя инициализируются случайно, а веса соединений между нейронами скрытого слоя и выходными нейронами вычисляются с использованием операции псевдообращения Мура – Пенроуза [15]. При этом функция активации скрытого слоя должна быть бесконечно дифференцируема [14]. ELM позволяет исключить итерационный процесс оптимизации функции оценки потерь ИНС из процесса подготовки модели ИНС, способной принимать точные решения, существенно снижая вычислительные затраты на обучение ИНС. Несмотря на отсутствие итерационного процесса обучения, ELM показывают хорошую обобщающую способность в ряде прикладных задач [16–18].

Однако случайная инициализация весов соединений между входными и скрытыми нейронами и вектора сдвигов скрытого слоя не гарантирует получения ELM с наилучшей конфигурацией из всех возможных. Известно о применении алгоритмов оптимизации, вдохновленных живой природой, в задачах интеллектуального уточнения входных весов и вектора сдвигов скрытого слоя ELM [16, 19]. Такие алгоритмы оптимизации, также называемые биоинспирированными, являются эвристическими методами глобальной оптимизации, не использующими информацию о производной оптимизируемой функции и обрабатывающими несколько решений на каждой итерации, что упрощает запуск данных алгоритмов в параллельном и распределенном режимах [20]. Широко применяемыми на практике биоинспирированными алгоритмами являются генетический алгоритм (англ. Genetic Algorithm, GA) [21], алгоритм роя частиц (англ. Particle Swarm Optimization, PSO) [22], алгоритм поиска косяком рыб (англ. Fish School Search, FSS) [23, 24] и др. В работе [16] описано применение алгоритма роя частиц для получения оптимальной конфигурации ELM для прогнозирования транспортных потоков. В работе [19] приведен сравнительный анализ классической реализации ELM и ELM, в которой проведен интеллектуальный выбор входных весов с помощью генетического алгоритма. Показана высокая эффективность конфигурации ELM, полученной с помощью GA.

В данной работе приведено исследование эффективности различных биоинспирированных алгоритмов, включая генетический алгоритм, алгоритм роя частиц, алгоритм поиска косяком рыб, алгоритм хаотического поиска косяком рыб с экспоненциальным убыванием шага, применяемых в задаче выбора оптимальных значений весов соединений между входными нейронами и нейронами скрытого слоя и вектора сдвигов скрытого слоя. Рассмотрены задачи восстановления регрессии на 3 наборах данных, приведено сравнение обобщающей способности классической ELM [14], и ELM, в которых произведена интеллектуальная настройка входных весов биоинспирированными алгоритмами. Дополнительно приведено исследование ландшафтов оптимизируемых биоинспирированными алгоритмами функций оценки потерь в процессе уточнения входных весов и сдвигов ELM.

МАШИНА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ

В задаче машинного обучения с учителем даны набор объектов $X = X_L \cup X_T$, где X_L – набор данных для обучения (англ. learning), X_T – набор данных для тестирования (англ. testing); набор возможных ответов Y и неизвестная целевая функция $f: X \rightarrow Y$, отображающая множество объектов в множество возможных ответов. Значения f известны для каждого объекта из набора X . Набор X_L используется в процессе обучения модели, а оценка качества обученной модели производится на наборе X_T . Обучающий набор X_L имеет вид $\{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_s\}$, где s – число объектов в X_L , каждый i -й объект $\vec{x}_i \in X_L$ представлен в виде набора признаков $\vec{x}_i = (h_1, h_2, \dots, h_n)$, характеризующих объект \vec{x}_i , значения \vec{y}_i известны для каждого объекта \vec{x}_i и равны $f(\vec{x}_i)$. В процессе обучения алгоритмом машинного обучения осуществляется построение функции $a: X \rightarrow Y$, которая бы достаточно хорошо аппроксимировала неизвестную целевую зависимость f на $X = X_L \cup X_T$.

Машина экстремального обучения является алгоритмом машинного обучения с учителем, позволяющим, аналогично ИНС, осуществлять принятие решений путем автоматического конфигурирования сложной нелинейной системы для конкретной задачи. ELM представляет собой ИНС прямого распространения с единственным скрытым слоем и бесконечно дифференцируемой функцией активации на скрытом слое [14], веса соединений между входными нейронами и нейронами скрытого слоя в ELM инициализируются случайно, как и сдвиги скрытого слоя, а веса между нейронами скрытого слоя и выходными нейронами – вычисляются. Структура ELM представлена на рис. 1.

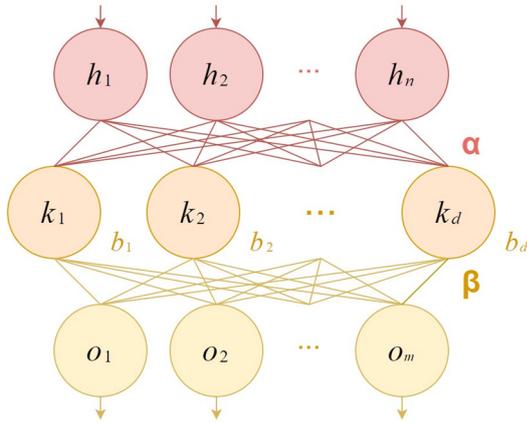


Рис. 1. Машина экстремального обучения

Элементы α – матрицы весов соединений между входными нейронами h_1, h_2, \dots, h_n и нейронами скрытого слоя k_1, k_2, \dots, k_d , имеющей вид $\mathbb{R}^{d \times n}$, где n – число входных нейронов, а d – число скрытых нейронов, инициализируются случайно, сдвиги нейронов скрытого слоя b_1, b_2, \dots, b_d , также инициализируются случайно, вектор сдвигов имеет вид \mathbb{R}^d . Матрица весов соединений β между нейронами скрытого слоя k_1, k_2, \dots, k_d и выходными нейронами o_1, o_2, \dots, o_m , имеющая вид $\mathbb{R}^{d \times m}$, где m – число выходных нейронов, вычисляется следующим образом:

$$\beta = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{Y}_L, \text{ где } \mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T, \mathbf{H} = g(\mathbf{X}_L \alpha^T + \mathbf{b}), \quad (1)$$

где \mathbf{X}_L обозначает матрицу вида $\mathbb{R}^{s \times n}$, в которой строки кодируют s объектов из обучающего набора X_L . При этом каждый объект представлен в виде набора n признаков $\{h_1, h_2, \dots, h_n\}$, α^T обозначает транспонированную матрицу весов соединений между нейронами вида $\mathbb{R}^{n \times d}$, где n – число входных нейронов, d – число выходных нейронов. \mathbf{b} – матрица вида $\mathbb{R}^{s \times d}$, полученная преобразованием вектора сдвигов скрытого слоя вида \mathbb{R}^d в матрицу $\mathbb{R}^{1 \times d}$, в которой 1-я строка затем дублируется s раз. g – бесконечно дифференцируемая функция активации, поэлементно применяемая к каждому элементу матрицы. \mathbf{H} – выходная матрица скрытого слоя вида $\mathbb{R}^{s \times d}$. \mathbf{H}^\dagger – псевдообращение Мура – Пенроуза для матрицы \mathbf{H} [15] вида $\mathbb{R}^{d \times s}$. \mathbf{Y}_L обозначает матрицу ответов вида $\mathbb{R}^{s \times m}$, в которой строки кодируют ответы, соответствующие объектам обучающего набора X_L , каждый ответ имеет вид $\{o_1, o_2, \dots, o_m\}$. Таким образом, матрица весов соединений между d нейронами скрытого слоя и m выходными нейронами β имеет вид $\mathbb{R}^{d \times m}$. В качестве функции активации скрытого слоя g в ELM часто используют сигмоидальную функцию активации [25]:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (2)$$

где x – элемент выходной матрицы скрытого слоя, имеющей вид $\mathbb{R}^{s \times d}$, получаемой перемножением матриц \mathbf{X}_L и α^T , и прибавлением к результату матрицы \mathbf{b} .

Число нейронов скрытого слоя d является гиперпараметром ELM и требует настройки в зависимости от решаемой задачи. Число признаков n каждого объекта из обучающего набора данных определяется в зависимости от специфики предметной области решаемой задачи. В задаче восстановления регрессии с помощью ELM, рассматриваемой в данной работе, число выходных нейронов m полагают равным 1.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ВЫБОР ВХОДНЫХ ВЕСОВ БИОИНСПИРИРОВАННЫМИ АЛГОРИТМАМИ

Случайная инициализация весов соединений между входными и скрытыми нейронами α и сдвигов скрытого слоя \mathbf{b} не гарантирует получения оптимальной конфигурации ELM [16, 19]. Известно о применении алгоритма роя частиц для получения оптимальной конфигурации ELM в задаче прогнозирования транспортных потоков [16], о применении генетического алгоритма в задачах восстановления регрессии [19]. В обозначенных работах авторы используют среднеквадратическую функцию ошибки (англ. root mean square error, RMSE) в качестве целевой функции для биоинспирированных алгоритмов, определяемую как:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (a(\vec{x}_i) - y_i)^2}, \quad (3)$$

где \vec{x}_i – i -й объект из набора данных для обучения X_L , содержащего s объектов; y_i – ответ для i -го объекта; $a(\vec{x}_i)$ – предсказание ELM для i -го объекта \vec{x}_i .

Для оценки обобщающей способности обученной модели ИНС часто используют функцию средней абсолютной ошибки, определяемую как:

$$\text{MAE} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s |a(\vec{x}_i) - y_i|, \quad (4)$$

где \vec{x}_i – i -й объект из набора данных для обучения X_L , содержащего s объектов; y_i – ответ для i -го объекта; $a(\vec{x}_i)$ – предсказание ELM для i -го объекта. Функция средней абсолютной ошибки была использована в [16] для оценки качества модели ELM.

При решении задачи выбора оптимальных значений входных весов, заданных матрицей α вида $\mathbb{R}^{d \times n}$, и вектора сдвигов скрытого слоя $\{b_1, b_2, \dots, b_d\}$ вида \mathbb{R}^d (рис. 1), каждый i -й агент популяции

биоинспирированных алгоритмов может быть представлен в виде вектора:

$$\{\alpha_{11}^i, \alpha_{12}^i, \dots, \alpha_{1n}^i, \alpha_{21}^i, \alpha_{22}^i, \dots, \alpha_{2n}^i, \dots, \alpha_{d1}^i, \alpha_{d2}^i, \dots, \alpha_{dn}^i, b_1^i, b_2^i, \dots, b_d^i\}.$$

Генетический алгоритм, применяемый в задаче интеллектуального выбора входных весов и сдвигов ELM в работе [19], является эвристическим популяционным алгоритмом оптимизации, вдохновленным эволюционными процессами живой природы. Алгоритм 1 определяет псевдокод генетического алгоритма. На каждой итерации к агентам популяции последовательно применяются операторы отбора, скрещивания и мутации, причем могут использоваться различные стратегии отбора, такие, как турнирный отбор, отбор усечением [21].

Алгоритм роя частиц, применяемый в задаче выбора оптимальных значений входных весов и

сдвигов скрытого слоя ELM в работе [16], является широко известным роевым алгоритмом глобальной оптимизации, вдохновленным поведением скоординированного полета стай птиц. Алгоритм был предложен в работе [22]. Алгоритм 2 определяет псевдокод алгоритма роя частиц.

Алгоритм поиска косяком рыб (англ. Fish School Search, FSS) является алгоритмом глобальной оптимизации, вдохновленным поведением косяков рыб, движущихся в поисках пищи. Этот алгоритм был предложен Bastos Filho и Lima Neto [23] и с тех пор нашел применение при решении множества задач, включая реконструкцию изображений [26] и расстановку весов в ИНС [27].

В работе [24] Л.А. Демидовой и А.В. Горчаковым была предложена модификация алгоритма поиска косяком рыб (англ. Tent map-based Fish School Search with Exponential step decay, ETFSS), ускоряющая сходимость FSS. Алгоритм 3 определяет псевдокод ETFSS.

Алгоритм 1. Генетический алгоритм

Вход: $P_{\text{crossover}}$ – вероятность скрещивания, P_{mutation} – вероятность мутации

- 1: определить функцию приспособленности (f)
 - 2: установить номер поколения в 0 ($t = 0$)
 - 3: случайно сгенерировать агентов начальной популяции P_t
 - 4: вычислить значение f для каждого агента из P_t
 - 5: **пока** не выполнен критерий останова, **выполнять**
 - 6: $t = t + 1$
 - 7: отобрать агентов для популяции P_t из популяции P_{t-1}
 - 8: изменить агентов P_p , используя оператор *скрещивания* с вероятностью $P_{\text{crossover}}$
 - 9: изменить агентов P_p , используя оператор *мутации* с вероятностью P_{mutation}
 - 10: вычислить значение f для каждого агента в P_t
 - 11: **завершить цикл**
 - 12: **возвратить** лучшее найденное в процессе эволюции решение
-

Алгоритм 2. Алгоритм роя частиц*

Вход: $w, c_1, c_2, v_{\text{max}}$

- 1: определить функцию приспособленности (f)
 - 2: установить номер поколения в 0 ($t = 0$)
 - 3: случайно сгенерировать агентов начальной популяции P_t
 - 4: случайно сгенерировать скорости агентов V_t на промежутке $[-v_{\text{max}}, v_{\text{max}}]$
 - 5: вычислить значение f для каждого агента из P_t
 - 6: выбрать агента $\vec{p}_{\text{gbest}} \in P_t$ такого, что $\forall \vec{p}_{i,t} \in P_t : f(\vec{p}_{\text{gbest},t}) \leq f(\vec{p}_{i,t})$
 - 7: для каждой частицы $\vec{p}_{i,t} \in P_t$ установить лучшее положение $\vec{p}_{\text{pbest},i}$ равным $\vec{p}_{i,t}$
 - 8: **пока** не выполнен критерий останова, **выполнять**
-

- 9: $t = t + 1$
- 10: **для каждого** агента $\vec{p}_{i,t} \in P_t$ **выполнять**
- 11: случайно сгенерировать \vec{r}_1 и \vec{r}_2 , компоненты которых $\in [0,1]$
- 12: $\vec{v}_{i,t} = w\vec{v}_{i,t-1} + c_1\vec{r}_1(\vec{p}_{\text{gbest}} - \vec{p}_{i,t}) + c_2\vec{r}_2(\vec{p}_{\text{pbest},i} - \vec{p}_{i,t})$
- 13: ограничить $\vec{v}_{i,t}$ промежутком $[-v_{\text{max}}, v_{\text{max}}]$
- 14: $\vec{p}_{i,t} = \vec{p}_{i,t-1} + \vec{v}_{i,t}$
- 15: вычислить значение f для агента $\vec{p}_{i,t}$
- 16: **если** $f(\vec{p}_{i,t}) < f(\vec{p}_{\text{pbest},i})$, **то** $\vec{p}_{\text{pbest},i} = \vec{p}_{i,t}$
- 17: **завершить цикл**
- 18: выбрать агента $\vec{p}_{\text{gbest},t} \in P_t$ такого, что $\forall \vec{p}_{i,t} \in P_t : f(\vec{p}_{\text{gbest},t}) \leq f(\vec{p}_{i,t})$
- 19: **если** $f(\vec{p}_{\text{gbest},t}) < f(\vec{p}_{\text{gbest}})$, **то** $\vec{p}_{\text{gbest}} = \vec{p}_{\text{gbest},t}$
- 20: **завершить цикл**
- 21: **возвратить** лучшее найденное решение \vec{p}_{gbest}

*gbest – глобально лучшее решение на итерации t в терминологии алгоритма роя частиц (англ. global best); pbest – лучшее найденное решение конкретным агентом на итерации t в терминологии алгоритма роя частиц (англ. personal best)

Алгоритм 3. Алгоритм хаотического поиска косяком рыб с экспоненциальным убыванием шага*

Вход: $step_{\text{ind,initial}}, step_{\text{vol,initial}}, \gamma = 5$

- 1: определить функцию приспособленности (f)
- 2: установить номер поколения в 0 ($t = 0$)
- 3: случайно сгенерировать агентов начальной популяции P_t
- 4: вычислить значение f для каждого агента из P_t
- 5: выбрать агента $\vec{p}_{\text{gbest}} \in P_t$ такого, что $\forall \vec{p}_{i,t} \in P_t : f(\vec{p}_{\text{gbest},t}) \leq f(\vec{p}_{i,t})$
- 6: **пока** не выполнен критерий останова, **выполнять**
- 7: $t = t + 1$
- 8: $step_{\text{ind},t} = step_{\text{ind,initial}} e^{\frac{-\gamma t}{iter_{\text{max}}}}$
- 9: $step_{\text{vol},t} = step_{\text{vol,initial}} e^{\frac{-\gamma t}{iter_{\text{max}}}}$
- 10: **для каждого** агента $\vec{p}_{i,t} \in P_t$ **выполнять**
- 11: случайно сгенерировать \vec{r}_1 и \vec{r}_2 , компоненты которых $\in [0,1]$
- 12: $\vec{p}_{i,t} = \vec{p}_{i,t-1} + step_{\text{ind},t}\vec{r}_1$
- 13: вычислить значение f для $\vec{p}_{i,t}$
- 14: **если** $f(\vec{p}_{i,t}) \geq f(\vec{p}_{i,t-1})$ **то** $\vec{p}_{i,t} = \vec{p}_{i,t-1}$
- 15: $w_{i,t} = w_{i,t-1} + \frac{\Delta f_{i,t}}{\max(\Delta f_{i,t+1})}$

16: завершить цикл

$$17: \vec{I} = \frac{\sum_{i=1}^n (\vec{p}_{i,t} - \vec{p}_{i,t-1}) \Delta f_{i,t}}{\sum_{i=1}^n \Delta f_{i,t}}$$

18: для каждого агента $\vec{p}_{i,t} \in P_t$ выполнить $\vec{p}_{i,t} = \vec{p}_{i,t} + \vec{I}_t$

$$19: \vec{B} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{p}_{i,t} w_{i,t}}{\sum_{i=1}^n w_{i,t}}$$

20: для каждого агента $\vec{p}_{i,t} \in P_t$ выполнять

$$21: \vec{p}_{i,t} = \vec{p}_{i,t} \pm step_{vol,t} \vec{r}_2 \frac{\vec{p}_{i,t} - \vec{B}_{t+1}}{|\vec{p}_{i,t} - \vec{B}_{t+1}|}; \text{ знак «-», если } \sum_{i=1}^n w_{i,t} > \sum_{i=1}^n w_{i,t-1}, \text{ иначе «+»}$$

22: завершить цикл

23: выбрать агента $\vec{p}_{gbest,t}$ такого, что $\forall \vec{p}_{i,t} \in P_t : f(\vec{p}_{gbest,t}) \leq f(\vec{p}_{i,t})$

24: если $f(\vec{p}_{gbest,t}) < f(\vec{p}_{gbest})$, то $\vec{p}_{gbest} = \vec{p}_{gbest,t}$

25: завершить цикл

26: вернуть лучшее найденное решение \vec{p}_{gbest}

* $step_{ind}$ – максимальный размер шага индивидуального перемещения в терминологии алгоритма поиска оптимума косяком рыб; $step_{vol}$ – максимальный размер шага коллективно-волевого перемещения в терминологии алгоритма поиска оптимума косяком рыб; $iter$ – число итераций; $iter_{max}$ – максимально допустимое число итераций для алгоритма

В Алгоритме 3 генерация равномерно распределенных случайных чисел для векторов \vec{r}_1 и \vec{r}_2 осуществляется на основе отображения tent с помощью динамической системы, находящейся в хаотическом состоянии. Динамическая система описывается набором времен T , набором состояний S и отображением $M: T \times S \rightarrow S$, описывающим эволюцию динамической системы. Отображение tent задается как:

$$y_{n+1} = \mu \min(y_n, 1 - y_n), \text{ где } \mu = 1.9999, \quad (5)$$

где число μ называют бифуркационным параметром; y_n определяет состояние динамической системы в момент времени t .

Диаграмма бифуркаций системы (5) представлена на рис. 2а.

Сравнение экспоненциального убывания шага, используемого в алгоритме ETFSS, и линейного

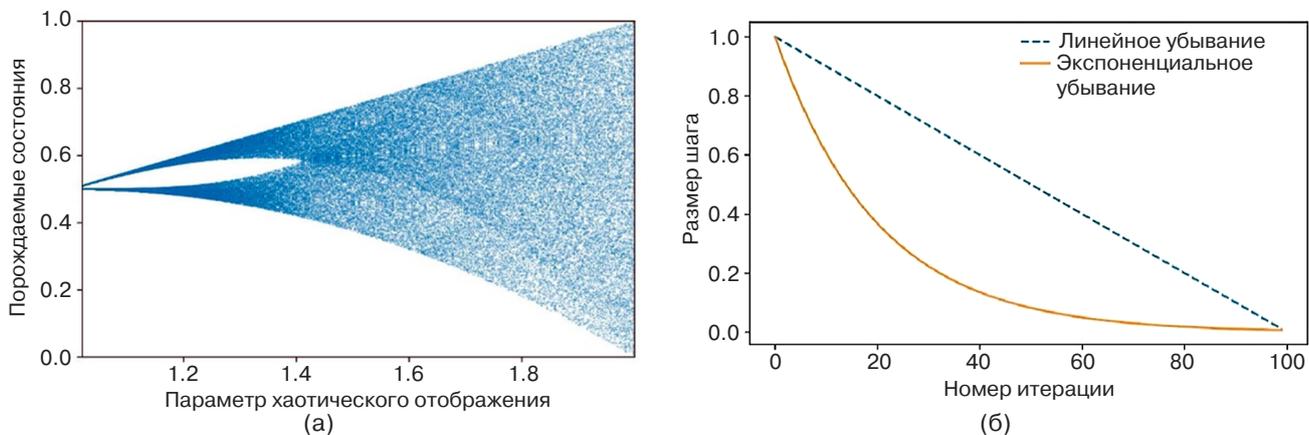


Рис. 2. (а) Диаграмма бифуркаций динамической системы отображения (5); (б) сравнение экспоненциального и линейного убывания шага в FSS и ETFSS

убывания шага, используемого в оригинальном алгоритме поиска косяком рыб, представлено на рис. 2б. Эффективность применения хаотического генератора псевдослучайных чисел (5) и экспоненциального убывания шага (рис. 2б) в алгоритме поиска косяком рыб показана в [24].

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования эффективности алгоритмов GA, PSO, FSS и ETFSS в задаче расстановки входных весов и сдвигов в ELM и для сравнения полученных конфигураций ELM с классической реализацией ELM, в которой входные веса и сдвиги инициализированы случайно, были рассмотрены 3 открытых набора данных, описанных в [28, 29]. Первый набор содержит сведения о производительности центральных процессоров (англ. Central Processing Unit (CPU) Performance), состоит из 209 строк и 10 столбцов. Каждая строка кодирует 9 признаков, которые потенциально могут влиять на 10-й признак, количественно характеризующий производительность процессора. Второй набор содержит сведения о ценах на автомобили (англ. Auto Imports), содержит 206 строк и 26 столбцов. Каждая строка кодирует 25 признаков объекта, которые могут влиять на 26-й признак – цену автомобиля. Третий набор данных содержит информацию о ценах домов в Бостоне (англ. Boston Housing), содержит 506 строк и 14 столбцов, каждая строка кодирует 13 признаков объектов, потенциально влияющих на 14-й признак.

Для решения задачи восстановления регрессионной зависимости для указанных наборов данных с помощью ELM была использована сигмоидальная функция активации (2) на скрытом слое. Для классической реализации ELM каждый из наборов данных был 10 раз разделен на обучающий набор X_L , включающий 70% от общего числа объектов из набора X , и тестовый набор X_T , включающий 30% объектов набора X . Классическая реализация ELM была обучена 10 раз на наборе X_L по формуле (1) и 10 раз оценена на наборе X_T по формуле (4), с целью выбора оптимального числа нейронов на скрытом слое. Процесс выбора числа нейронов представлен на рис. 3, выбранные числа нейронов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Выбранное число нейронов на скрытом слое для классической ELM

| Набор данных | CPU Performance | Auto Imports | Boston Housing |
|----------------|-----------------|--------------|----------------|
| Число нейронов | 30 | 20 | 60 |

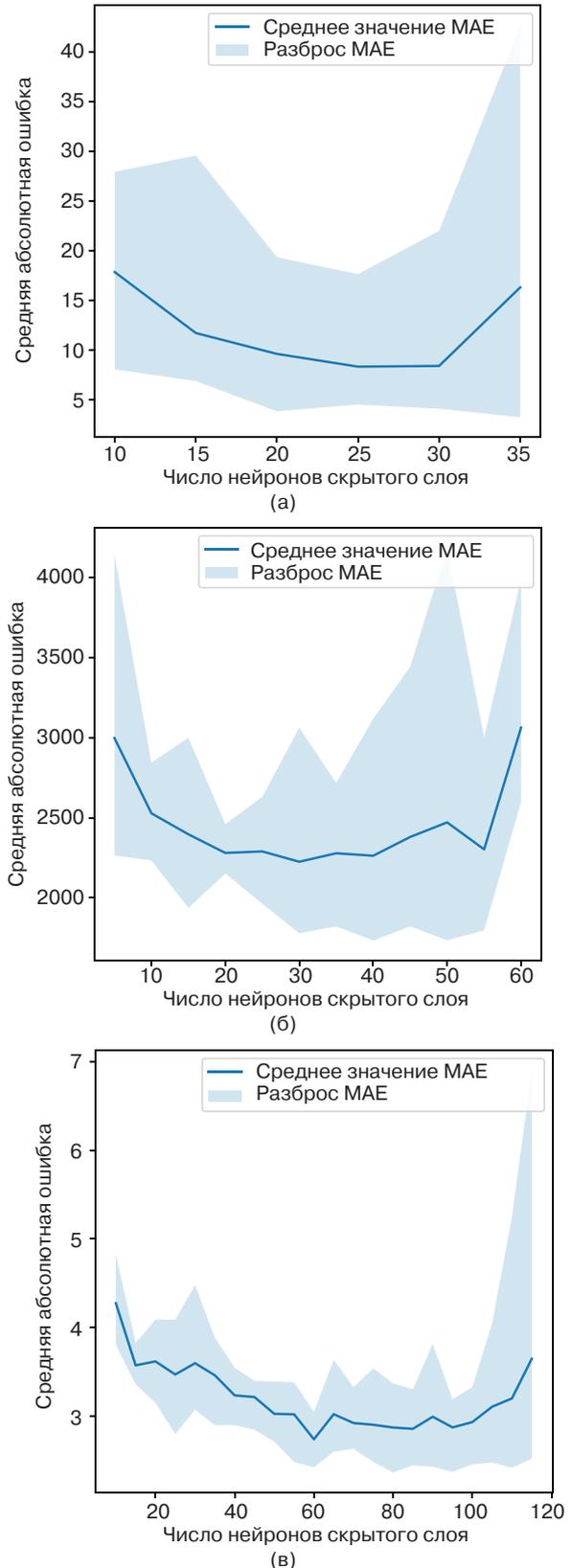


Рис. 3. Выбор оптимального числа нейронов ELM. Светло-синим цветом обозначен разброс значений (4) на X_T в процессе перекрестной валидации по 10 блокам, синим цветом обозначены усредненные значения (4) для наборов: (а) CPU Performance; (б) Auto Imports; (в) Boston Housing

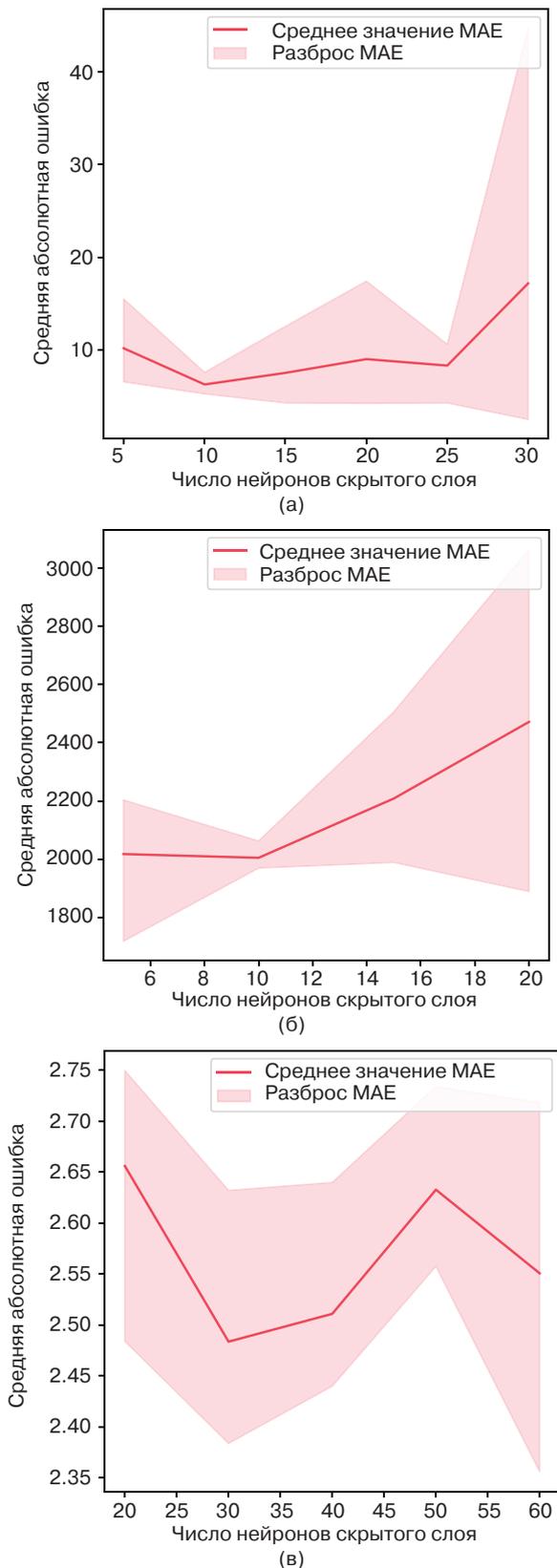


Рис. 4. Выбор числа нейронов ELM, в которой производится настройка входных весов и сдвигов алгоритмом ETFSS. Светло-красным цветом обозначен разброс значений (4) на X_T , красным цветом обозначены усредненные значения (4) для наборов: (а) CPU Performance; (б) Auto Imports; (в) Boston Housing

Аналогичным образом был проведен выбор числа нейронов в ELM, обученной с помощью биоинспирированных алгоритмов. В работах [16, 19] показано, что компактные ELM (в которых число нейронов на скрытом слое сравнительно невелико) способны достигать лучшей обобщающей способности в случае применения биоинспирированных алгоритмов для выбора входных весов и сдвигов. Вследствие этого верхняя граница числа нейронов скрытого слоя была установлена согласно табл. 1. Предварительное исследование, проведенное методом перекрестной проверки по 10 блокам для различных чисел нейронов скрытого слоя в ELM, где входные веса и сдвиги скрытого слоя были расставлены биоинспирированными алгоритмами, установило, что с помощью ETFSS могут быть получены модели с наилучшей обобщающей способностью. Результаты выбора числа нейронов для ELM, улучшенной с помощью ETFSS (ETFSS-ELM), представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2. Выбранное число нейронов в ELM, настроенной алгоритмом ETFSS

| Набор данных | CPU Performance | Auto Imports | Boston Housing |
|----------------|-----------------|--------------|----------------|
| Число нейронов | 10 | 10 | 30 |

Как показано на рис. 3 и рис. 4, в случае выбора слишком малого или слишком большого числа нейронов точность предсказаний ELM снижается вследствие недообучения или переобучения модели, соответственно. При этом ETFSS-ELM требуется меньшее число нейронов для достижения лучшей точности на тестовых данных по сравнению с традиционной ELM.

На рис. 5 представлены графики сходимости алгоритмов GA, PSO и ETFSS в процессе оптимизации среднеквадратической функции оценки потерь компактной ELM (3) на обучающих наборах данных при значениях параметров биоинспирированных алгоритмов, представленных в табл. 3. Числа нейронов на скрытом слое в компактных биоинспирированных ELM приведены в табл. 2.

Таблица 3. Значения параметров биоинспирированных алгоритмов

| Алгоритм | Выбранные значения параметров |
|---------------|--------------------------------------------------------------------|
| GA | $P_{\text{crossover}} = 0.9, P_{\text{mutation}} = 0.1$ |
| PSO | $v_{\text{max}} = 5, c_1 = 0.8, c_2 = 0.5, w = 0.8$ |
| FSS, ETFSS | $step_{\text{ind,initial}} = 0.7, step_{\text{vol,initial}} = 0.7$ |
| Все алгоритмы | 300 итераций, 100 агентов популяции |

Из графиков, представленных на рис. 5, очевидно, что алгоритм ETFSS, являющийся улучшенной версией алгоритма FSS, способен находить наилучшие решения в задаче поиска оптимума функции оценки потерь (3) по сравнению с алгоритмами GA, PSO и FSS.

Для оценки обобщающей способности моделей GA-ELM, PSO-ELM, FSS-ELM и ETFSS-ELM, полученных в результате уточнения весов алгоритмами GA, PSO, FSS и ETFSS соответственно, были получены диаграммы размаха значений функции средней абсолютной ошибки (англ. mean average error, MAE) (4), представленные на рис. 6. Средние значения MAE на тестовых подмножествах рассмотренных наборов данных представлены в табл. 4. В сравнение также были включены классические реализации ELM со случайной инициализацией входных весов и сдвигов с числами нейронов, указанными в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 4. Средние значения MAE (4) на тестовых подмножествах рассматриваемых наборов данных, полученные применением перекрестной проверки по 10 блокам к ELM (1) с числами скрытых нейронов (табл. 2), к ELM (2) с числами скрытых нейронов (табл. 1), к GA-ELM, PSO-ELM, FSS-ELM, ETFSS-ELM

| Набор данных | ELM (1) | ELM (2) | GA-ELM | PSO-ELM | FSS-ELM | ETFSS-ELM |
|-----------------|---------|---------|--------|---------|---------|-------------|
| CPU Performance | 13.2 | 10.4 | 9.4 | 8.8 | 10.3 | 6.2 |
| Auto Imports | 2657 | 2354 | 2155 | 2199 | 2522 | 2124 |
| Boston Housing | 3.47 | 2.89 | 2.69 | 2.86 | 3.11 | 2.64 |

Из рис. 6 и табл. 4 следует, что модель ETFSS-ELM показывает наилучшую обобщающую способность среди рассмотренных моделей. GA-ELM, PSO-ELM, FSS-ELM, ETFSS-ELM, в которых была проведена интеллектуальная настройка весов и сдвигов, для всех наборов данных показывают лучшую обобщающую способность по сравнению с классической ELM с аналогичным числом нейронов на скрытом слое. ELM с увеличенными числами нейронов на скрытом слое, указанными в табл. 1, показывает лучшие результаты по сравнению с компактной классической ELM, уступая компактным ELM, настроенным биоинспирированными алгоритмами, с числами скрытых нейронов, приведенными в табл. 2 и рис. 4.

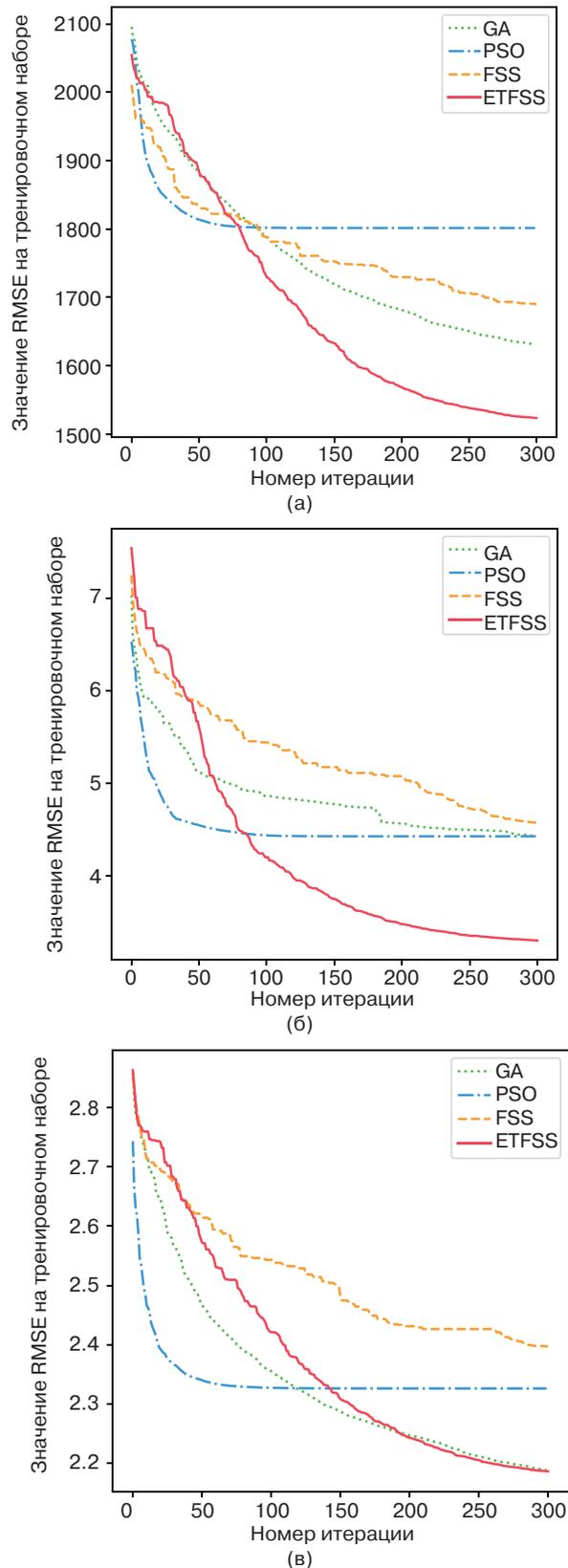


Рис. 5. Сходимость алгоритмов, вдохновленных живой природой, в процессе оптимизации функции (3) с целью выбора входных весов и сдвигов ELM для наборов данных: (а) CPU Performance; (б) Auto Imports; (в) Boston Housing

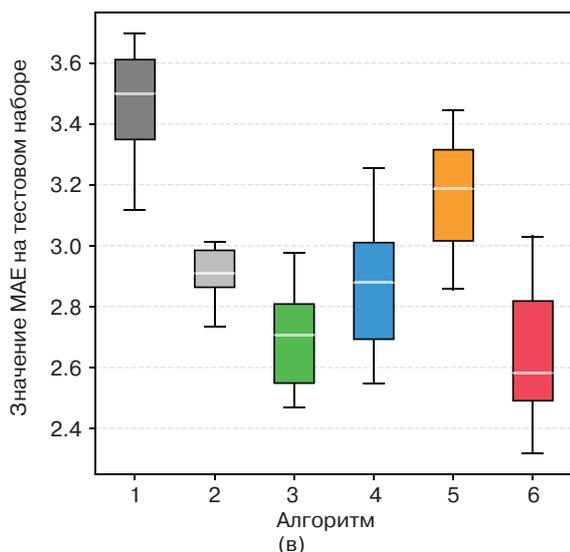
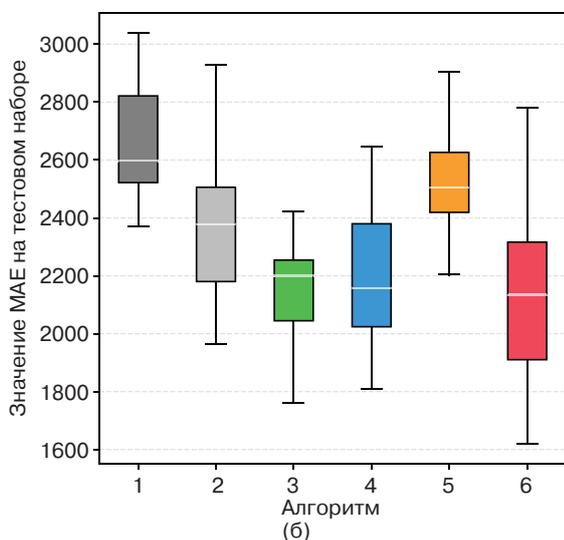
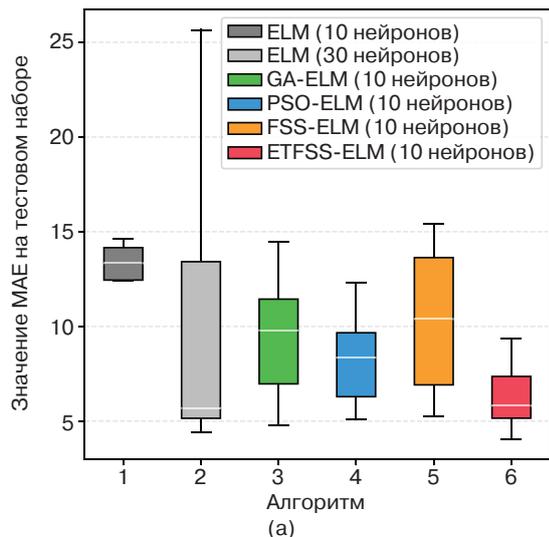


Рис. 6. Диаграммы размаха значений MAE (4) на тестовых данных для классических и биоинспирированных ELM с различным числом скрытых нейронов для наборов: (а) CPU Performance; (б) Auto Imports; (в) Boston Housing

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЛАНДШАФТОВ ОПТИМИЗИРУЕМОЙ ФУНКЦИИ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ

Для демонстрации процесса поиска оптимальных значений входных весов α размерности $\mathbb{R}^{d \times n}$, где d – число нейронов на скрытом слое ELM; n – число входных нейронов и сдвигов размерности \mathbb{R}^d была проведена визуализация ландшафтов целевой функции (3). Целевая функция (3) в рассматриваемой задаче интеллектуальной настройки входных весов и сдвигов ELM принимает на вход многомерный вектор \vec{w} вида \mathbb{R}^q , где $q = d \times n + d$. Значения q для каждого из рассматриваемых наборов данных представлены в табл. 5.

Таблица 5. Размерности вектора \vec{w} , содержащего веса и сдвиги ELM

| Набор данных | CPU Performance | Auto Imports | Boston Housing |
|-----------------------|-----------------|--------------|----------------|
| Размерность \vec{w} | 100 | 260 | 420 |

Как показано в табл. 5, размерность целевой функции (3) достаточно высока в каждой из рассматриваемых задач, однако визуализация ландшафтов возможна только для двумерных функций. Существует ряд подходов, позволяющих визуализировать многомерные функции в трехмерной прямоугольной системе координат. В методе, описанном в работе [30], предлагается определить 2 ортогональных вектора \vec{a} и \vec{b} , размерность которых совпадает с размерностью \vec{w} , после чего определить визуализируемую функцию u как:

$$u(\alpha, \beta) = f(\vec{w} + \alpha \vec{a} + \beta \vec{b}), \quad (5)$$

где f – исходная функция; \vec{w} – многомерный вектор; α и β – скалярные параметры; \vec{a} и \vec{b} – ортогональные единичные векторы, размерность которых совпадает с размерностью вектора \vec{w} .

В рассматриваемой задаче функция f определена по формуле (3); вектор \vec{w} содержит входные веса и скрытые сдвиги оптимальной конфигурации ELM; $\vec{a} = \{0, 1, 0, 1, \dots\}$, $\vec{b} = \{1, 0, 1, 0, \dots\}$; размерности векторов $\vec{a}, \vec{b}, \vec{w}$ совпадают. Для каждого из рассмотренных наборов данных были получены визуализации ландшафтов функции (3) вблизи найденного оптимума \vec{w} , представленные на рис. 7 и рис. 8. Скалярные параметры α и β изменяются в процессе визуализации на промежутке $[-1, 1]$ с шагом 0.02.

Для визуализации процесса сходимости алгоритма ETFSS в пространствах, содержащих множество локальных экстремумов, показанных на рис. 7 и

рис. 8, были получены изменения позиции случайно выбранного агента алгоритма ETFSS на каждой 25-й итерации. Для каждой позиции агента \vec{p} была выбрана ближайшая точка из построенной в процессе визуализации ландшафтов методом варьирования скаляров α и β сетки, причем для определения близости вектора \vec{p} к точке $\{\alpha_i, \beta_j\}$ было вычислено манхеттенское расстояние со смещением относительно вектора \vec{w} , вблизи которого выполняется визуализация:

$$\begin{aligned} dist(\vec{p}, \alpha_i, \beta_j) &= |(\vec{p} - \vec{w}) - (\alpha_i \vec{a} + \beta_j \vec{b})| = \\ &= \sum_{k=1}^n |(p_k - w_k) - (\alpha_i a_k + \beta_j b_k)|, \end{aligned} \quad (6)$$

где n – размерность вектора позиции агента \vec{p} , совпадающая с размерностью вектора \vec{w} , кодирующего входные веса и сдвиги найденной оптимальной конфигурации ELM. Размерность вектора позиции агента \vec{p} также совпадает с размерностью взаимно ортогональных векторов \vec{a} и \vec{b} , $\vec{a} = \{0, 1, 0, 1, \dots\}$, $\vec{b} = \{1, 0, 1, 0, \dots\}$, α_i и β_j – координаты точки сетки визуализации.

Визуализации изменения позиции случайно выбранного агента \vec{p} алгоритма ETFSS на каждой 25-й итерации в процессе поиска оптимальных значений входных весов и сдвигов ELM методом оптимизации функции оценки потерь (3) вблизи найденного решения \vec{w} представлены на рис. 9.

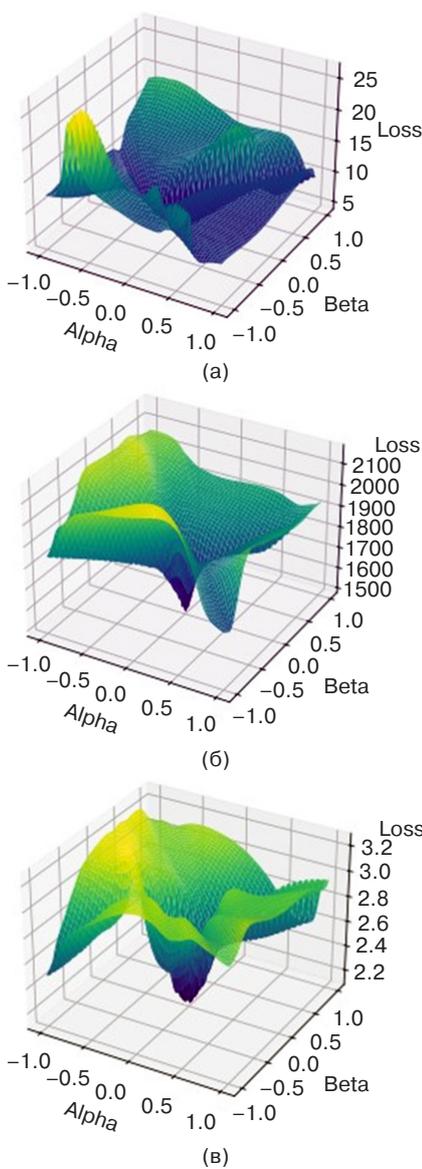


Рис. 7. Визуализация ландшафтов многомерных функций оценки потерь вблизи найденного оптимума для наборов данных: (а) CPU Performance; (б) Auto Imports; (в) Boston Housing

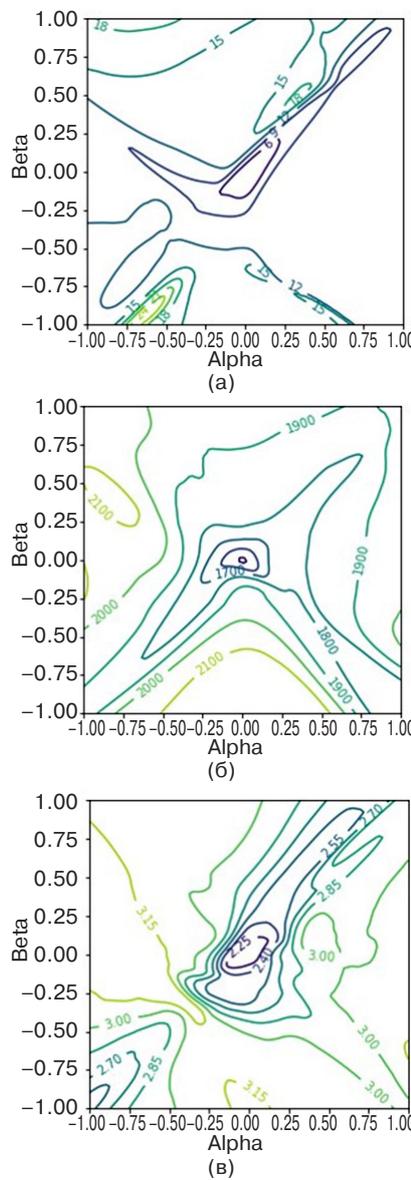


Рис. 8. Визуализация линий уровня многомерных функций оценки потерь вблизи найденного оптимума для наборов: (а) CPU Performance; (б) Auto Imports; (в) Boston Housing

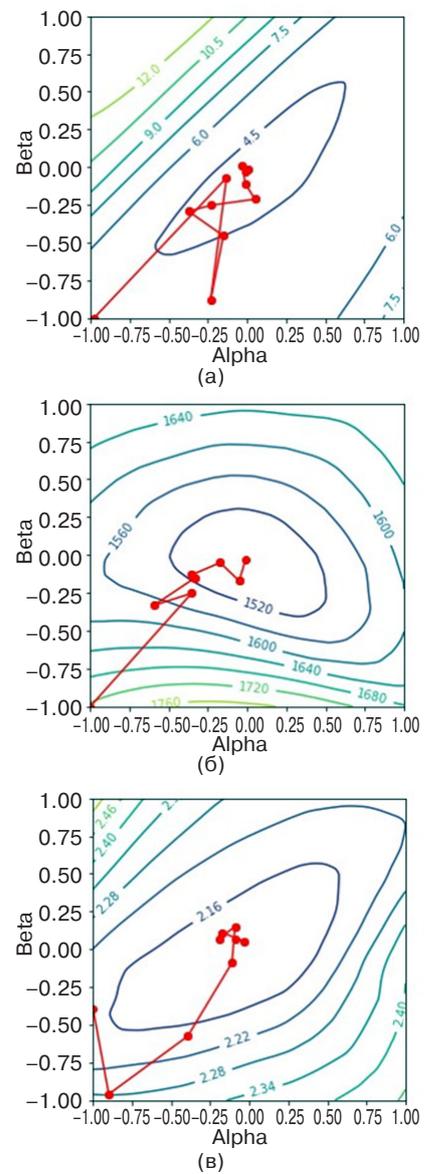


Рис. 9. Изменения позиции случайно выбранного агента алгоритма ETFSS вблизи найденного решения для наборов: (а) CPU Performance; (б) Auto Imports; (в) Boston Housing

Как показано на рис. 7 и рис. 8, функция (3) в рассматриваемых задачах имеет множество экстремумов, успешно преодолеваемых биоинспирированными алгоритмами оптимизации в процессе поиска оптимальных значений входных весов и сдвигов скрытых нейронов ELM. Из траекторий, представленных на рис. 9, следует, что алгоритм ETFSS улучшает находимые популяцией агентов решения на каждой итерации вплоть до завершения выполнения алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном исследовании была изучена эффективность применения алгоритмов, вдохновленных живой природой, в задаче интеллектуального выбора весов соединений между входными нейронами и скрытыми нейронами, а также сдвигов скрытого слоя машины экстремального обучения в задачах восстановления регрессии.

Приведено сравнение обобщающей способности классической ELM, компактной классической ELM, компактных ELM, в которых проведена настройка входных весов и сдвигов генетическим алгоритмом (GA-ELM), алгоритмом роя частиц (PSO-ELM), алгоритмом поиска косяком рыб (FSS-ELM), алгоритмом хаотического поиска косяком рыб с экспоненциальным убыванием шага (ETFSS-ELM). Выявлено, что для достижения лучшей обобщающей способности ELM, в которых проведена настройка весов биоинспирированными алгоритмами, требуется меньшее число нейронов на скрытом слое. Подобные компактные ELM показывают лучшую обобщающую способность. С помощью хаотического алгоритма поиска косяком рыб с экспоненциальным убыванием шага ETFSS, предложенным в работе [24], могут быть получены наилучшие конфигурации машин экстремального обучения в рассмотренных задачах.

Приведенные визуализации ландшафтов многомерной функции оценки потерь в трехмерной прямоугольной системе координат вблизи найденного решения демонстрируют наличие множества экстремумов, из-за чего применение биоинспирированных алгоритмов поиска глобального оптимума является целесообразным. Полученные визуализации траектории движения случайно выбранного агента алгоритма ETFSS показывают, что алгоритм с каждой итерацией улучшает находимые популяцией решения.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение возможности применения ETFSS для уточнения весов онлайн-машины экстремального обучения, способной дообучаться по мере получения новых данных без итерационного процесса обучения [31]. Анализ зависимости результатов,

получаемых с помощью биоинспирированных алгоритмов, от их гиперпараметров также является перспективным направлением исследований.

Вклад авторов

Л.А. Демидова – концептуализация, руководство, проверка, работа над текстом статьи.

А.В. Горчаков – программное обеспечение, визуализация, тестирование, работа над текстом статьи.

Все авторы прочитали и одобрили опубликованную версию рукописи.

Authors' contribution

L.A. Demidova—conceptualization, guidance, supervision, validation, and original draft preparation.

A.V. Gorchakov—software, resources, visualization, testing, and original draft preparation.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wu Y., Ianakiev K., Govindaraju V. Improved k -nearest neighbor classification. *Pattern Recognition*. 2002;35(10):2311–2318. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(01\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(01)00132-7)
2. Noble W.S. What is a support vector machine? *Nat. Biotechnol.* 2006;24(12):1565–1567. <https://doi.org/10.1038/nbt1206-1565>
3. Demidova L.A. Two-stage hybrid data classifiers based on SVM and kNN algorithms. *Symmetry*. 2021;13(4):615. <https://doi.org/10.3390/sym13040615>
4. Lin W., Wu Z., Lin L., Wen A., Li J. An ensemble random forest algorithm for insurance Big Data analysis. *IEEE Access*. 2017;5:16568–16575. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2738069>
5. Deng L., Hinton G., Kingsbury B. New types of deep neural network learning for speech recognition and related applications: An overview. In: *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. 2013:8599–8603. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6639344>
6. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*. 1958;65(6):386–408. <https://doi.org/10.1037/h0042519>
7. Affonso C., Debiaso Rossi A.L., Antunes Vieira F.H., Ponce de Leon Ferreira de Carvalho A.C. Deep learning for biological image classification. *Expert Systems with Applications*. 2017;85:114–122. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.039>
8. Chen N., Xiong C., Du W., Wang C., Lin X., Chen Z. An improved genetic algorithm coupling a back-propagation neural network model (IGA-BPNN) for water-level predictions. *Water*. 2019;11(9):1795. <https://doi.org/10.3390/w11091795>
9. Such F.P., Madhavan V., Conti E., Lehman J., Stanley K.O., Clune J. Deep neuroevolution: Genetic algorithms are a competitive alternative for training deep neural networks for reinforcement learning. arXiv preprint arXiv:1712.06567. 2017. <https://arxiv.org/abs/1712.06567>

10. Shao B., Li M., Zhao Y., Bian G. Nickel price forecast based on the LSTM neural network optimized by the improved PSO algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019;2019(2):1934796. <https://doi.org/10.1155/2019/1934796>
11. Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms. arXiv preprint arXiv:1609.04747. 2016. <https://arxiv.org/abs/1609.04747>
12. Куликов А.А. Структура локального детектора модели репринта объекта на изображении. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):7–13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-7-13>
[Kulikov A.A. The structure of the local detector of the reprint model of the object in the image. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):7–13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-7-13>]
13. Dean J., Corrado G.S., Monga R., Chen K., Devin M., Le Q.V., Mao M.Z., Ranzato M.A., Senior A., Tucker P., Yang K., Ng A.Y. Large scale distributed deep networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012;25:1223–1231.
14. Huang G.B., Zhu Q.Y., Siew C.K. Extreme learning machine: theory and applications. *Neurocomputing*. 2006;70(1–3):489–501. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.126>
15. Rao C.R. Generalized inverse of a matrix and its applications. In: *Proceedings of the Sixth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. 1972. V. 1. *Theory of Statistics*. 1972:601–620. <https://doi.org/10.1525/9780520325883-032>
16. Cai W., Yang J., Yu Y., Song Y., Zhou T., Qin J. PSO-ELM: A hybrid learning model for short-term traffic flow forecasting. *IEEE Access*. 2020;8:6505–6514. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963784>
17. Liu Y., Loh H.T., Tor S.B. Comparison of extreme learning machine with support vector machine for text classification. In: *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems. Innovations in Applied Artificial Intelligence*. 2005;3533:390–399. http://doi.org/10.1007/11504894_55
18. Li G.X. Application of extreme learning machine algorithm in the regression fitting. In: *2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI)*. 2016:419–422. <https://doi.org/10.1109/ISAI.2016.0095>
19. Song S., Wang Y., Lin X., Huang Q. Study on GA-based training algorithm for extreme learning machine. In: *2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. IEEE*. 2015;2:132–135. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2015.156>
20. Никонов В.В., Горчаков А.В. Тренировка моделей машинного обучения с использованием современных средств контейнеризации и облачной инфраструктуры. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2021;6:33–43. <https://doi.org/10.25791/asu.6.2021.1288>
- [Nikonov V.V., Gorchakov A.V. Train machine learning models using modern containerization and cloud Infrastructure. *Промышленные АСУ и контроллеры = Industrial Automated Control Systems and Controllers*. 2021;6:33–43 (in Russ.). <https://doi.org/10.25791/asu.6.2021.1288>]
21. Ereemeev A.V. A genetic algorithm with tournament selection as a local search method. *J. Appl. Ind. Math.* 2012;6(3):286–294. <https://doi.org/10.1134/S1990478912030039>
22. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*. 1995;4:1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
23. Bastos Filho C.J.A., de Lima Neto F.B., Lins A.J.C.C., Nascimento A.I.S., Lima M.P. A novel search algorithm based on fish school behavior. In: *2008 IEEE Int. Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2008:2646–2651. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811695>
24. Demidova L.A., Gorchakov A.V. A study of chaotic maps producing symmetric distributions in the fish school search optimization algorithm with exponential step decay. *Symmetry*. 2020;12(5):784. <https://doi.org/10.3390/sym12050784>
25. Cao W., Gao J., Ming Zh., Cai Sh. Some tricks in parameter selection for extreme learning machine. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017;261(1):012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/261/1/012002>
26. Dos Santos W., Barbosa V., de Souza R., Ribeiro R., Feitosa A., Silva V., Ribeiro D., Covello de Freitas R., Lima M., Soares N. Image reconstruction of electrical impedance tomography using fish school search and differential evolution. In: *Critical Developments and Applications of Swarm Intelligence*. IGI Global; 2018. P. 301–338. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5134-8.ch012>
27. Demidova L.A., Gorchakov A.V. Application of chaotic Fish School Search optimization algorithm with exponential step decay in neural network loss function optimization. *Procedia Computer Science*. 2021;186(6):352–359. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.156>
28. Harrison D. Jr., Rubinfeld D.L. Hedonic housing prices and the demand for clean air. *J. Environ. Econ. Manag.* 1978;5(1):81–102. [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(78\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0095-0696(78)90006-2)
29. Kibler D., Aha D.W., Albert M.K. Instance-based prediction of real-valued attributes. *Comput. Intell.* 1989;5(2):51–57. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8640.1989.tb00315.x>
30. Li H., Xu Z., Taylor G., Studer C., Goldstein T. Visualizing the loss landscape of neural nets. In: *NIPS'18: Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems*. 2018:6391–6401. <https://arxiv.org/abs/1712.09913v3>
31. Dai B., Gu C., Zhao E., Zhu K., Cao W., Qin X. Improved online sequential extreme learning machine for identifying crack behavior in concrete dam. *Adv. Struct. Eng.* 2019;22(2):402–412. <https://doi.org/10.1177/1369433218788635>

Об авторах

Демидова Лилия Анатольевна, д.т.н., профессор, профессор кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: demidova.liliya@gmail.com. Scopus Author ID 56406258800, ResearcherID R-6077-2016. <https://orcid.org/0000-0003-4516-3746>

Горчаков Артём Владимирович, аспирант кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: worldbeater-dev@yandex.ru. Scopus Author ID 57215001290, ResearcherID ABC-8911-2021. <https://orcid.org/0000-0003-1977-8165>

About the authors

Liliya A. Demidova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor, ERP Systems Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: demidova.liliya@gmail.com. Scopus Author ID 56406258800, ResearcherID R-6077-2016. <https://orcid.org/0000-0003-4516-3746>

Artyom V. Gorchakov, Postgraduate Student, ERP Systems Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: worldbeater-dev@yandex.ru. Scopus Author ID 57215001290, ResearcherID ABC-8911-2021. <https://orcid.org/0000-0003-1977-8165>

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств.
Управление в организационных системах
Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries.
Management in organizational systems

УДК 330.354
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-75-86>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Особенности оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов

И.А. Мандыч[@], А.В. Быкова, О.Б. Гейман

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Создание высокотехнологичных проектов является одним из главных этапов перехода к инновационной экономике, что объясняется интенсивным развитием процессов глобализации в экономической системе нашей страны. Высокотехнологичные проекты обладают меньшей доходностью по сравнению с венчурными проектами и более высокой вероятностью коммерческого успеха. На данный момент в России есть шесть направлений программ поддержки высокотехнологичных проектов. Кроме того, на российском рынке активно работает большое количество операторов поддержки таких проектов. Ускорение технологического развития требует активизации инновационной политики и пересмотра «портфеля» ее действующих инструментов. Это, в свою очередь, актуализирует задачу анализа их значимости и востребованности для участников инновационных процессов. Целью статьи является выявление особенностей процесса инвестирования в РФ, определение критериев отбора приоритетных высокотехнологичных проектов и методов их оценки для принятия взвешенных инвестиционных решений.

Методы. При построении моделей оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов использованы экономико-математические методы моделирования, а именно методы нелинейного и динамического программирования.

Результаты. В рамках статьи проанализированы общие принципы и подходы к методам оценки эффективности проекта. Представлены модель приоритетов высокотехнологичных проектов и модели (нелинейного программирования расчета дисконтированного срока окупаемости инвестиционных затрат и модернизированного дисконтированного срока окупаемости инвестиционных затрат), позволяющие учесть денежные потоки после истечения срока окупаемости. Показан алгоритм оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов.

Выводы. На сегодняшний день не существует единого алгоритма оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов. Тем не менее, комплексное применение предложенных методов и моделей позволит инвесторам, несмотря на сложность проектного финансирования инновационных разработок, принимать обоснованные инвестиционные решения.

Ключевые слова: высокотехнологичные проекты, инновационные проекты, государственная поддержка, оценка финансово-экономической эффективности проекта, методы оценки, финансирование проекта

• Поступила: 01.03.2021 • Доработана: 15.10.2021 • Принята к опубликованию: 28.02.2022

Для цитирования: Мандыч И.А., Быкова А.В., Гейман О.Б. Особенности оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):75–86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-75-86>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Features of assessing the investment attractiveness of high-tech projects

Irina A. Mandych [®], Anna V. Bykova, Olga B. Gaiman

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The creation of high-tech projects is one of the main stages of the transition to an innovative economy. This can further be explained by the intensive development of globalization processes in the economic system of Russia. High-tech projects have lower profitability when compared to venture projects, but a higher probability of commercial success. In Russia, there are currently six areas of support programs for high-tech projects. Moreover, there are a large number of operators supporting high-tech projects actively working in the Russian market. The acceleration of the technological development requires an intensification of innovation policy and a revision of the portfolio of its acting instruments. In turn, this makes the matter of analyzing their significance and relevance for participants in innovation processes more pertinent. The purpose of this work is to identify features of the investment process in the Russian Federation, and determine criteria for selecting priority high-tech projects and methods of evaluating high-tech projects, in the aim of making informed investment decisions.

Methods. Models for assessing the investment attractiveness of high-tech projects were constructed using economic and mathematical modeling methods, in particular, nonlinear and dynamic programming methods.

Results. The general principles and approaches to methods of evaluating the efficiency were analyzed. A model of the priorities of high-tech projects was presented. Models which take into account cash flows after the expiration of the payback period were also considered (by means of the nonlinear programming of calculation of the discounted payback period of investment costs and the modernized discounted payback period of investment costs). An algorithm for assessing the investment attractiveness of high-tech projects was demonstrated.

Conclusions. To date, there has been no single algorithm for assessing the investment attractiveness of high-tech projects. However, the integrated application of the methods and models proposed in this work will allow investors to make informed investment decisions despite the complexity of project financing in innovative developments.

Keywords: high-tech projects, innovative projects, government support, evaluation of the financial and economic efficiency of the project, evaluation methods, project financing

• Submitted: 01.03.2021 • Revised: 15.10.2021 • Accepted: 28.02.2022

For citation: Mandych I.A., Bykova A.V., Gaiman O.B. Features of assessing the investment attractiveness of high-tech projects. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):75–86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-75-86>

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

Создание высокотехнологичных проектов является одним из главных этапов перехода к инновационной экономике, что объясняется интенсивным развитием процессов глобализации в экономической системе нашей страны. Высокотехнологичные проекты обладают меньшей доходностью по сравнению с венчурными проектами и более высокой вероятностью коммерческого успеха.

На данный момент на российском рынке активно работает большое количество операторов поддержки

высокотехнологичных проектов (рис. 1). Ускорение технологического развития требует активизации инновационной политики и пересмотра «портфеля» ее действующих инструментов. Это, в свою очередь, актуализирует задачу анализа их значимости и востребованности для участников инновационных процессов.

Целью статьи является выявление особенностей процесса инвестирования в Российской Федерации, определение критериев отбора приоритетных высокотехнологичных проектов и методов их оценки для принятия взвешенных инвестиционных решений.

В рамках статьи предлагается решить ряд задач: проанализировать общие принципы и подходы к методам оценки эффективности проекта; предложить модель приоритетов высокотехнологических проектов, представить модель, учитывающую денежные потоки после истечения срока окупаемости, и алгоритм экономической оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологических проектов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ИНВЕСТИРОВАНИЯ В РОССИИ

Решая поставленные задачи, необходимо отметить, что важнейшая составляющая высокотехнологических проектов – это новейшие наукоемкие технологии. На текущий момент ключевыми отраслями, которые обеспечивают устойчивый рост экономической системы России, становятся секторы экономики, применяющие наукоемкие технологии [1]. Ориентация экономической системы на инновационную деятельность – это одна из движущих сил социально-экономического развития и формирования конкурентоспособности национальной экономики.

Привлечение российских инвестиций в отечественную промышленность становится первоочередной задачей [2]. Программы мер поддержки высокотехнологических проектов включают в себя¹:

- поддержку малых инновационных предприятий;
- поддержку пилотных проектов внедрения отечественных цифровых решений;
- поддержку проектов по внедрению отечественных ИТ-решений;
- поддержку проектов по разработке и доработке отечественного программного обеспечения;
- промышленные разработки;
- льготное кредитование компаний.

В рамках федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика»² действует комплексная система мер государственной поддержки проектов по разработке

¹ Навигатор мер поддержки. Федеральный проект «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика». <https://digital.ac.gov.ru/support/>, дата обращения 01.12.2020. [Navigator of Support Measures. Federal Project “Digital Technologies” of National Program “Digital Economy.” URL: <https://digital.ac.gov.ru/support/>. Accessed December 1, 2020 (in Russ.).]

² Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». URL: <http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cN-Lo6gczMkPF.pdf>, дата обращения: 05.12.2020. [Passport of National Program “Digital Economy of Russian Federation.” URL: <http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cN-Lo6gczMkPF.pdf>. Accessed December 5, 2020 (in Russ.).]

и внедрению отечественных цифровых продуктов, сервисов и платформенных решений. Портал «Меры поддержки цифровых инициатив»³ специально был создан для информационной поддержки предприятий по реализации данной программы.

Фонд развития промышленности (ФРП) предлагает 10 программ льготного финансирования проектов, суммы займов составляют от 5 до 750 млн руб., процентная ставка варьируется от 1% до 5%. За 2015–2019 гг. из средств ФРП профинансировано 27 республиканских проектов на сумму более 6 млрд руб.

В России с 2016 года под патронажем Минэкономразвития РФ реализован проект «Поддержка частных высокотехнологических компаний-лидеров» («Национальные чемпионы»)⁴, который создает условия, необходимые отечественным частным высокотехнологическим экспортно-ориентированным компаниям-лидерам. Этот проект позволяет сформировать транснациональные компании российского базирования.

Для участия в проекте отбираются компании из базы победителей рейтинга «ТехУспех»⁵. Ежегодная выручка компаний проекта варьируется от 400 млн руб. до 20 млрд руб. Компании специализируются в таких сегментах, как фармацевтика, производство медицинского оборудования, машиностроение, электроника и приборостроение, новые материалы, информационные технологии и телекоммуникации, химическая промышленность, промышленная автоматизация⁶.

³ Меры поддержки цифровых инициатив. <https://e-digital.tatar/>, дата обращения: 05.12.2020. [Support Measures for Digital Initiatives. URL: <https://e-digital.tatar/>. Accessed December 5, 2020 (in Russ.).]

⁴ Национальные чемпионы. Приоритетный проект Минэкономразвития России «Поддержка частных высокотехнологических компаний-лидеров». URL: <http://national-champions.ru/>, дата обращения: 07.12.2020. [National Champions. Priority Project of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation “Support for the Leading Private High-Tech Companies.” URL: <http://national-champions.ru/>. Accessed December 7, 2020 (in Russ.).]

⁵ ТехУспех. Национальный рейтинг российских быстрорастущих технологических компаний. URL: <http://ratingtechup.ru/>, дата обращения: 07.12.2020. [TekhUspek. National Rating of Russian Fast-Growing Technology Companies. URL: <http://ratingtechup.ru/>. Accessed December 7, 2020 (in Russ.).]

⁶ Поддержка частных высокотехнологических компаний-лидеров. URL: https://www.economy.gov.ru/material/departments/d01/razvitie_sistemy_gosudarstvennoy_podderzhki_innovaciy_v_subektah_nacionalnye_chempiony/, дата обращения: 07.12.2020. [Support for the Leading Private High-Tech Companies. URL: https://www.economy.gov.ru/material/departments/d01/razvitie_sistemy_gosudarstvennoy_podderzhki_innovaciy_v_subektah_nacionalnye_chempiony/. Accessed December 7, 2020 (in Russ.).]

| Наименование мероприятия | Оператор программы (организатор конкурса), источник финансирования и тип мероприятия |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рефинансирование текущих кредитов на капитальные вложения инвестиционных проектов в моногородах | Фонд развития моногородов (займ), Корпорация малого и среднего предпринимательства (МСП) (гарантия), гарантийный фонд (гарантия), Правительство РФ (компенсация разницы % ставки). Предоставляется льготный займ малому и среднему, крупному бизнесу, не связанному с деятельностью градообразующих предприятий (ГрОП) – 0%, 5%, 5% годовых |
| Субсидия (софинансирование затрат) на создание и развитие промышленных (индустриальных) парков | Минэкономразвития России в рамках Национального проекта «Развитие МСП и предпринимательской инициативы» ¹ . ПП РФ № 2489 от 25 декабря 2021 г. ² , № 316 от 15 апреля 2014 г. ³ Приказ МЭР РФ № 125 от 14.03.2019 г. ⁴ , № 67 от 14 февраля 2018 г. ⁵ Предоставляется субсидия (целевое бюджетное софинансирование) Минэкономразвития РФ |
| Софинансирование затрат муниципалитета на дооснащение коммунальной, дорожной и инженерной инфраструктуры аккредитованных промышленных парков и промышленных площадок | Министерство экономики РТ. Предоставляется субсидия (целевое бюджетное софинансирование) муниципалитету |
| Субсидирование % ставки по целевым кредитам малому и среднему бизнесу (МСБ) в приоритетных отраслях, резидентам промышленных площадок (индустриальных парков) | Фонд финансовой поддержки РТ, Министерство экономики РТ. Компенсация части % ставки (до 15% пунктов) по кредитам МСБ в приоритетных отраслях, резидентам промышленных площадок (индустриальных парков) |
| Налоговые льготы приоритетным направлениям научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок | Налоговый кодекс РФ. Снижение облагаемой базы налога на прибыль на сумму научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок с коэффициентом 1.5 к размеру фактических затрат |
| Конкурс «РАЗВИТИЕ-СОПР» (для социально ориентированных проектов) | ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере». Грант на НИОКР до 10 млн руб. для социально ориентированных проектов |
| Льготные займы для социальных предпринимателей от Фонда финансовой поддержки Татарстан (РТ) | Фонд поддержки предпринимательства РТ (Министерство экономики РТ). Предоставляется льготный микрозайм до 5 млн руб. под 5% для социальных предпринимателей |
| Льготы по налогам резидентам территорий опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации (ТОСЭР) Набережные Челны, Менделеевск | Министерство экономики РТ, Исполком муниципального образования. Предоставляются льготы по налогу на прибыль, имущество, землю и иные преференции резидентам ТОСЭР (включена поддержка ИТ-компаний как резидентов ТОСЭР) |
| Льготные (0% или 5%) займы бизнесу моногородов | ВЭБ.РФ – Фонд развития моногородов (займ), корпорация МСП (гарантия). Предоставляется льготный займ малому и среднему, крупному бизнесу, не связанному с деятельностью ГрОП – 0% или 5% годовых |
| Льготные кредиты МСБ от Федеральной корпорации развития малого и среднего предпринимательства | Федеральная корпорация развития малого бизнеса и Минэкономразвития РФ. Предоставляется льготный кредит МСБ в приоритетных отраслях 8.5% годовых (через банки-партнеры) с субсидированием (компенсацией) банкам выпадающих доходов; бизнесу в приоритетных отраслях – 9.6% годовых; иному МСБ – 10.6% годовых (через банки-партнеры) |

Рис. 1. Программы государственной поддержки высокотехнологичных проектов (лист 1)

- ¹ Паспорт национального проекта «Малое и среднее предпринимательство и поддержка индивидуальной предпринимательской инициативы». URL: <http://static.government.ru/media/files/qH8voRLuhAVWSJhS8XYbZBsAvcs8A5t.pdf>, дата обращения: 26.01.2022. [Passport of National Project "Small and Medium-Sized Enterprises and Support for Individual Entrepreneurial Initiative." URL: <http://static.government.ru/media/files/qH8voRLuhAVWSJhS8XYbZBsAvcs8A5t.pdf>. Accessed January 26, 2022 (in Russ.).]
- ² Постановление Правительства РФ № 2489 от 25.12.2021. «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Экономическое развитие и инновационная экономика» и признании утратившими силу некоторых положений некоторых актов Правительства Российской Федерации». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112300075>, дата обращения: 26.01.2022. [Regulation of the Government of the Russian Federation No. 2489 of December 25, 2021, "On the Amendments to the State Program of the Russian Federation 'Economic Development and Innovative Economy' and the Annulment of Certain Acts and Individual Provisions of Certain Acts of the Government of the Russian Federation." URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112300075>. Accessed January 26, 2022 (in Russ.).]
- ³ Постановление Правительства РФ № 316 от 15.04.2014. «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Экономическое развитие и инновационная экономика». URL: <https://base.garant.ru/70644224/>, дата обращения: 26.01.2022. [Regulation of the Government of the Russian Federation No. 316 of April 15, 2014, "On the Approval of the State Program of the Russian Federation 'Economic Development and Innovative Economy,'" <https://base.garant.ru/70644224/>. Accessed January 26, 2022 (in Russ.).]
- ⁴ Минэкономразвития России № 125 от 14.03.2019. «Об утверждении Требований к реализации мероприятий, осуществляемых субъектами Российской Федерации, бюджетам которых предоставляются субсидии на государственную поддержку малого и среднего предпринимательства в субъектах Российской Федерации в целях достижения целей, показателей и результатов региональных проектов, обеспечивающих достижение целей, показателей федеральных проектов, входящих в состав национального проекта «Малое и среднее предпринимательство и поддержка индивидуальной предпринимательской инициативы», и требований к организациям, образующим инфраструктуру поддержки субъектов малого и среднего предпринимательства». URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/f01d6c61e7595ef12bc1e93f156a95ee/prikaz_125_14032019.pdf, дата обращения: 26.01.2022. [Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation No. 125 of March 14, 2019, "On the Approval of the Requirements for the Implementation of Measures by the Subjects of the Russian Federation the Budgets of Which Are Granted Subsidies for the State Support for Small and Medium-Sized Enterprises in the Subjects of the Russian Federation in Order to Reach Goals, Metrics, and Results of Regional Projects that Ensure the Achievement of Goals, Metrics, and Results of Federal Projects Being Parts of the National Project 'Small and Medium-Sized Enterprises and Support for Individual Entrepreneurial Initiative,' and the Requirements for Organizations Forming the Infrastructure of the Support for Small and Medium-Sized Enterprises." URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/f01d6c61e7595ef12bc1e93f156a95ee/prikaz_125_14032019.pdf. Accessed January 26, 2022 (in Russ.).]
- ⁵ Приказ Минэкономразвития России № 67 от 14.02.2018. «Об утверждении требований к реализации мероприятий субъектами Российской Федерации, бюджетам которых предоставляются субсидии на государственную поддержку малого и среднего предпринимательства, включая крестьянские (фермерские) хозяйства, а также на реализацию мероприятий по поддержке молодежного предпринимательства, и требований к организациям, образующим инфраструктуру поддержки субъектов малого и среднего предпринимательства». URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=356380>, дата обращения: 26.01.2022. [Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation No. 67 of February 14, 2018, "On the Approval of the Requirements for the Implementation of Measures by the Subjects of the Russian Federation the Budgets of Which Are Granted Subsidies for the State Support for Small and Medium-Sized Enterprises, Including Peasant (Farm) Enterprises, and Also for the Implementation of Support Measures for Youth Entrepreneurship, and the Requirements for Organizations Forming the Infrastructure of the Support for Small and Medium-Sized Enterprises." URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=356380>. Accessed January 26, 2022 (in Russ.).]

Рис. 1. Программы государственной поддержки высокотехнологичных проектов (лист 2)

| Воспользовались хотя бы одной мерой поддержки | Фармацевтика | Компьютеры, приборостроение, телеком | Химическая продукция | Электротехника | Транспортное машиностроение (кроме авиации) | Авиакосмический сектор | Прочее машиностроение | |
|-----------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------|----------------------|----------------|---------------------------------------------|------------------------|-----------------------|------|
| | 51.3 | 42.8 | 40.1 | 30.5 | 65.8 | 51.4 | 49.3 | |
| Меры государственной поддержки инновационной деятельности | 1 | 13.2 | 10.8 | 12.5 | 4.9 | 6.0 | 17.1 | 13.2 |
| | 2 | 13.2 | 6.5 | 12.5 | 6.0 | 13.6 | 23.7 | 7.4 |
| | 3 | 24.7 | 9.5 | 27.1 | 17.1 | 44.2 | 21.2 | 21.4 |
| | 4 | 21.7 | 10.2 | 17.0 | 11.7 | 16.3 | 22.6 | 16.3 |
| | 5 | 9.5 | 8.6 | 17.4 | 8.8 | 20.5 | 10.8 | 13.1 |
| | 6 | 9.2 | 0.0 | 5.1 | 1.7 | 0.0 | 5.2 | 7.9 |
| | 7 | 7.6 | 2.6 | 10.6 | 6.0 | 14.1 | 17.0 | 6.8 |
| | 8 | 12.2 | 4.7 | 15.2 | 6.5 | 30.4 | 11.7 | 9.6 |
| | 9 | 8.9 | 3.9 | 10.0 | 1.9 | 15.0 | 16.4 | 8.4 |
| | 10 | 16.8 | 7.2 | 14.7 | 1.3 | 12.3 | 3.2 | 9.8 |
| | 11 | 13.2 | 3.4 | 13.6 | 4.1 | 33.4 | 9.8 | 14.7 |
| | 12 | 4.6 | 3.0 | 8.0 | 3.6 | 14.3 | 9.8 | 6.0 |
| | 13 | 3.9 | 0.8 | 5.5 | 1.9 | 0.0 | 11.8 | 5.4 |
| | 14 | 6.6 | 2.1 | 10.0 | 5.1 | 8.4 | 27.2 | 9.1 |
| | 15 | 0.0 | 4.7 | 10.0 | 1.9 | 0.0 | 5.3 | 6.5 |
| | 16 | 8.9 | 9.6 | 8.1 | 1.3 | 4.9 | 10.9 | 11.0 |
| | 17 | 21.0 | 9.5 | 21.4 | 11.0 | 32.7 | 27.9 | 18.0 |
| | 18 | 9.9 | 8.7 | 17.7 | 6.3 | 10.8 | 18.5 | 8.7 |

Рис. 2. Удельный вес предприятий, поддерживаемых государством, в %, 2019

Источник: Спрос на инструменты государственной инновационной политики со стороны предприятий высокотехнологичных отраслей. <https://issek.hse.ru/news/293711880.html>, дата обращения: 04.07.2021. [Demand for Instruments of State Innovation Policy from Enterprises of High-Tech Industries, URL: <https://issek.hse.ru/news/293711880.html>. Accessed July 4, 2021 (in Russ.).]

Но не все проекты дают ожидаемый эффект и, в целом, российские предприятия недостаточно вовлечены в инновационные процессы. Лишь компании высокотехнологичных отраслей обрабатывающей промышленности проявляют активность в сфере инноваций, несмотря на то, что именно высокотехнологичные компании должны быть заинтересованы в государственной поддержке. Поддержкой со стороны государства воспользовались около 46% из всех респондентов и около 48% из инновационных компаний.

Процентное соотношение высокотехнологичных предприятий, которые поддерживаются государством, представлено на рис. 2.

Самыми заинтересованным в государственной поддержке стали производители машин и оборудования (транспортное машиностроение). Они являются основными получателями субсидий государственных и федеральных целевых программ инновационной направленности и льготных займов Фонда развития промышленности. Наименьший интерес проявили производители электротехники, компьютеров, предприятия приборостроения и средств телекоммуникаций.

Для более эффективной поддержки технологических стартапов и развития высокотехнологичных отраслей в 2020 году был задан вектор активной

инновационной политики через пересмотр портфеля действующих инструментов⁷. Также новым инструментом развития высоких технологий являются корпоративные венчурные фонды (КВФ). Классический процесс разработки новых продуктов в крупных компаниях становится все более длительным и высокорисковым, поэтому шире начали использоваться альтернативные формы внедрения инноваций через внешние инвестиционные обязательства в технологических альянсах. КВФ является уникальным инструментом по сравнению с независимыми венчурными фондами (НВФ), потому что обычно стремится к продвижению в первую очередь не финансовых, а стратегических целей компании-учредителя. Эти цели связаны с увеличением – прямо или косвенно – продаж и прибыли ее действующего бизнеса с помощью доступа к новым технологиям, ресурсам и рынкам, а не инвестируемого стартапа.

Для высокотехнологичных проектов характерны высокая добавленная стоимость продукта проекта,

⁷ Спрос на инструменты государственной инновационной политики со стороны предприятий высокотехнологичных отраслей. <https://issek.hse.ru/news/293711880.html>, дата обращения: 04.07.2021. [Demand for Instruments of State Innovation Policy from Enterprises of High-Tech Industries, URL: <https://issek.hse.ru/news/293711880.html>. Accessed July 4, 2021 (in Russ.).]

получаемая за счет применения прорывных технологий, достижений науки и техники⁸.

При создании высокотехнологических проектов применяются новейшие достижения и результаты опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ в приоритетных сферах и отраслях экономики. Разработка таких проектов – это дорогостоящий процесс, требующий больших вложений и сопряженный с высокими рисками, поскольку на всех стадиях жизненного цикла для них характерна высокая степень неопределенности.

Вложение все большего объема инвестиционных средств в высокотехнологические отрасли является трендом последних десятилетий, от него зависит качественный рост экономики. Новые технологии становятся драйвером роста национальных экономик и определяют способность государств удерживать на глобальном рынке свою конкурентоспособную позицию [3]. Инвестирование в высокотехнологические проекты – сложное, но в то же время очень перспективное направление, имеющее высокую значимость для общества и государства в целом [4].

Важное значение при выборе высокотехнологического проекта имеют факторы, которые влияют на его приоритеты. Эти факторы могут быть использованы для создания модели приоритетов. Сложность тех или иных факторов можно представить в виде классификации, имеющей в основании финансируемые проекты и проекты, которые находятся на стадии ожидания финансирования. Такая классификация достаточно общая, поэтому целесообразнее использовать градацию проектов по следующим классам: приоритетные, нормальные и фоновые (рис. 3).

Критерии приоритетности проектов иллюстрируются трендами, которые получают стремительное ускорение:

1. Реализация курса на импортозамещение.
2. Выход на зарубежные рынки – экспорт российских технологий и бизнес-моделей.
3. Резкое возрастание числа людей, работающих на «удаленке». Этот фактор спровоцировал развитие сервисов командной работы, видеоконференцсвязи, облачного хранения и кибербезопасности, производства компьютеров, электронных и оптических изделий.

⁸ Указ Президента Российской Федерации № 642 от 01.12.2016. «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». URL: <http://government.ru/docs/all/109256/>, дата обращения: 26.01.2022. [Decree of the President of the Russian Federation No. 642 of December 1, 2016, “On the Strategy of the Science and Technology Development of the Russian Federation.” URL: <http://government.ru/docs/all/109256/>. Accessed January 26, 2022 (in Russ.).]

4. Повышение важности развития инфраструктурных проектов в здравоохранении, обусловленных развитием рынка медицинской реабилитации в постпандемный период.
5. Технологические решения, специально разработанные для государственных целей (ГосТех). Драйверами введения инноваций в госсекторе являются такие задачи как цифровизация государственных услуг и цифровизация бизнес-процессов в самих государственных структурах.



Рис. 3. Модель приоритетов высокотехнологических проектов

Возможно построение и более сложных моделей приоритетов с использованием различных математических методов [5]. Однако прослеживается противоречие: с одной стороны, фонды, основная задача которых – поиск перспективных проектов и которым необходимо инвестировать, не хотят широко распространять информацию о себе, т.к. считают, что за инвестициями должны обращаться сами разработчики. Разработчики проектов, в свою очередь, очень часто считают, что инвесторы недоступны, поэтому не обращаются к ним за мерами поддержки.

Основными финансовыми инструментами государственных и частных программ финансирования являются: гранты, субсидии, субсидированные займы и кредиты, инвестиционные займы, субсидированный лизинг, государственные контракты на проведение исследований, синдицированные сделки, конвертируемые займы и венчурное финансирование.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Общие принципы и подходы к методам оценки эффективности проекта представлены на рис. 4.



Рис. 4. Общие принципы и подходы к методам оценки эффективности проекта

Представленные на рис. 4 общие принципы и подходы к методам оценки эффективности проекта могут быть использованы инвесторами как по отдельности, так и совместно. Их выбор зависит от конкурентных характеристик проекта/продукта и от факторов, воздействующих на инновационный проект [6].

Эффективность проекта – это такая категория, которая отражает соответствие проекта поставленным целям и интересам стейкхолдеров [7]. Что касается финансово-экономической эффективности, то это отношение финансово-экономических результатов деятельности команды проекта к финансово-экономическим затратам проекта. В зависимости от того, производится ли дисконтирование денежных средств во времени, методы оценивания делятся на две большие группы: статистические и динамические (рис. 5).

Чаще инвесторы применяют динамические методы оценки эффективности, потому что они имеют большее преимущество, позволяя учесть такой значимый фактор изменения стоимости денежных средств, как время. Такие методы оценки эффективности инновационных проектов лучше отвечают современным требованиям, поскольку они основаны на модели дисконтированного денежного потока⁹. Тем не менее, при инвестировании в краткосрочные проекты, в которых изменения во времени принимают статистически незначительными, часто

⁹ Оценка эффективности инвестиционного проекта: методы и рекомендации. <https://www.business.ru/article/1829-otsenka-effektivnosti-investitsionnogo-proekta>, дата обращения: 04.07.2021. [Evaluation of Efficiency of Investment Project: Methods and Recommendations. URL: <https://www.business.ru/article/1829-otsenka-effektivnosti-investitsionnogo-proekta>. Accessed July 4, 2021 (in Russ.).]



Рис. 5. Основные методы оценки эффективности проекта

применяют простые методы оценки финансово-экономической эффективности несмотря на то, что они не позволяют учесть в расчетах множество значимых для проекта факторов [8].

Представленная ниже модель позволяет учесть денежные потоки после истечения срока окупаемости – это крайне значимый фактор для принятия решения о целесообразности инвестирования в высокотехнологичный проект.

Первая из представленных моделей (рис. 6) – это модель нелинейного программирования расчета дисконтированного срока окупаемости инвестиционных затрат. Она позволяет определить такой момент времени, когда получаемые чистые доходы по высокотехнологичному проекту при их приведении к началу его реализации будут равны инвестиционным затратам. Параметры этой модели также приведены на рис. 6 [9].

Воспользовавшись надстройкой Microsoft Excel «Поиск решения» можно достаточно просто просчитать представленную модель. Данная надстройка является очень хорошим средством поиска решений оптимизационных задач.

Дальнейшее реинвестирование в этом расчете не учитывается, но если известны условия реинвестирования полученных чистых доходов, то можно определить модернизированный дисконтированный срок окупаемости.

Вторая модель (рис. 7) – это модель нелинейного программирования расчета модернизированного

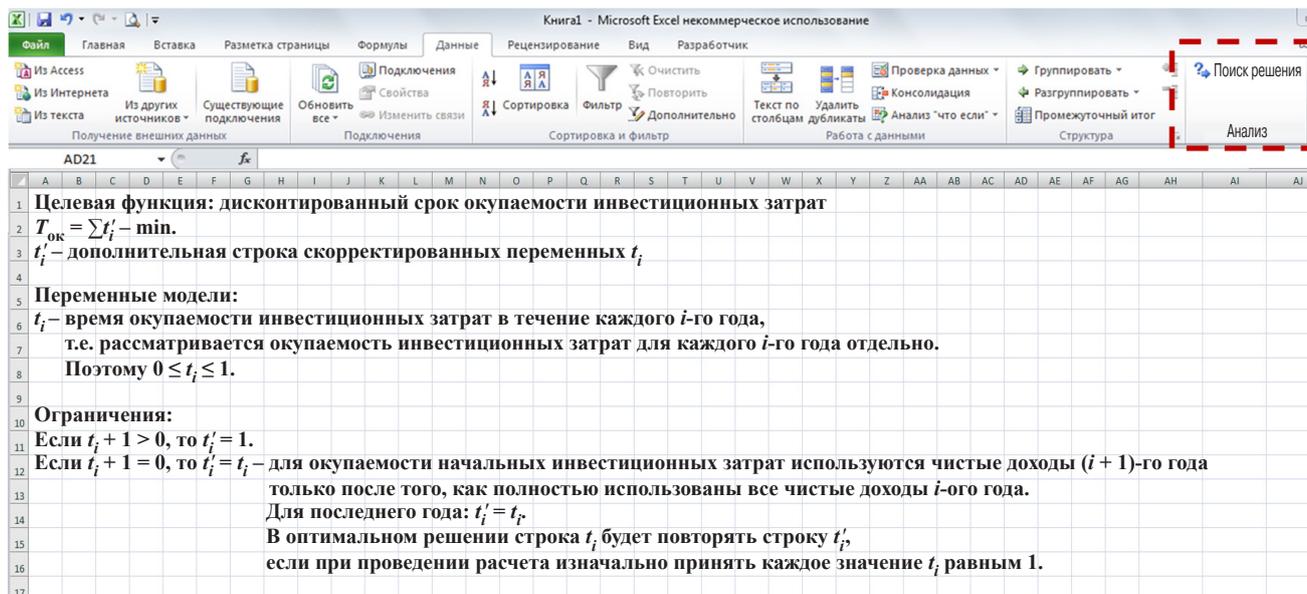


Рис. 6. Параметры первой модели оценки финансово-экономической эффективности высокотехнологичного проекта

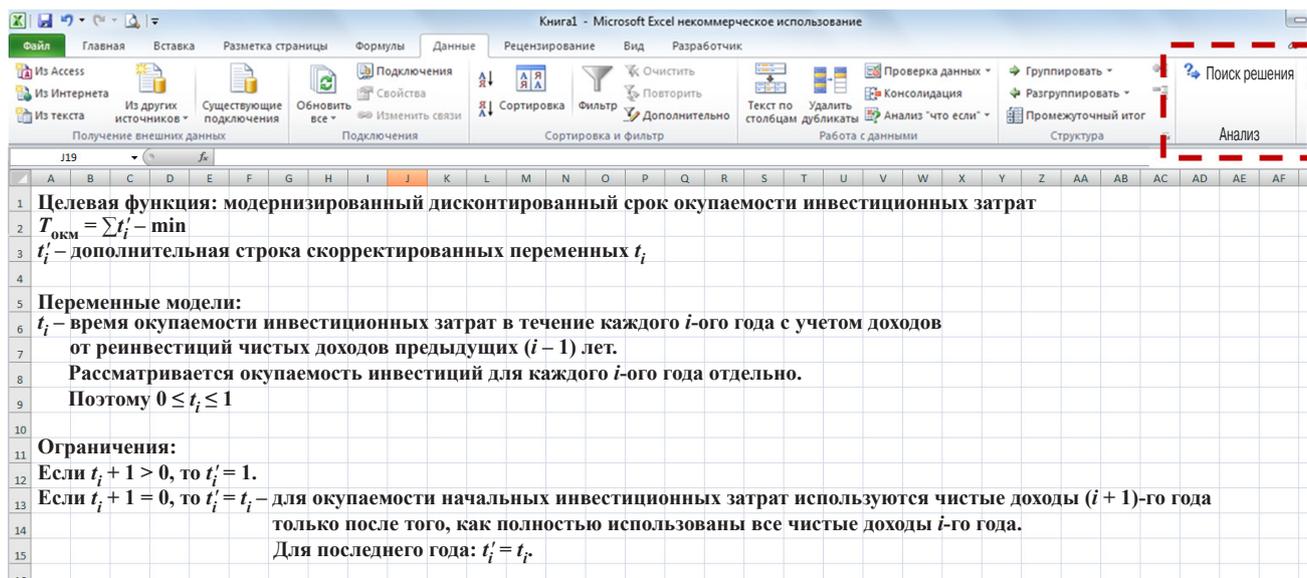


Рис. 7. Параметры второй модели оценки финансово-экономической эффективности высокотехнологичного проекта

дисконтированного срока окупаемости инвестиционных затрат. Она позволяет определить момент времени, при котором чистые и дополнительные доходы, полученные при реинвестировании в высокотехнологичный проект, при их приведении к началу реализации этого проекта будут равны начальным инвестиционным затратам [10].

Представленные методы и модели оценки эффективности высокотехнологичных проектов позволяют инвесторам принять обоснованное решение. Но при этом, для более качественного анализа рекомендуется проводить не изолированное исследование только финансовой составляющей проекта, а более обширное, учитывающее область реализации высокотехнологичного проекта.

В качестве рекомендации также предлагается следующий алгоритм экономической оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов (рис. 8).

Алгоритм экономической оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов предполагает реализацию двух основных этапов:

- отбор приоритетных высокотехнологичных проектов и их обоснование по выбранным критериям;
- оценка экономической эффективности высокотехнологичных проектов на основе финансово-экономических методов, позволяющих учесть максимально возможное количество значимых для проекта факторов.



Рис. 8. Алгоритм экономической оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологичных проектов

На первом этапе необходимо определиться с критериями отбора приоритетных высокотехнологичных проектов. Основные критерии – это стоимость проекта, соотношение объемов инвестиций, направленных на реализацию проекта и инновационность самого проекта (осуществление технологических, маркетинговых или организационных инноваций). Под последним будем понимать величину вероятности коммерческого успеха (ожидаемая добавленная стоимость продукта проекта).

На втором этапе необходимо оценить проект, используя финансово-экономические методы оценки, т.е. использовать модели, позволяющие учесть максимально возможное количество значимых для проекта факторов:

- модель нелинейного программирования расчета дисконтированного срока окупаемости инвестиционных затрат;
- модель нелинейного программирования расчета модернизированного дисконтированного срока окупаемости инвестиционных затрат.

Важно понимать, что сроки принятия решения о возможности инвестировании крайне малы, основная стадия, на которой инвесторы берутся инвестировать – это стадия Seed, на которой инвестиции нужны для доведения продукта до требований рынка (размер инвестиций здесь может достигать 10 млн руб.). Следовательно, алгоритм оценки должен быть достаточно простым, а методы оценки эффективны, т.е. должны учитывать максимально



Рис. 9. Раунды финансирования

Источник: Морозов А. Имея 10–15 млн рублей первоначального капитала, привлечь ещё порядка 600 миллионов на hardware-проект – не проблема. Денег в стране много, особенно для промышленности. URL: https://json.tv/ict_news_read/aleksandr-morozov-akselerator-territoriya-imeya-10-15-mln-rublej-pervonachalnogo-kapitala-privlech-esche-poryadka-600-millionov-na-hardware-proekt-dlya-promyshlennosti-ne-problema-deneg-v-strane-ochen-mnogo-20171228014631, дата обращения: 03.02.2022. [Morozov A. Having a startup capital of RUR 10–15 mln, it is no problem to raise about RUR 600 mln more for a hardware project. There is a lot of money in the country, especially for industry. URL: https://json.tv/ict_news_read/aleksandr-morozov-akselerator-territoriya-imeya-10-15-mln-rublej-pervonachalnogo-kapitala-privlech-esche-poryadka-600-millionov-na-hardware-proekt-dlya-promyshlennosti-ne-problema-deneg-v-strane-ochen-mnogo-20171228014631. Accessed February 3, 2022 (in Russ.).]

возможное количество значимых для высокотехнологического проекта факторов.

Основные стадии финансирования высокотехнологических проектов в виде раундов финансирования представлены на рис. 9.

Каждой стадии проекта соответствуют определенные источники финансирования, так, например, на ранних стадиях (Pre-seed) необходимо получение грантов и вложение собственных средств, возможно, потребуется привлечение бизнес-ангелов или создание посевных фондов, на более поздних стадиях – субсидий или конвертируемых займов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектное финансирование в инновационные разработки – это сложный трудозатратный процесс, требующий пристального внимания и кропотливой оценки со стороны инвесторов.

В работе были выявлены особенности процесса инвестирования в РФ, определены критерии отбора приоритетных высокотехнологических проектов и методы их оценки для принятия взвешенных инвестиционных решений.

В рамках статьи были решены следующие задачи: проанализированы общие принципы и подходы к методам оценки эффективности проекта; предложена модель приоритетов высокотехнологических проектов, представлены две модели, учитывающие

денежные потоки после истечения срока окупаемости; показан алгоритм экономической оценки инвестиционной привлекательности высокотехнологических проектов. В целом авторами рассмотрены все инструменты, необходимые инвесторам для принятия решения о целесообразности инвестирования в высокотехнологические проекты.

Вклад авторов

И.А. Мандыч – сбор данных, анализ и интерпретация данных, написание части статьи, анализ научной работы, итоговая переработка статьи.

А.В. Быкова – идея исследования, разработка дизайна исследования, сбор данных, анализ и интерпретация данных, написание части статьи.

О.Б. Гейман – сбор данных, анализ и интерпретация данных, написание части статьи, формализация списка литературы.

Все авторы – окончательное утверждение версии статьи для публикации.

Authors' contribution

I.A. Mandych—data acquisition, analysis, and interpretation, writing the article, the analysis of scientific work, final processing the article.

A.V. Bykova—conception and design of the study, data acquisition, analysis, and interpretation, writing the article.

O.B. Gaiman—data acquisition, analysis, and interpretation, writing the article, formalization of the list of references.

All authors have read and approved the final manuscript for publication.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колегова О.А. Основные понятия высокотехнологического проекта. В сб.: *Современные технологии поддержки принятия решений в экономике*. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2015. С. 80–82. URL: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C79/030.pdf>
2. Коцюбинский В.А., Комаров В.М. *Перспективы развития высокотехнологического сектора*. М.: РАНХиГС; 2015. 65 с.
3. Земцов С.П., Баринаева В.А., Семенова Р.И. Государственная поддержка высоких технологий и инноваций в России. *Инновации*. 2019;3(245):33–44.
4. Зинов В.Г. Индекс специализации по технологическим областям и перспективы технологического лидерства России. *Экономика науки*. 2016;2(2): 96–110.
5. Арчибалд Р.Д. *Управление высокотехнологическими программами и проектами*: пер. с англ. под ред. А.Д. Баженова. М.: Компания АйТи; ДМК Пресс; 2010. 464 с. ISBN 5-98453-002-3 (АйТи); ISBN 978-5-9706-0045-0 (ДМК Пресс).

REFERENCES

1. Kolegova O.A. Basic concepts of a high-tech project. In: *Modern decision support technologies in the economy*. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists. Tomsk: Izd. Tomsk. Politekh. Univ.; 2015. P. 80–82 (in Russ.). Available from URL: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C79/030.pdf>
2. Kotsyubinskiy V.A., Komarov V.M. *Perspektivy razvitiya vysokotekhnologichnogo sektora (Prospects for the Development of the High-Tech Sector)*. Moscow: RANKHiGS; 2015. 65 p. (in Russ.).
3. Zemtsov S.P., Barinova V.A., Semenova R.I. Public support of high technologies and innovations in Russia. *Innovatsii = Innovations*. 2019;3(245):33–44 (in Russ.).
4. Zinov V.G. Index of specialisation according to technological fields and the perspectives of technological leadership of Russia. *Ekonomika nauki = The Economics of Science*. 2016;2(2):96–110 (in Russ.).
5. Archibal'd R.D. *Upravlenie vysokotekhnologichnymi programmami i proektami (Managing High-Technology Programs and Projects)*: transl. from Eng. Moscow: Kompaniya AiTi; DMK Press; 2010. 464 p. (in Russ.). ISBN 5-98453-002-3 (AiTi); ISBN 978-5-9706-0045-0 (DMK Press)

6. Люкманов В.Б., Мандыч И.А. *Управление финансами + eПриложение: тесты. (Бакалавриат): учебное пособие*. М.: КноРус; 2021. 206 с. ISBN 978-5-406-06330-9
7. Галимзянов М.Д. Методики анализа стейкхолдеров проекта. *Молодой ученый*. 2019;35(273):35–37. URL: <https://moluch.ru/archive/273/62188/>
8. Тимченко Т.Н. *Экономическая оценка инвестиций: учебное пособие*. М.: РИОР; 2010. 61 с. ISBN 978-5-369-00554-5. URL: <https://znanium.com/catalog/product/221240>
9. Мандыч И.А., Люкманов В.Б., Кудрявцева И.Г. Современные методы расчета экономических показателей инвестиционных проектов. *Финансовый менеджмент*. 2018;1:60–70.
6. Lyukmanov V.B., Mandych I.A. *Upravlenie finansami + ePrilozhenie: testy. (Bakalavriat): uchebnoe posobie (Financial management)*. Moscow: KnoRus; 2021. 206 p. (in Russ.). ISBN 978-5-406-06330-9
7. Galimzyanov M.D. Project stakeholder analysis methods. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2019;35(273):35–37 (in Russ.). Available from URL: <https://moluch.ru/archive/273/62188/>
8. Timchenko T.N. *Ekonomicheskaya otsenka investitsii (Economic assessment of investments)*. Moscow: RIOR; 2010. 61 p. (in Russ.). ISBN 978-5-369-00554-5. Available from URL: <https://znanium.com/catalog/product/221240>
9. Mandych I.A., Lyukmanov V.B., Kudryavtseva I.G. Modern methods for calculating economic indicators of investment projects. *Finansovyi menedzhment = Financial Management*. 2018;1:60–70 (in Russ.)

Об авторах

Мандыч Ирина Александровна, к.э.н., доцент, доцент кафедры современных технологий управления Института технологий управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mandych@mirea.ru. Scopus Author ID 57204072921, ResearcherID N-4018-2018. <https://orcid.org/0000-0003-2957-6495>

Быкова Анна Викторовна, к.психол.н., доцент, доцент кафедры современных технологий управления Института технологий управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bykova_a@mirea.ru. Scopus Author ID 57204072980, ResearcherID D-5163-2014. <https://orcid.org/0000-0003-2033-6647>

Гейман Ольга Борисовна, к.э.н., доцент кафедры современных технологий управления Института технологий управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: gaiman@mirea.ru. Scopus Author ID 57220833657, ResearcherID ADS-7284-2022. <https://orcid.org/0000-0003-1856-718X>

About the authors

Irina A. Mandych, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Modern Management Technologies, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mandych@mirea.ru. Scopus Author ID 57204072921, ResearcherID N-4018-2018. <https://orcid.org/0000-0003-2957-6495>

Anna V. Bykova, Cand. Sci. (Psychol.), Associate Professor, Department of Modern Management Technologies, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bykova_a@mirea.ru. Scopus Author ID 57204072980, ResearcherID D-5163-2014. <https://orcid.org/0000-0003-2033-6647>

Olga B. Gaiman, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Modern Management Technologies, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: gaiman@mirea.ru. Scopus Author ID 57220833657, ResearcherID ADS-7284-2022. <https://orcid.org/0000-0003-1856-718X>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 001.61
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-87-95>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Определение источников знаний о технологиях микро- и нанoeлектроники

А.А. Шарапов^{1, 2, @}, Е.С. Горнев¹

¹ АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, 124460 Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская область, Долгопрудный, 141701 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: andrey.sharapov@phystech.edu

Резюме

Цели. В течение последних десятилетий разработано множество моделей управления знаниями. Однако использование данных моделей для создания информационной системы в интересах исследовательских предприятий микроэлектроники не представляется возможным, поскольку они не учитывают динамику и характер развития технологий, а также специфику деятельности организаций в разных видах работ по генерации знаний. Цель работы – выявить направления актуальности разработки системы управления знаниями о технологиях микро- и нанoeлектроники, определить и систематизировать источники знаний в данной научно-технической области.

Методы. Использованы метод анализа взаимосвязи бизнес-показателей компаний с последующей визуализацией в виде циклической диаграммы причин, метод анализа заинтересованных сторон.

Результаты. Сформулированы три направления актуальности разработки системы управления знаниями в наукоемкой области технологий микро- и нанoeлектроники – с точки зрения социальных, коммерческих и научно-технических эффектов в соответствующих организациях. К ключевым источникам знаний о технологиях микро- и нанoeлектроники отнесены университеты, институты РАН, отраслевые институты, заказчики, производства и потребители. Обоснована важность рассмотрения цифровых двойников электронных компонент как перспективного источника знаний в данной области.

Выводы. Анализ кривой жизненного цикла технологии на примере области микро- и нанoeлектроники позволяет соотнести отдельные этапы данного жизненного цикла с конкретными видами работ, в ходе выполнения которых происходит выработка новых знаний. В качестве видов работ выделены фундаментальные и прикладные исследования, изучение требований, реализация на производстве и анализ эксплуатации. Для отрасли микроэлектроники на кривой жизненного цикла технологий они соответствуют участкам появления, пика ожиданий, избавления от иллюзий, преодоления недостатков и плато продуктивности.

Ключевые слова: знания, управление знаниями, nanoиндустрия, цифровой двойник

• Поступила: 17.11.2021 • Доработана: 09.12.2021 • Принята к опубликованию: 03.03.2022

Для цитирования: Шарапов А.А., Горнев Е.С. Определение источников знаний о технологиях микро- и нанoeлектроники. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):87–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-87-95>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Identification of knowledge sources for micro- and nanoelectronics technologies

Andrey A. Sharapov^{1, 2, @}, Evgeny S. Gornev¹

¹ *Molecular Electronics Research Institute, Moscow, Zelenograd, 124460 Russia*

² *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow oblast, Dolgoprudny, 141701 Russia*

@ *Corresponding author, e-mail: andrey.sharapov@phystech.edu*

Abstract

Objectives. Over the past few decades, multiple knowledge management models have been developed by many research groups studying the innovation process in companies. However, these knowledge and information management models are rather general, and do not consider the dynamics and variability of technology development. This implies involving specific organizations in different types of knowledge generation activities. The paper aims to reveal the importance of a knowledge management system in micro- and nanoelectronics technologies as well as to identify and systematize the sources of knowledge in the scientific and technical field.

Methods. In this paper, the method for analyzing the relationship between key business indicators of the companies is applied. The results are then represented in a causal loop diagram. The stakeholder analysis method is also used here.

Results. Three relevant trends in developing the knowledge management system for knowledge-intensive enterprises involved in micro- and nanoelectronics technologies are identified with respect to the social, commercial, and scientific and technical aspects in research organizations. The key sources of knowledge on micro- and nanoelectronics technologies include universities, institutions of the Russian Academy of Sciences, industry-specific institutions, customers, manufacturers, and consumers. Also, the authors consider digital twins to be a promising source of knowledge on micro- and nanoelectronics technologies.

Conclusions. The analysis of the technology life cycle curve using the example of micro- and nanoelectronics allows correlating single stages of this life cycle with specific activities during which new knowledge is generated. These activities include fundamental and applied research, requirements management, implementation in manufacturing, and operation analysis. For microelectronics, they correspond to the areas of emergence, peak of inflated expectations, trough of disillusionment, slope of enlightenment, and plateau of productivity on the technology life cycle curve.

Keywords: knowledge, knowledge management, nanoindustry, digital twin

• **Submitted:** 17.11.2021 • **Revised:** 09.12.2021 • **Accepted:** 03.03.2022

For citation: Sharapov A.A., Gornev E.S. Identification of knowledge sources for micro- and nanoelectronics technologies. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):87–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-87-95>

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

Неотъемлемая часть фундаментальных и прикладных изысканий в современных научно-исследовательских организациях – это пополнение и использование общего объема профессиональных знаний. Согласно [1] такие знания можно рассматривать как часть интеллектуального капитала организации, а, следовательно, как предмет управления. В работах [2, 3] приведены некоторые из наиболее известных моделей управления знаниями:

модель Чу принятия решений на основе осмысления информации, модель Хедлунда на основе переноса и трансформации знания, модель индивидуальных и коллективных знаний фон Круга и Рооса и другие. В целом все они основываются на следующем разделении двух типов знаний в зависимости от состояния оформленности (способности быть сохраненными и передаваемыми):

1) формализованные (явные) – находящиеся в конкретной форме. Например, в виде записей на естественном языке, в двоичном коде, в виде

инструкции на языке программирования и др. Явные знания систематизированы, могут быть упакованы в форму услуги (например, онлайн-курсы или программы повышения квалификации) или продукта (пособия, видео, конспекты и др.) и переданы в ходе процесса преподавания;

- 2) неформализованные (неявные), обычно хранящиеся в разуме конкретных людей. Включают в себя динамически изменяемые, подстраивающиеся понимания, коллективные знания, экспертизу в смысле «ноу-хау». Передаются такие знания посредством тренингов и наставничества. Этот тип знаний был предложен Майклом Полани в 1958 г. [4].

Согласно модели SECI (англ. Socialization, Externalization, Combination, and Internalization), предложенной Икудзиро Нонака в 1990 г.¹, знания «перемещаются» по спиралевидному циклу, в котором неявные знания «извлекаются», чтобы стать явными знаниями, а явные знания «переинтернализуются» в неявные знания. Таким образом, информация проходит четыре стадии — социализацию, экстернализацию, комбинацию, интернализацию, и именно в ходе многочисленных переходов между формализованным и неформализованным состоянием рождается новое знание.

Эти определения полностью подходят для использования в контексте управления знаниями в сфере технологий микро- и наноэлектроники. Однако в силу общности ни одна из описанных моделей не может быть напрямую применена для описания процесса пополнения интеллектуального капитала в организациях конкретных наукоемких отраслей, участвующих в многочисленных кооперациях и проектных исследованиях, а также проводящих целый ряд внутренних научно-исследовательских работ. Разработку модельного описания процесса управления знаниями целесообразно начать с определения их источников.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Сопоставляя вышеуказанные модели, можно выделить основные компоненты процесса управления знаниями организаций – сбор (получение), передача (обеспечение доступа и трансфер), применение, защита и хранение [5].

Стоит подчеркнуть, что эти действия играют определяющую роль в эффективности работы предприятий такой наукоемкой отрасли, как микроэлектроника, в которой соединяются наномасштабная

физика, твердотельная электроника, квантовая теория, химия и другие области науки [6]. При этом в ходе изучения российских предприятий, занимающихся разработками в области технологий микро- и наноэлектроники, не обнаружено систем управления знаниями, обладающих полным набором ключевых компонент. В то же время отдельные процессы (например, накопление информации в виде комплектов проектной документации) на протяжении десятилетий успешно реализуются отдельными подразделениями.

Внедрение системного подхода к управлению знаниями в области технологий микро- и наноэлектроники позволит:

- 1) отслеживать направления исследований и развития технологий в области микроэлектроники для корректного позиционирования в отрасли и принятия решений по участию в совместных проектах [7];
- 2) контролировать скорость продвижения исследований на этапе прикладных исследований для того, чтобы не пропустить смену трендов;
- 3) оценивать степень зрелости новых решений с точки зрения возможностей повышения надежности и получения новых функциональных свойств.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Создание, наполнение информационной базы и управление знаниями по технологиям микро- и наноэлектроники актуально для научно-исследовательских предприятий данного направления с точки зрения трех аспектов: социального, коммерческого и научно-технического. Так, за счет обмена информацией, научные результаты, генерируемые исследовательскими подразделениями, с большей вероятностью найдут применение в разработках конструкторских отделов. В то же время проблемы, которые формулируются техническими специалистами в ходе разработки и требуют проведения научных исследований, благодаря единой информационной системе станут известными научным коллективам предприятий. Таким образом, коммуникационно связывая исследователей и разработчиков микроэлектронных технологий, возможно добиться ускорения в решении общих задач всего предприятия, в частности, увеличить объем знаний. Кроме того, накопленные знания обеспечат возможность проводить более детальный анализ как коммерчески доступных продуктов и технологий, так и научных достижений, позволят составить более точную картину доступных на российском и мировом рынке

¹ Management for Knowledge Creation, Tokyo: Nihon Keizai Shimbun-sha, 1990, (in Japanese).

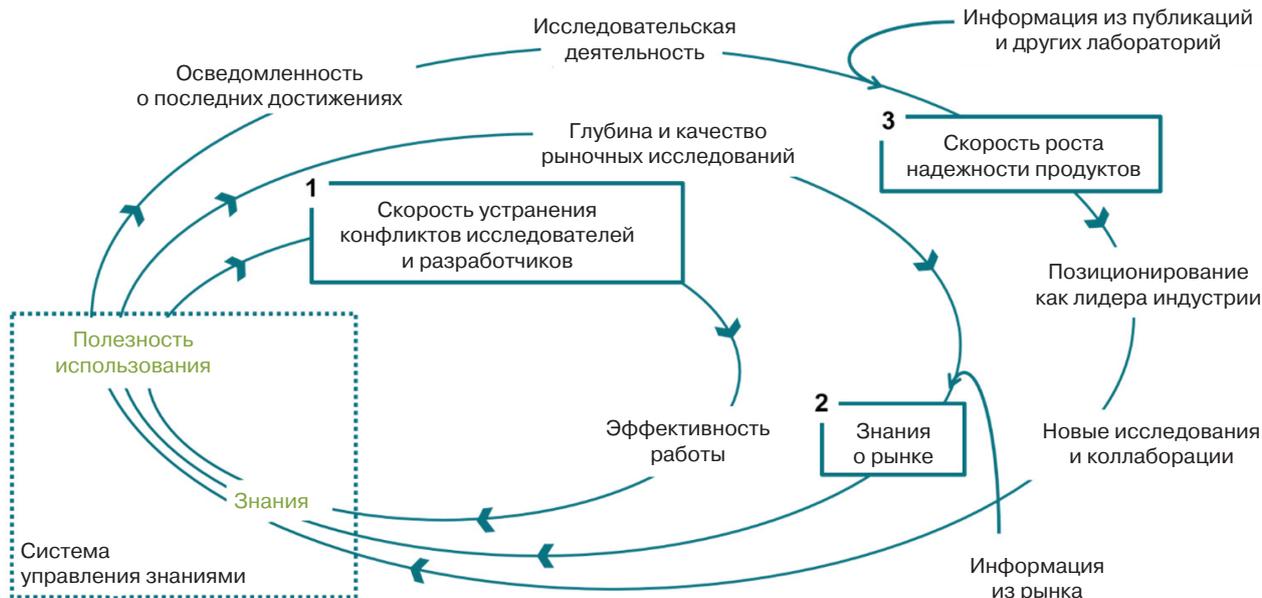


Рис. 1. Циклы положительной обратной связи с точки зрения бизнес-процессов в социальном, коммерческом и научно-техническом аспектах, которые образуются при внедрении корпоративной базы знаний по технологиям микроэлектроники

микроэлектронных технологий. Формально данные направления можно объединить термином «инновационно-технологическая разведка» или «скаутинг». Корректируя направления развития продуктов, а также теоретических и экспериментальных изысканий, в конечном счете можно добиться новых результатов, востребованных на внешних площадках. Решение проблем разработки и производства с помощью дополнительных исследований приведет к повышению надежности изделий за счет улучшения технологий микроэлектроники.

На рис. 1 направления актуальности схематично представлены в виде трех контуров положительной обратной связи – увеличение одного показателя приводит к улучшению следующего при движении по часовой стрелке.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ЗНАНИЙ О МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Используя понятие кривой жизненного цикла технологий, введенное в употребление компанией Гартнер в 1995 г., можно считать, что микро- и нанoeлектроника как совокупности производственных технологий находятся на «плато продуктивности» [8]. Это означает, что знаний, накопленных в этих сферах, достаточно для организации коммерческих микроэлектронных производств. Вместе с тем, открытия в смежных областях (материаловедении, оптике, нанофизике) делают возможными новые улучшения основной технологии микроэлектроники, каждое из которых проходит весь жизненный цикл от появления до широкого внедрения.

На рис. 2 представлено предложение авторов хронологически сопоставить стадии жизненного цикла технологии кривой Гартнера и источников знаний, выявленных в результате классификации контрагентов на рынке технологий микро- и нанoeлектроники по направлениям деятельности.

Накопление знаний происходит на всех стадиях жизненного цикла технологии. При этом после успешного завершения каждой стадии к работам в данной области подключаются новые организации, которые становятся новыми источниками знаний. Для удобства рассмотрения выделим два типа работ, результатом которых может быть выработка новых знаний:

- 1) исследовательские – фундаментальные и прикладные;
- 2) инженерные – работа с требованиями, производство и эксплуатация.

ИСТОЧНИКИ ЗНАНИЙ НА ЭТАПЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первый этап – **фундаментальные** исследования, включающие изучение физических процессов, определение возможностей и допустимых границ. Ключевые участники, выполняющие основную работу по накоплению знаний на данном этапе, – это академические институты, университеты.

В качестве примера физического принципа, в течение десятилетий находящегося на этапе фундаментальных изысканий, можно привести принцип кулоновской блокады на основе двух туннельных переходов. В настоящее время этот принцип пока не



Рис. 2. Кривая жизненного цикла технологии, этапы накопления и источники знаний о технологиях микроэлектроники

привел к появлению в качестве приборов микроэлектроники одноэлектронного транзистора и других нетрадиционных транзисторных структур.

Следующий уровень – **прикладные** исследования, которые заключаются в попытках реализовать в приборах физические принципы, тщательно изученные на предыдущем этапе. На данной стадии по состоянию на 2021 г. находятся мемристоры и схемы памяти на основе сегнетоэлектриков [9, 10], а также активные и пассивные элементы фотонных интегральных схем, изготовленные с применением микроэлектронных технологий [11]. Если технология достигает стадии зрелого исследования, то возможен переход к опытно-конструкторским работам, которые должны привести к созданию опытных образцов.

В частности, для перехода на новые материалы [12] необходимо провести масштабный комплекс испытаний, чтобы убедиться, что при внесении изменений не произошло ухудшения характеристик конечных устройств, в первую очередь, с точки зрения надежности [13, 14]. Это крайне важно для применения в военной сфере [15] и критично для необслуживаемых космических систем, выполненных с помощью технологий микро- и нанoeлектроники [16].

ИСТОЧНИКИ ЗНАНИЙ НА ЭТАПАХ ИНЖЕНЕРНЫХ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ МИКРОСХЕМ

Одним из главных направлений, стимулировавших в 1970-х гг. развитие российской микроэлектроники, была миниатюризация уже разработанных схем путем реализации их в виде микросистемных блоков. Использование интегральных схем (ИС) для заказных систем с заранее сформулированными функциональными требованиями и требованиями по надежности стало очередным шагом на этом пути. С тех пор и по настоящее время микроэлектроника остается элементной базой информатики.

Современные методики проектирования приборов на основе требований включают широкое использование автоматизации. Возможным дополнением к существующим алгоритмам проектирования может стать применение на начальном этапе разработки фундаментального параметрического синтеза, который позволит подбирать более эффективные проектные решения за счет выбора принципа определения параметров внешней среды [17]. Знания о таких принципах являются результатом фундаментальных и прикладных исследований.

С изменяющимися **требованиями к разработке** вычислительной техники связано еще одно направление знаний по технологиям микроэлектроники. Развитие таких направлений, как нейросетевые алгоритмы [18], искусственный интеллект, приводит к появлению процессоров специального назначения, архитектура которых оптимизирована для решения определенного класса вычислительных задач с малым набором команд за счет уменьшения возможностей хранения информации.

Ключевой источник знаний по технологиям связан с их реализацией в рамках конкретных **производств**. В ходе развития отрасли решаются вопросы обеспечения чистоты технологических сред – сначала на уровне частиц на площадь, затем микрочастиц на объем, а теперь актуальным является вопрос устранения молекулярно-воздушных загрязнений. Достигнут большой прогресс в решении проблемы ранних отказов за счет внедрения технологических испытаний и доработок конструкции [19].

Другой источник знаний связан с вопросами, которые появляются на этапе **эксплуатации** уже выпущенных микросхем. Некоторые аспекты относятся к возможностям расширения границ применения и увеличения функционала путем доработки программного обеспечения (ПО). Кроме того, анализируются случаи отказов микросхем, в частности, пробоев, которые выражаются в необратимом изменении свойств систем, вызванном локальными разогревами.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗНАНИЙ

Сравнительно недавняя тенденция в науке и технике – формирование области под названием «системный инжиниринг на основе моделей» (англ. model-based systems engineering, MBSE). В рамках этого направления технологические компании внедряют комплексные исполняемые модели в качестве единого источника новой информации. Конечной целью данного вида системного инжиниринга является создание так называемого цифрового двойника.

Цифровые двойники обеспечат возможность моделирования полупроводниковых приборов и конечных электронных систем как на аппаратном, так и на программном уровне [20]. Особую значимость будет иметь учет условий окружающей среды, оказывающей разнообразное воздействие на оборудование и ПО: влияние внешних электрических и магнитных полей, акустических волн, проникновение высокоэнергетических частиц и т.д. [21]. Моделирование физических процессов в интегральных схемах и микросистемах позволяет оценить влияние различных внутренних и внешних факторов на

соответствующие температурные и электрические параметры, определяющие надежность и помехозащищенность компонентной базы.

По сравнению с моделями системных уровней цифровой двойник полупроводникового компонента отражает поведение системы не только на определенном этапе, а в течение всего жизненного цикла. В него входят следующие этапы: (1) описание концепции, составление технического задания (ТЗ); (2) проработка архитектуры; (3) разработка логики ИС; (4) разработка топологии ИС; (5) верификация; (6) утверждение фотошаблонов; (7) производство фотошаблонов; (8) валидация; (9) разработка маршрутной карты; (10) производство; (11) корпусирование; (12) тестирование; (13) испытания; (14) сертификация; (15) запуск серии; (16) эксплуатация.

Реализация цифрового двойника подразумевает синхронный сбор и анализ данных со всех стадий и от всех участников процесса создания конкретного полупроводникового устройства, начиная с дизайн-центров и заканчивая производственной площадкой и пользователем. Фактически необходимо создание системы управления данными, которые появляются в ходе разработки и технологической подготовки производства, а также процессами появления и преобразования этих данных. В единой системе станет возможным управление проектом разработки, учет сроков, стоимости, ресурсов и метрики качества конечных изделий [22], и, при необходимости, полный мониторинг конкретных эксплуатирующихся компонентов вплоть до момента формирования структур в составе ИС с помощью технологий микро- и нанoeлектроники.

Можно сделать вывод, что цифровые двойники электронных систем как единые источники новой информации могут стать дополнительным источником знаний по технологиям микро- и нанoeлектроники. Однако на текущий момент нет сведений о существовании полноценных цифровых двойников микросхем, поэтому в нашей схеме источников знаний о технологиях микро- и нанoeлектроники такой ресурс отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении подчеркнем, что существующие модели управления знаниями могут успешно использоваться для описания процессов лишь в рамках отдельных наукоемких предприятий. В силу заметного отличия видов исследований в микроэлектронике, реализуемых разными организациями (при этом плотно сотрудничающими для решения общих научно-технических задач), проведенная в данной работе систематизация является полезной. Предложенное разделение агентов, работающих

в области микроэлектроники, представляет собой прототип информационного инструмента, который поможет коллективам, реализующим проекты в данном секторе экономики, определять круг потенциально заинтересованных партнеров в соответствии с этапами развития технологии по кривой жизненного цикла. При необходимости можно уточнять данную схему, добавляя направления исследований и указывая конкретные названия организаций.

Работа с потоками информации из обнаруженных источников знаний о технологиях микро- и наноэлектроники позволит в дальнейшем сформулировать

представления об оптимальной структуре базы знаний на предприятии, а также о средствах доступа, использования и управления содержащимися в ней сведениями. Кроме того, станет возможным определение подхода к отбору найденной в доступных источниках информации для автоматизированного пополнения базы знаний.

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. Надточий Ю.Б., Будович Л.С. Интеллектуальный капитал организации: сущность, структура, подходы к оценке. *Российский технологический журнал*. 2018;6(2):82–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-82-95>
2. Mohajan H.K. The impact of knowledge management models for the development of organizations. *J. Environ. Treat. Tech.* 2017;5(1):12–33.
3. Маринко Г.И. Современные модели и школы в управлении знаниями. *Вестник Московского университета. Серия 21: Управление (государство и общество)*. 2004;2:45–65.
4. Polanyi M. *Personal knowledge: towards a post-critical philosophy*. Chicago: University of Chicago Press; 1958. 464 p.
5. Lytras M.D., Pouloudi A. Project management as a knowledge management primer: the learning infrastructure in knowledge-intensive organizations: projects as knowledge transformations and beyond. *The Learning Organization*. 2003;10(4):237–250. <https://doi.org/10.1108/09696470310476007>
6. Горнев Е.С. Отечественная микроэлектроника: ожидания и перспективы. *Наноиндустрия*. 2018;11(6):392–398. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.6.392.398>
7. Горнев Е.С., Зайцев Н.А., Равилов М.Ф., Романов И.М., Ранчин С.О., Былинкин Д.А. Анализ разработанных зарубежных изделий микросистемной техники. *Микросистемная техника*. 2002;7:6–11.
8. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. *Общая теория технологий и микроэлектроника*. М.: ТЕХНОСФЕРА; 2020. 434 с.
9. Теплов Г.С., Горнев Е.С. Модель на языке Verilog-A многоуровневого биполярного мемристора с учетом девиаций параметров переключения. *Микроэлектроника*. 2019;48(3):163–175. <https://doi.org/10.1134/S0544126919030104>
10. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти. *Нано- и микросистемная техника*. 2015;4(177):60–64.

REFERENCES

1. Nadtochiy Yu.B., Budovich L.S. Intellectual capital of the organization: the essence, structure, approaches to evaluation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(2):82–95 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-82-95>
2. Mohajan H.K. The impact of knowledge management models for the development of organizations. *J. Environ. Treat. Tech.* 2017;5(1):12–33.
3. Marinko G.I. Modern models and schools in knowledge management. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 21: Upravlenie (gosudarstvo i obshchestvo) = Moscow University Bulletin. Series 21. Public Administration*. 2004;2:45–65 (in Russ.)
4. Polanyi M. *Personal knowledge: towards a post-critical philosophy*. Chicago: University of Chicago Press; 1958. 464 p.
5. Lytras M.D., Pouloudi A. Project management as a knowledge management primer: the learning infrastructure in knowledge-intensive organizations: projects as knowledge transformations and beyond. *The Learning Organization*. 2003;10(4):237–250. <https://doi.org/10.1108/09696470310476007>
6. Gornev E.S. National microelectronics: expectations and prospects. *Nanoindustrialiya = Nanoindustry*. 2018;11(6):392–398 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.6.392.398>
7. Gornev E.S., Zaitsev N.A., Ravilov M.F., Romanov I.M., Ranchin S.O., Bylinkin D.A. The analysis of the developed foreign products of microsystem techniques. *Mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2002;7:6–11 (in Russ.)
8. Krasnikov G.Ya., Gornev E.S., Matyushkin I.V. *Obshchaya teoriya tekhnologii i mikroelektronika (General Theory of Technology and Microelectronics)*. Moscow: TEKhNOSFERA; 2020. 434 p. (in Russ.)
9. Teplov G.S., Gornev E.S. Multilevel bipolar memristor model considering deviations of switching parameters in the Verilog-A language. *Russian Microelectronics*. 2019;48(3):131–142. <https://doi.org/10.1134/S1063739719030107> [Original Russian Text: Teplov G.S., Gornev E.S. Multilevel bipolar memristor model considering deviations of switching parameters in the Verilog-A language. *Mikroelektronika*. 2019;48(3):163–175 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0544126919030104>]

11. Sharapov A.A., Shamin E.S., Skuratov I.D., Gornev E.S. Grounds and problem statement for software complex for photolithography optimization for minimization of losses in optical structures of photonic integrated circuits. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;939:012070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012070>
12. Бокарев В.П., Красников Г.Я. Оценка изменения физико-химических свойств наноразмерных кристаллических материалов. *Доклады Академии наук*. 2008;420(2):186–189.
13. Просий А.Д., Ранчин С.О., Шелепин Н.А. Обеспечение качества в современном полупроводниковом производстве. *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2015;4(160):39–43.
14. Соловьев А.В., Селецкий А.В. Недостатки отчетственных расчетно-экспериментальных методик прогнозирования надежности интегральных схем. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2020;1:76–81. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-76-81>
15. Гаврилов С.В., Железников Д.А., Заплетина М.А., Хватов В.М., Чочаев Р.Ж., Эннс В.И. Маршрут топологического синтеза для реконфигурируемых систем на кристалле специального назначения. *Микроэлектроника*. 2019;48(3):211–223. <https://doi.org/10.1134/S0544126919030050>
16. Красников Г.Я., Мещанов В.Д., Шелепин Н.А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4–64 Мбит для космических применений. *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2015;2(158):4–10.
17. Колдаев И.М. Фундаментальный параметрический подход к синтезу электронных систем. *Наноиндустрия*. 2020;S96(1):265–269. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.265.269>
18. Тельминов О.А., Горнев Е.С., Мошкарлова Л.А., Янович С.И., Морозов Е.Н. Оценка возможности применения нейросетевого байесовского подхода к выявлению корреляции между параметрами тестовых элементов для межоперационного контроля технологического процесса и характеристиками формируемой транзисторной структуры. *Наноиндустрия*. 2020;13(S4,99):559–560. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.559.560>
19. Горнев Е.С. Методы обеспечения надежности современных СБИС. Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов. В сб.: *Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов (ММЭЖ–2020)*. Сборник материалов II международной конференции. 19–20 октября 2020 г. М.: МАКС Пресс; 2020. С. 13–21.
20. Тельминов О.А., Горнев Е.С., Черняев Н.В., Янович С.И., Мошкарлова Л.А., Шахманова М.В. Исследование возможности построения цифрового двойника интегральных схем для анализа и прогнозирования их надежности. *Наноиндустрия*. 2021;14(S7,107):694–695. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.694.695>
21. Ильин С.А., Ласточкин О.В., Надин А.С., Новиков А.А., Шипицин Д.С. Конструкторско-технологическая платформа проектирования радиационно-стойких СБИСБ на базе отечественной технологии КМОП 90 нм на основе RHBD методологии. *Наноиндустрия*. 2019;S(89):254–257.
10. Krasnikov G.Ya., Zaitsev N.A., Krasnikov A.G. Current state of development in the nonvolatile memory. *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*. 2015;4(177):60–64 (in Russ.).
11. Sharapov A.A., Shamin E.S., Skuratov I.D., Gornev E.S. Grounds and problem statement for software complex for photolithography optimization for minimization of losses in optical structures of photonic integrated circuits. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;939:012070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012070>
12. Bokarev V.P., Krasnikov G.Ya. Estimation of the change in the physicochemical properties of Nanosized crystalline materials. *Doklady Physical Chemistry*. 2008;420(1):96–99. <https://doi.org/10.1134/S0012501608050047> [Original Russian Text: Bokarev V.P., Krasnikov G.Ya. Estimation of the change in the physicochemical properties of Nanosized crystalline materials. *Doklady Akademii nauk*. 2008;420(2):186–189 (in Russ.).]
13. Prosiy A.D., Ranchin S.O., Shelepin N.A. Quality assurance in modern semiconductor manufacturing. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3: Mikroelektronika = Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*. 2015;4(160):39–43 (in Russ.).
14. Solov'ev A.V., Seletskii A.V. Disadvantages of domestic analytical-experimental methods prediction of integrated circuits reliability. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*. 2020;1:76–81 (in Russ.). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-76-81>
15. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chochaev R.Zh., Enns V.I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. *Russian Microelectronics*. 2019;48(3):176–186. <https://doi.org/10.1134/S1063739719030053> [Original Russian Text: Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chochaev R.Zh., Enns V.I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. *Mikroelektronika*. 2019;48(3):211–223 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0544126919030050>]
16. Krasnikov G.Ya., Meshchanov V.D., Shelepin N.A. Family 4–64 Mbit ROM integrated circuits for space applications. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3: Mikroelektronika = Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*. 2015;2(158):4–10 (in Russ.).
17. Koldaev I.M. The fundamental parametric approach to synthesis of electronic systems. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2020;S96(1):265–269 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.265.269>
18. Tel'minov O.A., Gornev E.S., Moshkarova L.A., Yanovich S.I., Morozov E.N. Evaluation of bayes neural network approach for determining transistor characteristics and operational process control correlation. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2020;13(S4,99):559–560 (in Russ.) <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.559.560>
19. Gornev E.S. Methods for ensuring the reliability of modern ULSI. In: *Mathematical Modeling in Materials Science of Electronic Components ICM3SEC–2020*. October 19–20, 2020, Moscow. Proceedings of the international conference. Moscow: MAKS Press; 2020. P. 13–21 (in Russ.).

22. Шарапов А.А., Баранов Г.В. Сравнительный анализ методик оценки количественных характеристик шероховатости наноразмерных структур. *Труды МФТИ*. 2018;10(2,38):72–79.
20. Tel'minov O.A., Gornev E.S., Chernyaev N.V., Yanovich S.I., Moshkarova L.A., Shakhmanova M.V. Research on the possibility of constructing a digital twin of integrated circuits for analyzing and predicting their reliability. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2021;14(S7,107):694–695 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.694.695>
21. Il'in S.A., Lastochkin O.V., Nadin A.S., Novikov A.A., Shipitsin D.S. Design platform for CMOS RHBD 90 nm technology. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2019;S(89):254–257 (in Russ.).
22. Sharapov A.A., Baranov G.V. Comparative analysis of nanoscale roughness measurement methods. *Trudy MFTI*. 2018;10(2,38):72–79 (in Russ.).

Об авторах

Шарапов Андрей Анатольевич, научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1); аспирант Физтех-школы электроники, фотоники и молекулярной физики и магистрант кафедры системного инжиниринга Высшей школы системного инжиниринга ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: andrey.sharapov@phystech.edu. ResearcherID ABC-7256-2021, <https://orcid.org/0000-0001-9945-3875>

Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, заместитель руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1). E-mail: egornev@niime.ru. Scopus Author ID 6507763230.

About the authors

Andrey A. Sharapov, Research Scientist, Molecular Electronics Research Institute (6/1, ul. Akademika Valieva, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia); Postgraduate Student, Phystech School of Electronics, Photonics and Molecular Physics, and Master Student, Higher School of Systems Engineering, Moscow Institute of Physics and Technology (9, Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia). E-mail: andrey.sharapov@phystech.edu. ResearcherID ABC-7256-2021, <https://orcid.org/0000-0001-9945-3875>

Evgeny S. Gornev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of the Priority Technological Area for Electronic Technologies, Molecular Electronics Research Institute (6/1, ul. Akademika Valieva, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia). E-mail: egornev@niime.ru. Scopus Author ID 6507763230.

Исправления
Erratum

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-96-97>



Исправления к статье
«Методы резервирования данных
для критически важных информационных
систем предприятия»

С.В. Шайтура, П.И. Питкевич

Russian Technological Journal. 2022;10(1):28–34

На с.28 после названия статьи вместо:
С.В. Шайтура^{1, 2, @},
П.И. Питкевич³

следует читать:
С.В. Шайтура^{1, 2, @},
П.И. Питкевич³

На с.28 в нижнем колонтитуле вместо:
© С.В. Шайтура, П.И. Питкевич, 2022

следует читать:
© С.В. Шайтура, П.И. Питкевич, 2022

На с.29 вместо:

Для цитирования: Шайтура С.В., Питкевич П.И.
Методы резервирования данных для критически
важных информационных систем предприя-
тия. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):28–34. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-28-34>

следует читать:

Для цитирования: Шайтура С.В., Питкевич П.И.
Методы резервирования данных для критиче-
ски важных информационных систем предприя-
тия. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):28–34. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-28-34>

На с.29 после названия статьи вместо:
Sergey V. Shaytura^{1, 2, @},
Pavel N. Pitkevich³

следует читать:
Sergey V. Shaytura^{1, 2, @},
Pavel I. Pitkevich³

На с.29 вместо:

For citation: Shaytura S.V., Pitkevich P.N. Data
backup methods for mission-critical information
systems. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):28–34. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-28-34>

следует читать:

For citation: Shaytura S.V., Pitkevich P.I. Data
backup methods for mission-critical information
systems. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):28–34. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-28-34>

В верхних колонтитулах страниц 29, 31, 33
вместо:

Шайтура С.В.,
Питкевич П.И.
следует читать:
Шайтура С.В.,
Питкевич П.И.

В верхних колонтитулах страниц 30, 32, 34
вместо:
Sergey V. Shaytura,
Pavel N. Pitkevich.

следует читать:
Sergey V. Shaytura,
Pavel I. Pitkevich

Оригинальная статья может быть найдена:
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-28-34>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 31.03.2022 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 12.25

Тираж 100 экз. Заказ № 255.

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 March 31, 2022.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 12.25

100 copies. Order No. 255.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

