

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ



Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности

Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Микро- и нанoeлектроника.
Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

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

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества

12+

www.rtg-mirea.ru



10(6) 2022



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, № 6

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 6

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



Russian Technological Journal
2022, том 10, № 6

Дата опубликования 30 ноября 2022 г.

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

Периодичность: один раз в два месяца.

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

Учредитель и издатель:

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

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

Главный редактор:

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

Редакция:

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

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

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

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

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

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 6

Publication date November 30, 2022.

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

Periodicity: bimonthly.

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

Founder and Publisher:

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial staff:

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

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

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

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Банис Юрас Йонович	хабилитированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banyas@ff.vu.lt
Бетелин Владимир Борисович	академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
Боков Алексей Алексеевич	старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Вахрушев Сергей Борисович	д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Гуляев Юрий Васильевич	академик РАН, член Президиума РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Жуков Дмитрий Олегович	д.т.н., профессор, РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Кимель Алексей Вольдемарович	к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Крамаров Сергей Олегович	д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Новиков Дмитрий Александрович	член-корр. РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304 , novikov@ipu.ru
Перно Филипп	профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Романов Михаил Петрович	д.т.н., профессор, директор Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Савиных Виктор Петрович	член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Соболевский Андрей Николаевич	д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113 , sobolevski@iitp.ru
Сюй Ли Да	PhD (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115 , lxu@odu.edu
Харин Юрий Семенович	член-корр. Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Чаплыгин Юрий Александрович	академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
Шпак Василий Викторович	к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

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

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

В.М. Баканов

- 7** Вычислительная сложность построения рациональных планов выполнения программ на заданном поле параллельных вычислителей

A. Dhoot, A.N. Nazarov, I.M. Voronkov

- 20** Genetic programming support vector machine model for a wireless intrusion detection system

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

С.В. Манько, В.М. Лохин, С.А.К. Диане

- 28** Принципы построения и экспериментальные исследования прототипного образца многоагентной робототехнической системы для разбора завалов

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

А.В. Смирнов

- 42** Сравнение алгоритмов многокритериальной оптимизации характеристик радиотехнических устройств

В.П. Бабенко, В.К. Битюков

- 52** Защита аппаратуры с батарейным питанием от ошибочного подключения напряжения обратной полярности

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

В.И. Капустин, И.П. Ли, Н.Е. Кожевникова, Э.Ф. Худайгулова

- 60** Технология синтеза и электронная структура тройных карбонатов бария-стронция-кальция для катодов СВЧ-приборов

Математическое моделирование

А.Б. Самохин

- 70** Методы и эффективные алгоритмы решения многомерных интегральных уравнений

Мировоззренческие основы технологии и общества

О.Г. Савка, М.Н. Гусарова, С.В. Сумина, Я.О. Князев, Д.А. Безруков

- 78** Модель формирования цифровых компетенций при реализации программ высшего образования

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- Valery M. Bakanov*
7 Computational complexity when constructing rational plans for program execution in a given field of parallel computers
- Anshita Dhoot, Alexey N. Nazarov, Ilia M. Voronkov*
20 Genetic programming support vector machine model for a wireless intrusion detection system

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

- Sergey V. Manko, Valery M. Lokhin, Sekou Abdel Kader Diane*
28 Prototype multi-agent robotic debris removal system: principles of development and experimental studies

Modern radio engineering and telecommunication systems

- Alexander V. Smirnov*
42 Comparison of algorithms for multi-objective optimization of radio technical device characteristics
- Valery P. Babenko, Vladimir K. Bityukov*
52 Protection of battery-powered devices against accidental swap of power supply connections

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- Vladimir I. Kapustin, Illarion P. Li, Natalya E. Kozhevnikova, Elvira F. Khudaigulova*
60 Technology of synthesis and electronic structure of triple barium–strontium–calcium carbonates for cathodes of microwave devices

Mathematical modeling

- Alexander B. Samokhin*
70 Methods and effective algorithms for solving multidimensional integral equations

Philosophical foundations of technology and society

- Olga G. Savka, Maria N. Gusarova, Svetlana V. Sumina, Yaroslav O. Knyazev, Denis A. Bezrukov*
78 Model of formation of digital competences in implementing higher education programs

УДК 004.4'2 + 004.51
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-7-19>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Вычислительная сложность построения рациональных планов выполнения программ на заданном поле параллельных вычислителей

В.М. Баканов [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

® Автор для переписки, e-mail: e881e@mail.ru

Резюме

Цели. Построение рациональных планов (расписаний) выполнения параллельных программ (ВПП), вследствие неоднозначности, является сложной задачей. Цель работы – создание методик разработки таких планов и специализированного программного обеспечения для реализации этих методик, полагающихся на внутренние свойства алгоритмов, в первую очередь на свойство внутреннего (скрытого) параллелизма.

Методы. Основными методами при разработке планов ВПП являются построение, анализ и целенаправленное преобразование ярусно-параллельной формы (ЯПФ) информационных графов алгоритмов (ИГА). Преобразование ЯПФ осуществляется путем переноса операторов с яруса на ярус ЯПФ (именно это событие и принято за элементарный шаг при определении вычислительной сложности выполнения сценария). В качестве инструмента преобразования применен метод разработки сценариев преобразования на скриптовом языке программирования Lua. Сценарии создаются на основе эвристического подхода и используют набор API-функций (API – Application Programming Interface) разработанной программной системы, позволяющих всесторонне изучить параметры ИГА и его ЯПФ-представления для последующего построения плана ВПП на заданном поле параллельных вычислителей.

Результаты. Результаты вычислительных экспериментов выявили особенности внутренних свойств алгоритмов, влияющих на эффективность преобразований ЯПФ. Получены сравнительные показатели вычислительной сложности получения планов ВПП и иных параметров (включая плотность кода и др.) при применении различных сценариев преобразования ЯПФ. Итерационный подход к улучшению эвристических методов позволит приблизиться к оптимальным схемам решения целевой задачи.

Выводы. В целом разработанный программный комплекс подтвердил эффективность в исследовании параметров скрытого параллелизма в произвольных алгоритмах и рационального его использования при обработке данных. Подход применения скриптового языка для разработки эвристических методов (сценариев) целенаправленного преобразования форм ИГА показал большую гибкость и прозрачность для исследователя. Целевыми потребителями разработанных методов генерации расписаний параллельного выполнения программ в первую очередь являются разработчики трансляторов и виртуальных машин, исследователи свойств алгоритмов (в направлении нахождения и использования потенциала скрытого их параллелизма). Разработанное программное обеспечение и методики несколько лет применяются при обучении студентов в университетах России, что позволило повысить компетенции учащихся в области параллелизации обработки данных.

Ключевые слова: граф алгоритма, тонкая информационная структура программы, ярусно-параллельная форма графа, рациональные параметры выполнения параллельной программы, план выполнения параллельной программы

• Поступила: 30.01.2022 • Доработана: 29.03.2022 • Принята к опубликованию: 05.09.2022

Для цитирования: Баканов В.М. Вычислительная сложность построения рациональных планов выполнения программ на заданном поле параллельных вычислителей. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):7–19. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-7-19>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Computational complexity when constructing rational plans for program execution in a given field of parallel computers

Valery M. Bakanov @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: e881e@mail.ru

Abstract

Objectives. The construction of rational plans (schedules) for parallel program execution (PPE) represents a challenging problem due to its ambiguity. The aim of this work is to create methods for developing such plans and specialized software for implementing these methods, which are based on the internal properties of algorithms, primarily on the property of internal (hidden) parallelism.

Methods. The main method for developing PPE plans was the construction, analysis, and purposeful transformation of the stacked-parallel form (SPF) of information graphs of algorithms (IGA). The SPF was transformed by transferring operators from tier to tier of the SPF (this event was taken as an elementary step in determining the computational complexity of scenario execution). As a transformation tool, a method for developing transformation scenarios in the scripting programming language Lua was used. Scenarios were created by a heuristic approach using a set of Application Programming Interface (API) functions of the developed software system. These functions formed the basis for a comprehensive study of the parameters of the IGA and its SPF representation for the subsequent construction of a PPE plan applying to a given field of parallel computers.

Results. Features of the internal properties of the algorithms that affect the efficiency of SPF transformations were identified during the course of computational experiments. Comparative indices of the computational complexity of obtaining PPE plans and other parameters (including code density, etc.) were obtained for various SPF transformation scenarios. An iterative approach to improving heuristic methods favors developing optimal schemes for solving the objective problem.

Conclusions. The developed software system confirmed its efficiency for studying the parameters of hidden parallelism in arbitrary algorithms and rational use in data processing. The approach of using a scripting language to develop heuristic methods (scenarios) for the purposeful transformation of IGA forms showed great flexibility and transparency for the researcher. The target consumers of the developed methods for generating schedules for parallel execution of programs are, first of all, developers of translators and virtual machines, and researchers of the properties of algorithms (for identifying and exploiting the potential of their hidden parallelism). The developed software and methods have been successfully used for a number of years for increasing student competence in data processing parallelization at Russian universities.

Keywords: algorithm graph, fine information structure of program, stacked-parallel form of graph, rational execution parameters of parallel program, execution plan of parallel program

• Submitted: 30.01.2022 • Revised: 29.03.2022 • Accepted: 05.09.2022

For citation: Bakanov V.M. Computational complexity when constructing rational plans for program execution in a given field of parallel computers. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):7–19. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-7-19>

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

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для сокращения времени вычислений широко применяется параллелизация, реализуемая путем одновременной обработки данных по частям на множестве различных вычислительных устройств с последующим объединением полученных результатов. Параллельное выполнение позволяет «обойти» существующие фундаментальные и чисто технологические ограничения на рост производительности путем повышения тактовой частоты процессоров. Однако задача выявления (обычно скрытого для непосвященного наблюдателя) потенциала параллелизма в алгоритмах не является «лежащей на поверхности», а уж эффективность использования параллелизма – тем более [1].

При организации параллельных вычислений отдельной и совсем непростой проблемой становится получение плана (расписания) выполнения параллельной программы (ПП). Дело в том, что практически каждую последовательную программу (алгоритмы, являющиеся базовыми компонентами любой программы, традиционно принято представлять в последовательном виде) можно представить в параллельной форме множеством способов при сохранении инварианта в виде набора операций и причинно-следственной связи между ними, причем каждый способ будет обладать различной эффективностью выполнения на параллельном вычислителе заданной архитектуры. При такой постановке задачи возрастает ценность изучения внутренних свойств именно алгоритмов¹ как реальных блоков построения программ.

Каждый из возможных планов выполнения ПП ассоциирован с определенными параметрами качества выполнения программы (время, требуемые вычислительные ресурсы, загрузка памяти и др.). При этом, в зависимости от поставленной задачи, возможны формулировка целевой функции и решение оптимизационной многопараметрической задачи.

¹ Воеводин В., Донгарра Дж. (ред.). *AlgoWiki. Открытая энциклопедия свойств алгоритмов*. <http://algowiki-project.org>. Дата обращения 15.01.2022. [Voevodin V., Dongarra J. (Eds.). *AlgoWiki: Open Encyclopedia of Parallel Algorithmic Features*. <http://algowiki-project.org>. Accessed October 20, 2022 (in Russ.).]

Несмотря на различия в архитектуре и системах машинных команд различных параллельных вычислительных систем и технологий параллельного программирования, целесообразно иметь научно обоснованные общие подходы к построению укрупненных планов (расписаний) выполнения программ. При абстрагировании от конкретики технологий параллельного программирования такие планы логично называть *каркасом* выполнения параллельной программы.

В работе предложены методы и их реализация (в форме программных сценариев решения поставленной задачи) для разработки рациональных планов выполнения ПП на заданном поле параллельных вычислителей, включая гетерогенное. Разработанные сценарии предназначены для встраивания в качестве распараллеливающих блоков во вновь разрабатываемые системы создания исполняемого кода программ. При этом упор делается именно на достижение максимального быстродействия, т.к. процессы отладки программ требуют многократной трансляции со сложной оптимизацией при условии достижения необходимого качества.

МЕТОДЫ

Для решения задачи нахождения методов построения рациональных планов выполнения ПП создана специализированная программная система инструментального уровня, обобщенная схема и схема информационных потоков которой приведены на рис. 1.

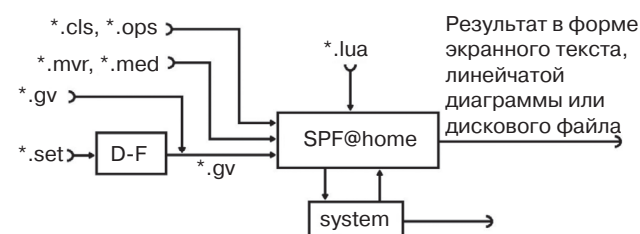


Рис. 1. Схема инструментального программного комплекса для построения планов выполнения параллельных программ [2]

На вход программной системы (рис. 1) поступает описание анализируемого алгоритма в форме традиционной последовательной программы в императивном стиле или формального ее описания в виде

ориентированного ациклического информационного графа алгоритма (ИГА) – зависимость вида «операторы → операнды». При этом вершины графа ассоциируются с операторами (группами операторов) программы, а дуги – с линиями передачи данных. На этом рисунке типы файлов *.set и *.gv – соответственно программный файл и файл информационного графа анализируемой программы; *.mvr, *.med – соответственно файлы метрик вершин и дуг графа алгоритма; *.cls, *.ops – соответственно файлы параметров вычислителей и операторов программы; *.lua – текстовый файл на языке Lua, содержащий сценарии получения планов выполнения параллельных программ. При использовании результатов разработки в качестве алгоритмической основы функционирования компонентов распараллеливающих трансляторов ИГА строится на основе результатов парсинга исходного кода транслятором (при этом библиотечные функции обрабатываются отдельно). При реализации приложения в виде отдельного компонента *Code Morphing Software* ИГА строится на основе сгенерированного последовательного исполняемого кода. Полезным свойством использования представления программ в виде ИГА является возможность обработки графа отдельными блоками (уровня сабрутин, файлов) с последующей сборкой графа полного приложения.

Выявление и анализ внутреннего логического параллелизма в алгоритмах реализовано с помощью имитации модели акторов (модуль D-F) и построения специальных сечений ИГА в виде его ярусно-параллельной формы (ЯПФ) [3] (модуль SPF@home) [4, 5]. Оба упомянутых модуля разработаны с использованием языка C/C++ в стиле GUI для модели Win'32 (для проведения массовых расчетов дополнительно реализован режим работы с командной строкой), являются полностью open source и могут быть выгружены для свободного использования (формат инсталляционных файлов)². Модуль D-F строит план выполнения ПП для модели асинхронизма выполнения операторов, расписания в стиле модуля SPF@home рассчитаны на синхронный вызов групп операторов.

Модуль D-F (Data-Flow) является фактически универсальным вычислителем архитектуры SMP (*Symmetric MultiProcessing*, системы с общей памятью, [6]), на вход которого подается последовательная программа на императивном ассемблероподобном языке (используются 3-символьные мнемоники команд и 3-адресная система с порядком следования операндов согласно соглашениям AT & T).

Программа выполняется в симуляторе вычислителя статической архитектуры Data-Flow. При этом порядок выполнения инструкций процессора определяется не порядком их следования в машинном коде, а готовностью операндов [7, 8].

Возможность варьирования числа параллельных вычислителей и правил выборки команд из буфера [4] позволяет решать обратную задачу оптимизации параметров вычислителя по характеристикам процесса вычислений. Предусмотрен экспорт ИГА в сторонние программы в DOT-формате, ведется подробный протокол симуляции.

Условное выполнение реализуется предикатным методом [9, 10], для реализации циклов используется система макросов, «разворачивающих» циклические структуры. Удобству визуализации решения способствует выдача данных о процессе выполнения программ в виде функции интенсивности вычислений (ИВ, число одновременно выполнившихся операторов в функции времени) и диаграмм Ганта.

Модуль SPF@home [5] предназначен для моделирования и выбора наилучших (в заданном смысле) сценариев преобразования ЯПФ как плана параллельного выполнения операторов на вычислительной системе заданной архитектуры. Существенным преимуществом использования ЯПФ является удовлетворительная временная вычислительная сложность ее получения (квадратично-полиномиальная относительно количества вершин графа). ЯПФ изначально может быть построена в «верхнем» или «нижнем» вариантах (все операторы располагаются на максимально приближенных к началу или концу выполнения программы ярусах ЯПФ соответственно). Важным пользовательским преимуществом ЯПФ является большая наглядность представления выявленного параллелизма в алгоритме – даже первоначально полученная ЯПФ алгоритма уже является некоторым начальным (обычно далеким от оптимального) планом выполнения ПП.

При этом расположенные на ярусах ЯПФ группы (связки, *bundles*) операторов выполняются параллельно в пределах каждого яруса, а выполнение групп операторов на каждом ярусе происходит последовательно, начиная с начального яруса. Минимально возможная высота ЯПФ (число ярусов) определяется длиной критического пути в ИГА [11, 12] и обуславливает кратчайшее время выполнения алгоритма. В модуле SPF@home визуализация полученной ЯПФ осуществляется в текстовом и графическом виде (линейчатая диаграмма ширины ЯПФ позволяет без напряжения представить вид функции распределения ширины ЯПФ по ее высоте). Механизм задания метрик выполнения операторов позволяет задавать параметры для операторов

² http://vbakanov.ru/dataflow/content/install_df.exe. Дата обращения 24.10.2022. / Accessed October 24, 2022 (in Russ.); http://vbakanov.ru/spf@home/content/install_spf.exe. Дата обращения 24.10.2022. / Accessed October 24, 2022 (in Russ.).

(например, время их выполнения или требуемые ресурсы при гетерогенном поле вычислителей), вычислителей (типы операторов, которые могут быть выполнены на данном вычислителе) и линий передачи данных (время передачи, размеры данных). Практика использования механизма метрик подробно описана в подразделе, посвященном построению расписания выполнения ПП программ на заданном поле гетерогенных вычислителей.

Дополнительно модуль SPF@home предоставляет возможность получить информацию о требуемом для выполнения заданного алгоритма *времени жизни данных*. Существование этих данных является следствием выполнения отдельных операторов и, в свою очередь, они служат входными операндами для иных операторов алгоритма. Эта информация (фактически оценка локальной *емкостной сложности* выполнения программы) важна для определения требуемых параметров внутренних регистров процессора и/или решения вопросов об оптимальности размещения данных между регистрами процессора и оперативной памятью.

Основным методом преобразования ЯПФ служит целенаправленное перемещение операторов между ярусами ЯПФ при сохранении информационных связей в ИГА. В целом данная задача относится к классу задач построения расписаний с ограничениями и является *NP*-полной [13]. Вследствие *NP*-полноты задачи можно говорить о построении именно *рациональных* (итеративно стремящихся к оптимальным) планов выполнения параллельных программ. В данной работе используется эвристический подход к решению, причем сценарии решения (в данном случае – преобразования ЯПФ в нужном направлении) реализуются с использованием скриптового языка Lua [14]. Lua выбран по причине полного open source, близости синтаксиса к распространенным языкам программирования (стиль C/C++), компактности при встраивании в родительское приложение.

Каждый вызов Lua-функции фактически является оберткой над соответствующим API³-вызовом родительской программы. Набор API системы SPF@home охватывает практически все обозримые действия над ИГА и позволяет реализовать анализ графа любой (ограниченной ресурсами вычислителя) сложности. В этом смысле использование ЯПФ графа является лишь одним из возможных приемов решения. Всего можно различить три типа вызовов:

- информационные (служат для получения информации об ИГА и его ЯПФ; на основании этих данных в дальнейшем выбирается конкретный метод обработки ИГА для решения поставленной задачи). Примеры – получить общее число ярусов ЯПФ, число операторов на заданном

ярусе, диапазон возможного расположения данного оператора по ярусам ЯПФ и др.;

- акционные (служат для реализации конкретных методов решения задачи построения расписания выполнения ПП). Примеры – построить «верхнюю» или «нижнюю» форму ЯПФ, добавить пустой ярус под данным, перенести оператор с яруса на ярус и др.;
- вспомогательные (вывод рассчитанных данных в текстовом и графическом виде для обмена данными с иными приложениями, работа с файловой системой и т.п.).

Информационный граф алгоритма в виде ЯПФ формально может быть представлен 2D-списком из элементов-идентификаторов (например, уникальных номеров) операторов $[a_{ij}]$, где $i = 1 \dots W$ – номер строки; величина W называется высотой ЯПФ и определяется величиной критического пути в ИГА; $j = 1 \dots j_i^{\max}$ – число операторов на строке i . Величина $H = \max_i (1 \dots j_i^{\max})$ называется шириной ЯПФ. В реальном ИГА положение каждого оператора на ярусах ограничено наличием информационных связей в алгоритме и ограничено диапазоном $i^{\min} \leq i \leq i^{\max}$ (где $i^{\min}$ и $i^{\max}$ – допустимые номера ярусов размещения данного оператора в ЯПФ; диапазон $i^{\min} - i^{\max}$ логично назвать *вариативностью* положений по ярусам i -го оператора). ЯПФ фактически является (исходным, наивным) планом (расписанием) выполнения ПП. При заданном описании направление орта времени совпадает с увеличением номера яруса ЯПФ.

В целом предлагаемый подход полностью соответствует стилю EPIC (Explicitly Parallel Instruction Computing, набор инструкций с явным параллелизмом [15]) и предназначен для программной реализации распараллеливающих блоков трансляторов. При этом для вычислительной архитектуры VLIW (Very Long Instruction Word, сверхдлинная машинная команда [10]) под термином «оператор» следует понимать именно машинную команду (здесь имеем полное следование концепции ILP – Instruction-Level Parallelism, параллелизм на уровне команд [4]). Для многопоточных систем на многоядерных процессорах «оператор» логично соотнести с *гранулой параллелизма* значительно большего размера, например, уровня оператора/операторов или процедур языка программирования высокого уровня [16]. Последний вариант хорошо укладывается в концепцию интерпретаторов. В обоих случаях представленная общая методика построения рационального плана выполнения ПП остается неизменной.

Внутренняя реализация данных, конечно, совсем не обязана предусматривать явного построения ЯПФ в виде 2D-массива. Она может быть любой удобной для компьютерной реализации, например,

³ API – Application Programming Interface.

в наивном случае – устанавливающей однозначное соответствие между ИГА в виде множества направленных дуг $\{k, l\}$ (матрица смежности), идентифицированных парами номеров вершин i_k, j_k и i_l, j_l , где i, j – номера строк и столбцов в ЯПФ.

В качестве образцов для исследования использовались широко распространенные алгоритмы обработки данных (линейная алгебра, статистика, операции над массивами и др.). Дополнительно были подготовлены искусственные (не соответствующие ни одному из применяемых алгоритмов, но сгенерированные в согласии с заданными параметрами) ИГА. Вполне определенным недостатком экспериментального материала являются относительно небольшие размерности обрабатываемых данных. Это связано со значительной трудностью ручного составления программ. Однако проведенные эксперименты показывают усиление выявленных тенденций при повышении размерности обрабатываемых данных во всем исследованном диапазоне их изменения.

Для определения вычислительной сложности выполнения сценариев преобразования ЯПФ использован аналог классического метода оценки целевого параметра, используемый при операциях сортировки массивов – определение количества *элементарных шагов* (перестановки двух элементов сортируемого массива), необходимых для завершения операции. В нашем случае за элементарный шаг логично принять перестановку оператора с яруса на ярус ЯПФ. Такой подход обладает всеми достоинствами и недостатками классического метода, включая неучет сложности анализа ситуации и принятия решений о совершении конкретного элементарного шага.

В данном исследовании также оценивалась величина *плотности кода*, характеризующая степень использования ресурсов параллельной вычислительной системы (числа вычислителей) при выполнении данного алгоритма (формально, отклонение ширин ярусов преобразованной ЯПФ от заданного значения). При неполном использовании вычислительных ресурсов транслятор вынужденно вставляет инструкции NOP на «пустые» места в связках параллельно выполняемых команд, что приводит к понижению эффективности кода.

Нижеприведенная серия экспериментов проводилась с использованием модуля SPF@home, как обладающего наибольшей гибкостью в преобразовании ЯПФ графов алгоритмов; собственно ИГА генерировались модулем D-F на основе программного кода. В ходе вычислительных экспериментов модуль SPF@home сохраняет подробнейший протокол моделирования для последующего анализа. Для данной работы представляют особый интерес следующие параметры, полученные в ходе целевого преобразования ЯПФ:

- высота H и ширина W полученной ЯПФ (ограничения на ширину задавались в качестве параметра, обеспечивающего выполнение алгоритма на заданном числе параллельных вычислителей);
- равномерность распределения ширин ярусов (*плотность кода*) в данной ЯПФ оценивалась величиной коэффициента вариации

$$CV = \frac{1}{\bar{W}} \sqrt{\frac{\sum (W - \bar{W})^2}{H - 1}}, \text{ где } \bar{W} - \text{среднеарифметическое ширин ярусов по ЯПФ};$$

- вычислительная сложность выполненного преобразования ЯПФ (в единицах числа перестановок операторов с яруса на ярус ЯПФ).

Для сравнения эффективности преобразования ЯПФ использовали два (представленные в виде Lua-скриптов) эвристических метода (сценария), основанных на различных общих подходах к преобразованию ЯПФ. Первый (условное название *01_Strategy*) использует основанный на способе дихотомии подход массового переноса операторов с яруса на ярус ЯПФ, второй (*02_Strategy*) – постепенный перенос операторов с «более нагруженных» на «менее нагруженные» ярусы. В обоих случаях при необходимости в нужных местах создаются дополнительные (изначально пустые) ярусы для обеспечения выполнения алгоритма на заданном числе параллельных вычислителей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Построение расписания выполнения программ на фиксированном числе параллельных вычислителей при возможности увеличения времени выполнения программы

В этом подразделе рассматривается наиболее общий случай, соответствующий условию $\bar{W} \gg P$, где P – число параллельных вычислителей. Именно при этом приходится увеличивать высоту ЯПФ (время выполнения программы).

Эффективность вышеописанных эвристических методов проверялась путем последовательного их применения к ЯПФ исследуемых алгоритмов в диапазоне числа параллельных вычислителей P от W_0 (ширина исходной ЯПФ) до 1 (полностью последовательное выполнение алгоритма).

На рис. 2–5 показано изменение целевых величин (оси ординат): (а) – вычислительной сложности, (б) – высоты ЯПФ, (в) – коэффициента вариации ширин ярусов ЯПФ, как функций заданного количества параллельных вычислителей P (оси абсцисс). Преобразования ЯПФ соответствующих алгоритмов проводились согласно сценариям *01_Strategy* и *02_Strategy* (кривые 1 и 2 соответственно).

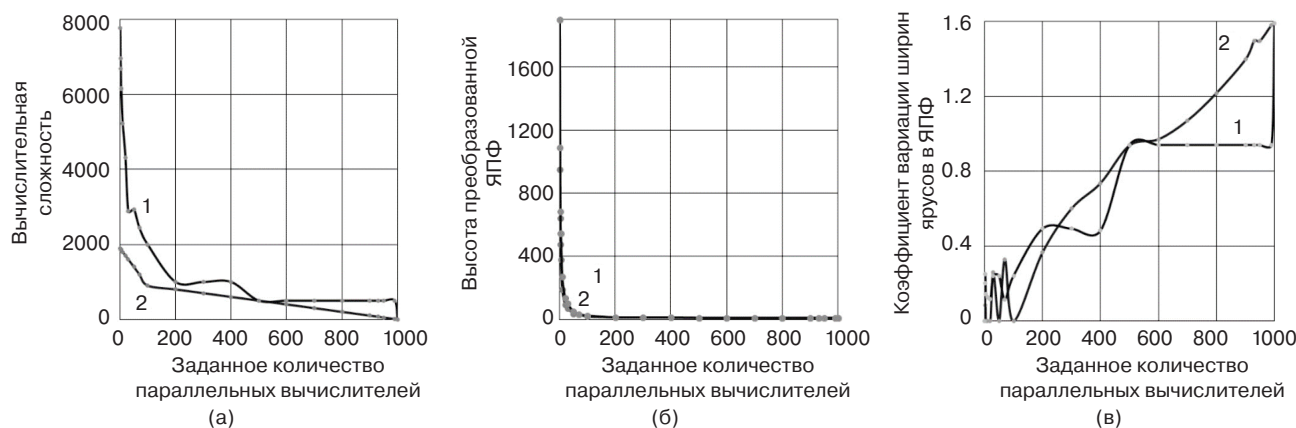


Рис. 2. Алгоритм умножения квадратных матриц 10-го порядка классическим способом

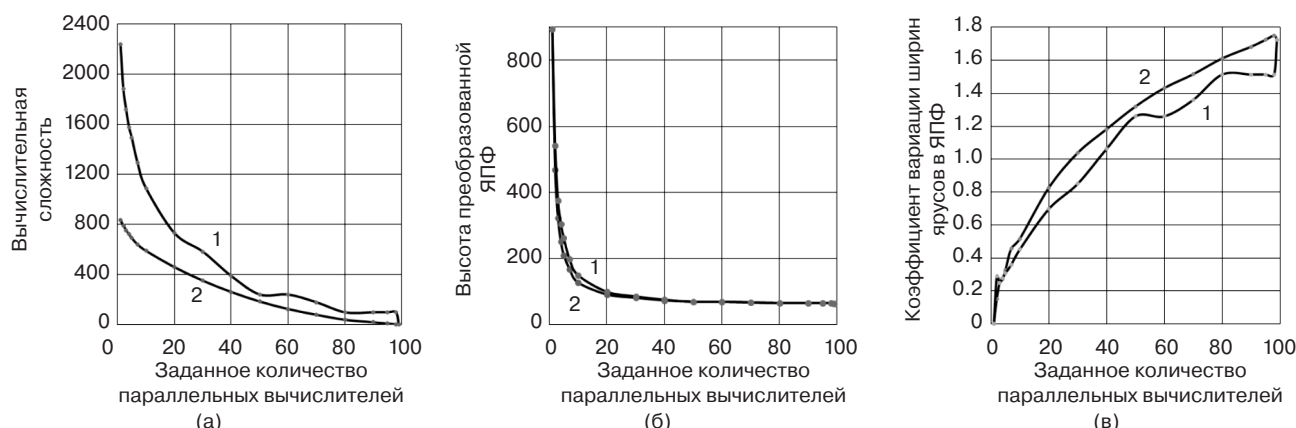


Рис. 3. Алгоритм решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) 10-го порядка
прямым (безитерационным) методом Гаусса

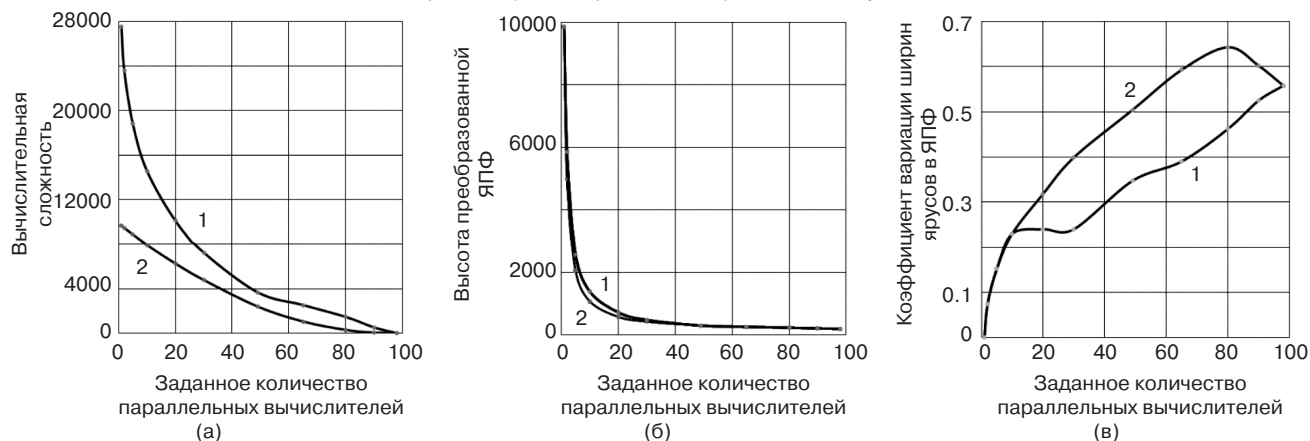


Рис. 4. Искусственно сгенерированный алгоритм e19039_o9853_t199

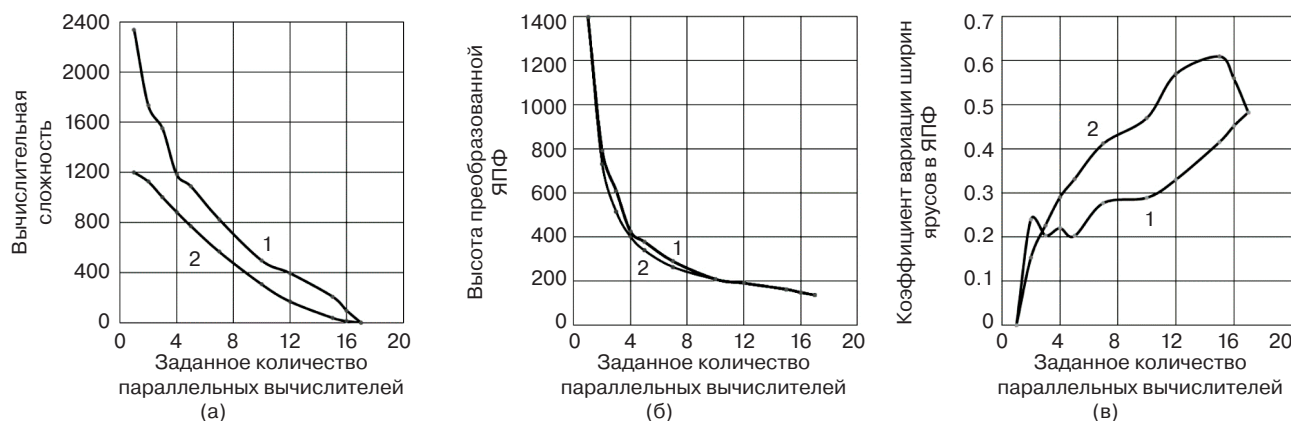


Рис. 5. Искусственно сгенерированный алгоритм e2367_o1397_t137

Как видно из рис. 2–5, оба метода на исследованных алгоритмах приводят к близким результатам – сценарий *02_Strategy* более «быстрый» относительно антагониста (графики (а)) при малоотличимом времени выполнения алгоритма (графики (б)). По плотности кода (графики (в)) оба сценария показывают сходные тенденции стремления к минимуму целевой функции при небольшом (существенно меньшем ширине ЯПФ) числе параллельных вычислителей. Причудливые формы кривых являются следствием сложности используемых сценариев и обработкой целочисленных величин, причем при использовании сценария *02_Strategy* графики визуально обладают более монотонной формой.

Количественно сценарий *02_Strategy* имеет меньшую (приблизительно в 2–4 раза в исследуемом диапазоне размеров обрабатываемых данных) вычислительную сложность относительно *01_Strategy*, хотя на первый взгляд ожидалось противоположное. Однако при этом сценарий *02_Strategy* обладает более сложной внутренней логикой по сравнению с *01_Strategy* (в последнем случае она примитивна), что не может быть учтено принятой системой оценки вычислительной сложности. С учетом сказанного может быть логичнее использовать в компонентах распараллеливающих систем сценарий *01_Strategy* для быстрого, но достаточно «грубого» построения планов выполнения параллельных программ, а метод *02_Strategy* – для построения этих планов в режиме оптимизации.

Построение расписания выполнения программ на минимальном числе параллельных вычислителей при условии невозрастания времени выполнения программы

В случае $\bar{W} \approx P$ (среднеарифметическое значений ширин исходной ЯПФ сравнимо с числом параллельных вычислителей) возникает задача получения расписания выполнения ПП с максимальной плотностью кода без возрастания высоты ЯПФ («балансировка» операторов по ярусам ЯПФ). Разработанные эмпирические методы по «балансировке» ЯПФ показали противоречивые результаты – в некоторых случаях удавалось достичь почти 100% плотности кода, а некоторые алгоритмы практически не поддавались указанной модификации (вследствие ограничений на перемещения операторов между ярусами из-за необходимости сохранения информационных зависимостей в алгоритме).

Применение программного модуля *SPF@home* возможно и для решения обратной задачи, например, определения параметров параллельной вычислительной системы исходя из баланса производительности и стоимости собственно системы.

Перспективные методы расчета расписания выполнения параллельных программ

Все перечисленные эксперименты характерны тем, что ЯПФ первоначально вычислялась в «верхней» форме (все операторы находились как можно «выше» по ярусам ЯПФ). В этом случае преимущественными перемещениями операторов по ярусам были направления «сверху вниз» – от начальных ярусов к конечным (это не запрещает, конечно, использование «многоходовок» с неоднократным изменением направления перемещения операторов между ярусами).

Описанная последовательность действий логически обоснована характерной формой кривых ИВ в условиях неограниченного параллелизма – резкий подъем в начальной части сменяется пиком и плавным снижением к концу выполнения программы. Такая форма кривой возникает при значительных объемах входных данных и лишней раз подтверждает принадлежность процесса выполнения операторов на поле параллельных вычислителей к одной из разновидностей многоканальных систем массового обслуживания. Так как при этом вариативность находящихся в области пика функции ИВ операторов велика, эффективность получения удовлетворительного плана выполнения ПП путем перемещения операторов ЯПФ «вниз» также значительна. Будем называть алгоритмы, начальная (нереформированная) форма распределения ширин которых в «верхней» ЯПФ соответствует вышеописанной, принадлежащими к П-классу⁴.

В порядке обсуждения небезынтересно будет рассмотреть вариант начальной ЯПФ в «нижней» форме (при этом все операторы перемещены максимально в сторону окончания выполнения программы). Такая ЯПФ может быть получена из «верхней» перемещениями операторов по ярусам «как можно ниже» или много проще – построением ЯПФ в направлении от конца программы к ее началу (в последнем случае вычислительная сложность получения ЯПФ остается такой же, как и при получении «верхней» ЯПФ). Ниже проиллюстрировано сравнение распределения ширин ЯПФ в «верхней» и «нижней» формах.

⁴ К П-классу будем относить алгоритмы, которые характеризуются распределением ширин ярусов в ЯПФ информационного графа в «верхней» форме (когда все операторы находятся как можно ближе к началу выполнения) с наличием ярко выраженного максимума в начале и пологого снижения в конце. [We will refer to the П class such algorithms that are characterized by the distribution of the tier widths in the SPF of the information graph in the upper form (when all operators are as close as possible to the beginning of execution) with the presence of a pronounced maximum at the beginning and of a gentle decrease at the end.]

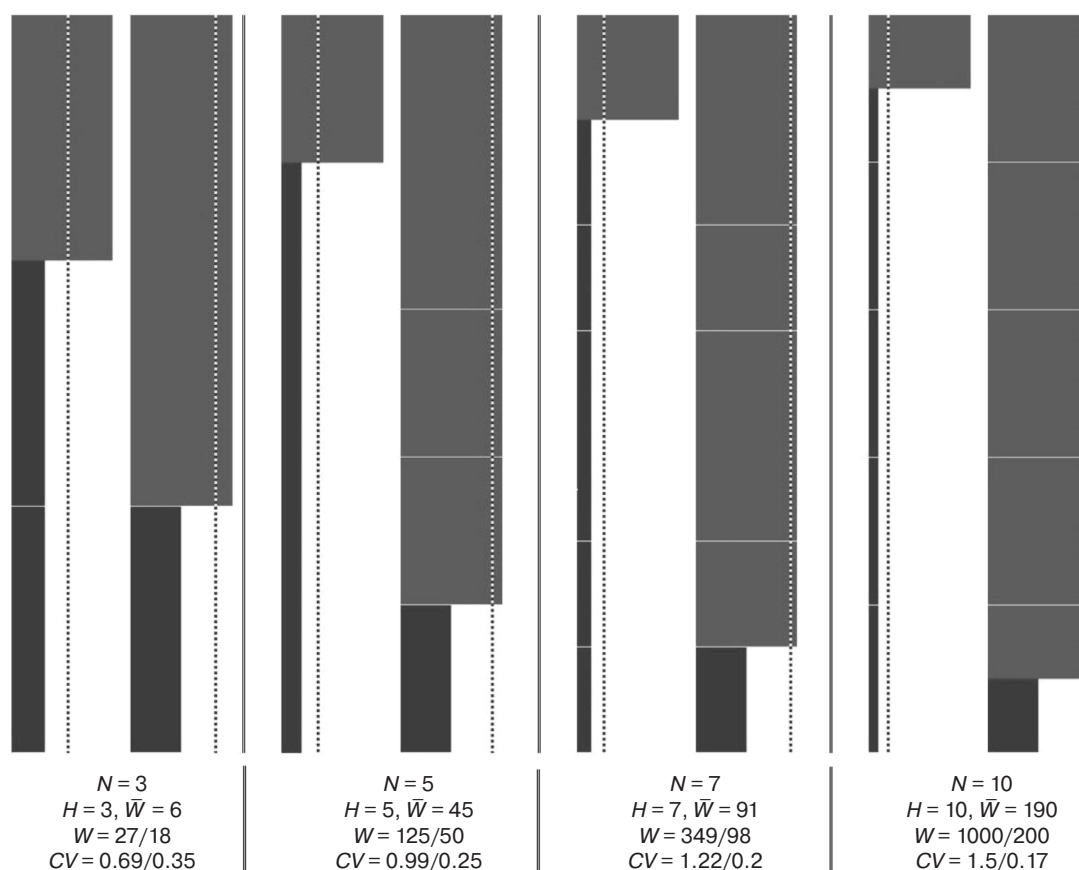


Рис. 6. Алгоритм умножения квадратных матриц классическим способом;
горизонтальная ось – ширина ярусов ЯПФ для порядка матриц $N = 3, 5, 7, 10$.
Светло-серый цвет – ярусы максимальной ширины, темно-серый – минимальной ширины

На рис. 6 приведена линейчатая диаграмма распределения ширин ЯПФ для заданных размеров обрабатываемых данных (указаны в подписочных надписях), полученная модулем SPF@home, причем в каждом из 4 столбцов строки приведены две диаграммы – слева для «верхней» и справа для «нижней» ЯПФ данного алгоритма. Здесь H , W и $\bar{W}$ – высота, ширина и среднеарифметическая ширина ЯПФ (последняя показана на рисунке пунктиром; символ прямого слеша разделяет параметры для «верхней» и «нижней» ЯПФ).

Последние представленные иллюстрации интересны возможностью существенной «балансировки» ЯПФ без применения сложных эвристических алгоритмов ее реорганизации. Фактически все возможные решения при реорганизации ЯПФ находятся в диапазоне между «верхней» и «нижней» формами, однако при выборе в качестве исходной «нижней» формы приоритетным перемещением операторов является движение «вверх».

Последнее высказывание требует ответа на вопрос – не имеются ли среди двух пограничных («верхней» и «нижней») форм состояний с еще лучшим показателем «балансировки»? Для ответа на этот вопрос был проведен эксперимент по пошаговому

преобразованию ЯПФ из «верхней» формы в «нижнюю» (на рис. 7 оцифровка оси абсцисс соответствует числу перемещений операторов с яруса на ярус), в дополнение к показателю CV (сплошные линии, левая шкала ординат) неравномерность ширин ярусов ЯПФ оценивалась отношением ширины самого широкого яруса к самому узкому (пунктир, правая шкала ординат).

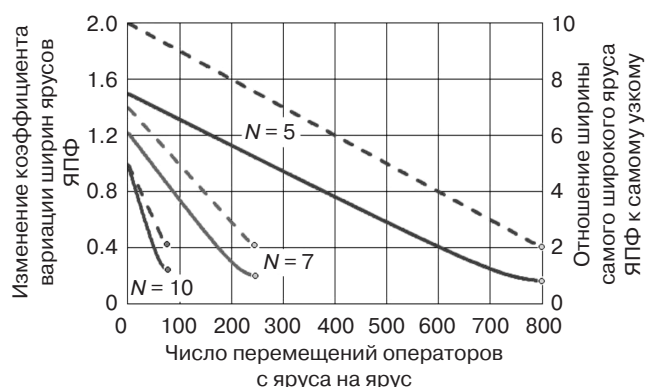


Рис. 7. Неравномерность распределения ширин ярусов ЯПФ для алгоритма умножения матриц классическим способом (N – порядок перемножаемых матриц)

Несмотря на то, что в данных экспериментах не имело места полное покрытие всего множества состояний ЯПФ (возможные перемещения операторов по ярусам ЯПФ совершались «вниз» на максимальную вариативность), можно с высокой степенью вероятности утверждать, что целевые величины обладают свойством невозрастания в диапазоне существования и минимальны именно в области «нижней» ЯПФ.

В случае нахождения легко определяемых условий принадлежности алгоритма к П-классу возможна существенная экономия вычислений при определении рациональных планов выполнения ПП – вместо реализации вышеописанных достаточно сложных сценариев достаточно построить «нижнюю» ЯПФ. Используемые ранее количественные характеристики неравномерности ширины ярусов не дают информации о форме кривой, обладающей этой неравномерностью. В качестве дополнительной оценки неравномерности распределения операторов по ярусам ЯПФ может быть использован известный графоаналитический метод определения дифференциации доходов населения⁵, заключающийся в расчете численных параметров расслоения (кривая Лоренца и коэффициент Джини), несмотря на зеркально-противоположную форму анализируемых кривых.

Пример показывает важность изучения свойств (включая классификацию) алгоритмов со стороны их сущностной грани, представляющей собой внутренний параллелизм, с целью наилучшего практического использования этих свойств.

Построение расписания выполнения параллельных программ на заданном числе гетерогенных вычислителей

Современные многоядерные процессоры все чаще разрабатываются с вычислительными ядрами различных возможностей. Поэтому практически полезно уметь строить расписание выполнения параллельных программ для подобных систем (с гетерогенным полем параллельных вычислителей).

Модуль SPF@home поддерживает эту возможность путем сопоставления информации из двух файлов метрик – для операторов и вычислителей (*.ops и *.cls соответственно, рис. 1). Имеется

возможность задавать совпадение по множеству свободно назначаемых признаков для любого диапазона операторов/вычислителей. Условием выполнимости данного оператора на заданном вычислителе является соотношение $\min Val_i \leq Val_i \leq \max Val_i$ для одинакового i , где Val_i , $\min Val_i$, $\max Val_i$ – числовые значения данного параметра для оператора и вычислителя соответственно.

Разработка расписания для выполнения программы на гетерогенном поле параллельных вычислителей является более сложной процедурой относительно ранее описанных и здесь упор делается на Lua-программирование. Так как на одном ярусе ЯПФ могут находиться операторы, требующие для выполнения различных вычислителей, полезной может служить метафора расщепления ярусов ЯПФ на семейства подъярусов, каждое из которых соответствует блоку вычислителей с определенными возможностями. Все операторы данного яруса обладают одинаковыми возможностями выполнения, последовательность обработки их в пределах яруса/подъяруса в первом приближении произвольна. На рис. 8а показано расщепление операторов на одном из ярусов ЯПФ в случае наличия 11 параллельных вычислителей трех типов, на рис. 8б – результат расчета реального плана выполнения параллельной программы на гетерогенном поле параллельных вычислителей (3 типа вычислителей по 5, 3 и 4 штук соответственно, номера исполняемых операторов скрыты).

В этом случае общее время T решения задачи определяется суммой по всем ярусам максимальных значений времен выполнения операторов на подъярусах данного яруса:

$$T = \sum_j \left(\max_{k_j} \sum_i t_{ik} \right),$$

где j – число ярусов, i – число подъярусов на данном ярусе, k_j – типы вычислителей на j -м ярусе, t_{ik} – время выполнения оператора типа i на вычислителе типа k .

Если ставится задача достижения максимальной производительности, то возможно определить число вычислителей конкретного типа, минимизирующее параметр T (например, решение обратной задачи оптимизации по определению соотношения числа вычислителей разных типов). Задача минимизации общего времени решения T усложняется в случае возможности выполнения каждого оператора на нескольких вычислителях вследствие неоднозначности параметра t_{ik} в вышеприведенном выражении; здесь необходима дополнительная «балансировка» по подъярусам.

⁵ Коэффициент Джини: все ли равны? «ОТКРЫТЫЙ ЖУРНАЛ» – медиа об инвестициях и финансах. <https://journal.open-broker.ru/economy/koefficient-dzhini/>. Дата обращения 31.03.2022. [Gini coefficient: Are everyone equal? Open Journal, an investment and finance medium. <https://journal.open-broker.ru/economy/koefficient-dzhini/>. Accessed March 31, 2022 (in Russ.).]

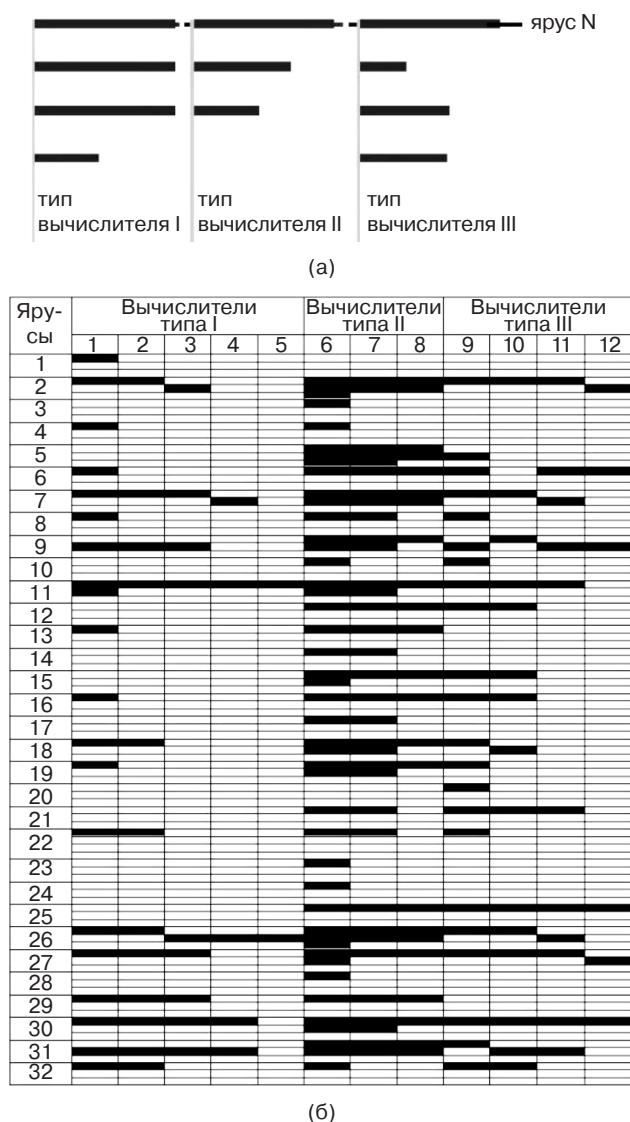


Рис. 8. Схема расщепления ярусов ЯПФ на семейства подъярусов при решении задачи определения расписания для гетерогенного поля параллельных вычислителей:
(а) схема, (б) результат расчета плана выполнения реальной параллельной программы

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований подтвердилась возможность постепенного итерационного улучшения (в заданном направлении) эвристических сценариев преобразования исходных ЯПФ различных алгоритмов. В целом возможна разработка более быстрых (но с несколько худшим качеством по целевому назначению) и относительно медленных при более высоком качестве сценариев (фактически уровень оптимизации).

Хотя акцент данной работы ориентирован на величину вычислительной сложности сценариев получения планов (расписаний) выполнения параллельных программ, представленная программная система, по мнению автора, должна показать свою

эффективность и в решении задач многомерной оптимизации при использовании известных алгоритмов (данная программная система при этом является *математической моделью объекта оптимизации*). Для реализации данного варианта использования обсуждаемая компьютерная система позволяет работать в режиме командной строки.

Несмотря на невысокую вычислительную сложность получения ЯПФ по ИГА, метод использования ЯПФ в качестве основы для построения планов выполнения параллельных программ обладает недостатком, заключающимся в невозможности простого учета времени выполнения операций. Вследствие этого время выполнения связки операторов на одном ярусе ЯПФ приходится считать равным времени выполнения самого «медленного» из них. Подход, заключающийся в целенаправленном перемещении операторов по ярусам ЯПФ, дает возможность сортировки на каждом ярусе операторов по максимально близкому времени их выполнения.

В ходе экспериментов выявилась значительная дисперсия свойств алгоритмов, представленных информационными графами, по возможности формирования планов параллельного их выполнения с максимальной плотностью кода. При этом разные алгоритмы требуют различных методов эффективного их преобразования. Представляется важной задача априорного (еще до реорганизации ЯПФ, в момент ее получения) определения сценариев для эффективного целенаправленного ее реформирования с заданной целью. Инструментом здесь должно служить создание системы классификации алгоритмов по некоторым параметрам, определяющим эффективные методы их преобразования. Возможно, перспективным может быть применение формальных методов искусственного интеллекта для решения указанной задачи.

Все проведенные эксперименты показывают, что выявленные тенденции усиливаются по мере увеличения размерности обрабатываемых данных. Это дает уверенность в сохранении полученных в результате моделирования тенденций при масштабировании по объемам обрабатываемых данных.

В соответствии с присущим эвристическому подходу итерационным принципом постепенного приближения к наилучшему решению рассматриваемой задачи имеется уверенность в возможности количественного улучшения (относительно вышеприведенных параметров) методик определения расписаний выполнения программ на заданном или определенном решении оптимизационной задачи поле параллельных вычислителей.

Важным продуктивным свойством разработанной программной системы является возможность решения обратных задач определения параметров

вычислительной системы в соответствии с заданными требованиями к самому процессу выполнения программ, например, к времени выполнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом разработанный программный комплекс подтвердил эффективность в исследовании параметров скрытого параллелизма в произвольных алгоритмах и рационального использования его при обработке данных. Подход с применением скриптового языка для разработки эвристических методов (сценариев) целенаправленного преобразования форм информационного графа алгоритмов показал большую гибкость и прозрачность для исследователя. При этом гибкость достигается использованием интерпретируемого скриптового языка, а скорость обработки – возможностями исполняемого кода компилируемого языка родительского приложения.

Целевыми потребителями разработанных методов генерации расписаний параллельного выпол-

нения программ в первую очередь являются разработчики трансляторов и виртуальных машин, исследователи свойств алгоритмов в направлении нахождения и использования потенциала скрытого их параллелизма. При практическом применении предлагаемой методики придется учесть целый ряд прикладных вопросов реализации, включая известные проблемы использования указателей, конфликтов операций работы с памятью в связках инструкций Load/Store и др., не изменяющих кардинально предложенную методику.

Разработанное программное обеспечение и методики, а именно, приемы выявления скрытого параллелизма и его параметров в произвольных алгоритмах, способы построения рациональных планов (расписаний) выполнения параллельных программ на заданном поле вычислителей, в течение нескольких лет применяются при обучении студентов в российских университетах. Это позволило повысить компетенции учащихся в области параллелизации обработки данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. *Параллельные вычисления*. СПб.: БХВ-Петербург; 2004. 608 с.
2. Bakanov V. Research and selection of rational methods for obtaining framework of schedules for the parallel programs execution. In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (Eds.). *Data Science and Intelligent Systems. CoMeSySo 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. V. 231. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_22
3. Федотов И.Е. *Параллельное программирование. Модели и приемы*. М.: СОЛОН-Пресс; 2018. 390 с. ISBN 978-5-91359-222-4
4. Баканов В.М. Управление динамикой вычислений в процессорах потоковой архитектуры для различных типов алгоритмов. *Программная инженерия*. 2015;9:20–24.
5. Bakanov V.M. Software complex for modeling and optimization of program implementation on parallel calculation systems. *Open Comput. Sci.* 2018;8(1): 228–234. <https://doi.org/10.1515/comp-2018-0019>
6. Padua D. (Ed.). *Encyclopedia of parallel computing*. NY: Springer; 2012. 2195 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09766-4>
7. Dennis J.B., Misunas D.P. A preliminary architecture for a basic data-flow processor. In: *Proc. Second Annual Symp. Computer Architecture (ISCA 75)*. 1975. P. 126–132. <https://doi.org/10.1145/642089.642111>
8. Kukunas J. *Power and performance: Software analysis and optimization*. Morgan Kaufman, Elsevier Inc.; 2015. 300 p.
9. McNairy C., Soltis D. Itanium 2 processor microarchitecture. *IEEE Micro*. 2003;23(2):44–55. <https://doi.org/10.1109/MM.2003.1196114>

REFERENCES

1. Voevodin V.V., Voevodin V.I. *Parallel'nye vychisleniya (Parallel computing)*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2004. 608 p. (in Russ.).
2. Bakanov V. Research and selection of rational methods for obtaining framework of schedules for the parallel programs execution. In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (Eds.). *Data Science and Intelligent Systems. CoMeSySo 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. V. 231. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_22
3. Fedotov I.E. *Parallel'noe programmirovaniye. Modeli i priemy (Parallel programming. Models and techniques)*. Moscow: SOLON-Press; 2018. 390 p. (in Russ.). ISBN 978-5-91359-222-4
4. Bakanov V.M. Dynamics control computing in the processors data flow architecture for different types of algorithms. *Programmnaya inzheneriya = Software Engineering*. 2015;9:20–24 (in Russ.).
5. Bakanov V.M. Software complex for modeling and optimization of program implementation on parallel calculation systems. *Open Comput. Sci.* 2018;8(1): 228–234. <https://doi.org/10.1515/comp-2018-0019>
6. Padua D. (Ed.). *Encyclopedia of parallel computing*. NY: Springer; 2012. 2195 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09766-4>
7. Dennis J.B., Misunas D.P. A preliminary architecture for a basic data-flow processor. In: *Proc. Second Annual Symp. Computer Architecture (ISCA 75)*. 1975. P. 126–132. <https://doi.org/10.1145/642089.642111>
8. Kukunas J. *Power and performance: Software analysis and optimization*. Morgan Kaufman, Elsevier Inc.; 2015. 300 p.
9. McNairy C., Soltis D. Itanium 2 processor microarchitecture. *IEEE Micro*. 2003;23(2):44–55. <https://doi.org/10.1109/MM.2003.1196114>

10. Таненбаум Э., Остин Т. *Архитектура компьютера*: пер с англ. СПб.: Питер; 2019. 816 с. ISBN 978-5-4461-1103-9
11. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to algorithms*. 3rd ed. London: MIT Press; 2009. 1292 p.
12. McConnell J.J. *Analysis of algorithms: An active learning approach*. Jones & Bartlett Publishers; 2008. 451 p.
13. Гэри М., Джонсон Д. *Вычислительные машины и труднорешаемые задачи*: пер. с англ. М.: Книга по требованию; 2012. 420 с. ISBN 978-5-458-26100-5
14. Ierusalimsky R. *Programming in Lua*. 3rd ed. PUC-Rio, Brasil, Rio de Janeiro; 2013. 348 p.
15. Fisher J.A. Very long instruction word architectures and the ELI-512. In: *Proceedings of the 10th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA '83)*. 1983. P. 140–150. <https://doi.org/10.1145/800046.801649>
16. Babb R.I. Parallel processing with large-grain data flow techniques. *Computer*. 1984;17(7):55–61. <https://doi.org/10.1109/MC.1984.1659186>
10. Tanenbaum E., Ostin T. *Arkhitektura komp'yutera (Computer architecture)*. Transl. from Eng. St. Petersburg: Piter; 2019. 816 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4461-1103-9
11. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to algorithms*. 3rd ed. London: MIT Press; 2009. 1292 p.
12. McConnell J.J. *Analysis of algorithms: An active learning approach*. Jones & Bartlett Publishers; 2008. 451 p.
13. Garey M., Johnson D. *Vychislitel'nye mashiny i trudnoreshaemye zadachi (Computing machines and difficult tasks)*. Transl. from Eng. Moscow: Kniga po trebovaniyu; 2012. 420 p. (in Russ.). ISBN 978-5-458-26100-5
- [Garey M., Johnson D. *Computers and intractability*. San Francisco; 1979. 338 p.]
14. Ierusalimsky R. *Programming in Lua*. 3rd ed. PUC-Rio, Brasil, Rio de Janeiro; 2013. 348 p.
15. Fisher J.A. Very long instruction word architectures and the ELI-512. In: *Proceedings of the 10th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA '83)*. 1983. P. 140–150. <https://doi.org/10.1145/800046.801649>
16. Babb R.I. Parallel processing with large-grain data flow techniques. *Computer*. 1984;17(7):55–61. <https://doi.org/10.1109/MC.1984.1659186>

Об авторе

Баканов Валерий Михайлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры КБ-5 «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: e881e@mail.ru. Scopus Author ID 6505511355, ResearcherID L-1314-2015, SPIN-код РИНЦ 8868-4594, <https://orcid.org/0000-0002-1650-038X>

About the author

Valery M. Bakanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Hardware, Software and Mathematical Support of Computing Systems, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: e881e@mail.ru. Scopus Author ID 6505511355, ResearcherID L-1314-2015, RSCI SPIN-code 8868-4594, <https://orcid.org/0000-0002-1650-038X>



RESEARCH ARTICLE

Genetic programming support vector machine model for a wireless intrusion detection system

Anshita Dhoot ^{1, @},
Alexey N. Nazarov ²,
Ilia M. Voronkov ³

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow oblast, Dolgoprudny, 141701 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

³ HSE University, Moscow, 123557 Russia

@ Corresponding author, e-mail: anshita.dhoot.23@gmail.com

Abstract

Objectives. The rapid penetration of wireless communication technologies into the activities of both humans and Internet of Things (IoT) devices along with their widespread use by information consumers represents an epochal phenomenon. However, this is accompanied by the growing intensity of successful information attacks, involving the use of bot attacks via IoT, which, along with network attacks, has reached a critical level. Under such circumstances, there is an increasing need for new technological approaches to developing intrusion detection systems based on the latest achievements of artificial intelligence. The most important requirement for such a system consists in its operation on various unbalanced sets of attack data, which use different intrusion techniques. The synthesis of such an intrusion detection system is a difficult task due to the lack of universal methods for detecting technologically different attacks; moreover, the consistent application of known methods is unacceptably long. The aim of the present work is to eliminate such a scientific gap.

Methods. Using the achievements of artificial intelligence in the fight against attacks, the authors proposed a method based on a combination of the genetic programming support vector machine (GPSVM) model using an unbalanced CICIDS2017 dataset.

Results. The presented technological intrusion detection system architecture offers the possibility to train a dataset for detecting attacks on CICIDS2017 and extracting detection objects. The architecture provides for the separation of the dataset into verifiable and not verifiable elements, with the latter being added to the training set by feedback. By training the model and improving GPSVM training set, better accuracy is ensured. The operability of the new flowchart of the GPSVM model is demonstrated in terms of the entry of input data and output of data after processing using the training set of the GPSVM model. Numerical analysis based on the results of model experiments on selected quality indicators showed an increase in the accuracy of the results as compared to the known SVM method.

Conclusions. Computer experiments have confirmed the methodological correctness of choosing a combination of the GPSVM model using an unbalanced CICIDS2017 dataset to increase the effectiveness of intrusion detection. A procedure for forming a training dataset based on feedback is proposed. The procedure involving the separation of datasets is shown to create conditions for improving the training of the model. The combination of the GPSVM model with an unbalanced CICIDS2017 dataset to collect a sample increases the accuracy of intrusion detection to provide improved intrusion detection performance as compared to the SVM method.

Keywords: cyber security, cyber intrusion detection, rare category detection, IDS dataset, GPSVM

• Submitted: 15.02.2022 • Revised: 19.04.2022 • Accepted: 12.09.2022

For citation: Dhoot A., Nazarov A.N., Voronkov I.M. Genetic programming support vector machine model for a wireless intrusion detection system. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):20–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-20-27>

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

The authors declare no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Модель GP SVM для беспроводной системы обнаружения вторжений

А. Дхут ^{1, @},
А.Н. Назаров ²,
И.М. Воронков ³

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская область, г. Долгопрудный, 141701 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 123557
Россия

@ Автор для переписки, e-mail: anshita.dhoot.23@gmail.com

Резюме

Цели. Стремительное проникновение технологий беспроводной связи и устройств Интернета вещей (IoT) в деятельность человека и их повсеместное использование потребителями информации является значимым историческим явлением. Этот процесс сопровождается растущей интенсивностью негативных информационных атак, прежде всего, широким распространением бот-атак через IoT, объем которых наряду с сетевыми атаками достигает критического уровня, и снизить его самостоятельно потребителям контента не представляется возможным. В таких обстоятельствах возрастает потребность в синтезе технологически новой, основанной на новейших достижениях искусственного интеллекта, системы обнаружения вторжений. Важнейшим требованием к системе является ее эффективность при работе на полученных разными способами несбалансированных наборах данных атак, использующих разные технологические приемы вторжения. Синтез такой системы обнаружения вторжений является сложной задачей из-за отсутствия универсальных методов обнаружения технологически разных атак, а последовательное применение известных методов является недопустимо долгим. Ликвидация этого научного пробела и является целью настоящей статьи.

Методы. Используя достижения искусственного интеллекта в борьбе с атаками, авторы предложили способ, основанный на комбинации модели машины опорных векторов генетического программирования (GPSVM) с применением несбалансированного набора данных CICIDS2017.

Результаты. Предложена архитектура системы технологического обнаружения вторжений с возможностью целевого обучения набора данных в интересах обнаружения атак на CICIDS2017 и извлечения объектов обнаружения. Архитектурой предусмотрено разделение набора данных на проверяемые и непроверяемые объекты, которые по результатам обратной связи будут добавлены в обучающий набор. Для того чтобы обеспечить лучшую точность результата, происходит обучение модели и совершенствование обучающего набора GPSVM. Показана работоспособность новой блок-схемы модели GPSVM относительно того, как набор данных вводится в качестве входных данных и выдает выходные данные после обработки с помощью обучающего набора модели GPSVM. Численный анализ результатов модельных экспериментов по выбранным показателям качества показал увеличение точности результатов по сравнению с известным методом SVM.

Выводы. Компьютерные эксперименты подтвердили методическую правильность выбора комбинации модели GPSVM с применением несбалансированного набора данных CICIDS2017 для повышения эффективности

обнаружения вторжений. Предложена процедура формирования обучающего набора данных, основанная на обратной связи. Показано, что применение такой процедуры вместе с разделением наборов данных создает условия для совершенствования обучения модели. Комбинация модели GPSVM с несбалансированным набором данных CICIDS2017 для сбора выборки повышает точность обнаружения вторжений и обеспечивает наилучшую производительность обнаружения вторжений по сравнению с методом SVM.

Ключевые слова: кибербезопасность, обнаружение кибератак, обнаружение редких категорий, набор данных IDS, GPSVM

• Поступила: 15.02.2022 • Доработана: 19.04.2022 • Принята к опубликованию: 12.09.2022

Для цитирования: Dhoot A., Nazarov A.N., Voronkov I.M. Genetic programming support vector machine model for a wireless intrusion detection system. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):20–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-20-27>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In order to defend a system from malicious behaviors such as attacks and malware, it is necessary to ensure intrusion detection. An intrusion detection system (IDS) represents an essential line of defense to protect complicated networks against increasing activities of intruders. For this reason, improved IDS designs based on wide-ranging and valid datasets for testing and evaluating techniques are proposed [1], along with responses to the challenge of obtaining significant datasets [2].

Some datasets are not shareable because of privacy concerns, while other available datasets do not reflect the latest trends. Moreover, many datasets are anonymized, despite the variety of traffic involving diverse evidence-based attacks. Thus, there are problems concerning a scarcity of definite characteristics, as well as the general inaccessibility of datasets. Hence, a precisely seamless dataset is yet to be comprehended [2–4]. Due to the evolution of malware and consistently changing attack strategies, it is necessary to regularly update standard datasets [2].

Since the year 1999, many frameworks for evaluating the IDS dataset have been proposed [2–9]. As per the latest existing research evaluation of frameworks, namely diversity of attacks, even characteristics, presented protocols, anonymity, wide-ranging interaction, complete capture, comprehensive network configuration, featuring dataset, ample traffic, metadata, heterogeneity, as well as labelling, are critical factors for developing a valid and comprehensive IDS dataset [7, 9].

ATTACK TYPES AND SCENARIOS

The IDS dataset of the Canadian Institute for Cybersecurity (CICIDS2017 dataset¹), which offers a wide diversity of attacking sources, is intended for

intrusion detection purposes, as well as providing generally network security. This dataset identifies six common attack types, which can be executed using required tools and codes [10–13].

- *Brute force attack:* Perhaps the best-known form of attack, used for password cracking as well as discovering hidden pages and available content in web applications. This type of attack is based on trial and error until the intruder succeeds.
- *Denial-of-service (DoS) Attack:* A kind of attack in which the intruder seeks to make a machine or network resource temporarily unavailable. It accomplishes this by flooding target network/resources/machines with excessive requests to overload the system, preventing some or all authentic requests from being satisfied.
- *Botnet:* An internet-connected device that uses a botnet owner for performing several tasks. This can be used to steal data, provide access for intruders and send spam messages to devices and their connection.
- *Heartbleed Attack:* This is a kind of bug that exists in the OpenSSL cryptography library that is widely used for Transport Layer Security (TLS) protocol implementation, which can be overloaded by sending a heartbeat appeal comprising malformed bulky length field as well as small payload to the susceptible user server to aggravate the target's reaction.
- *DDoS Attacks:* Distributed denial-of-service occurs when there are multiple resources flooded with the large bandwidth or resources of a vulnerable victim that can be targeted easily. In such a situation, an attack can harm a lot of multiple victims that can be compromised resources, for instance botnet; it can be easily targeted to flood system to generate the large traffic network.
- *Information Attack:* Network intrusion from inside usually gets exploited by vulnerable software for instance Adobe Acrobat Reader. After intruding to the software successfully from the backdoor, it

¹ <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>. Accessed November 1, 2021.

conducts discrete attacks on the network of the dupe which is generally known as full-port scan, service inventories by using Nmap, and IP sweep.

- *Web Attack*: A kind of attack that occurs every day to affect individuals, as well as organizations. Structured query language (SQL) injection can be used by an intruder to generate a SQL command string for use to access information held in databases. Cross-site scripting (XSS) is used to inject SQL scripts and brute forcing over HTTP to obtain admin ID-password data.

SAMPLING TECHNIQUES

Several sample techniques are often used in unbalanced class distribution for handling real-world datasets over the network ID and credit-card fraud detection proposed by researchers for handling unbalanced class distribution data to improve classification performance [9]:

- *Over Sampling*: After replicating instances of the minority class, this approach then generates replicates based on minority classes' characteristics that decrease their distinctiveness to reduce the overall class imbalance level.
- *Under Sampling*: Removes the existed instances in the majority for balancing a dataset.
- *Combining Sampling*: Data cleaning method using a combination of sampling techniques to enhance the classification performance of an unbalanced dataset. Includes under- and oversampling, where under sampling is applied prior to oversampling in order to prevent data from being overlapped.

1. PROPOSED WORK

Our contribution: In this paper, we contribute a better result for feature selection using a genetic programming support vector machine (GPSVM) model that covers all the other important criteria to support the system for detecting intrusion attacks. In order to accomplish tests to determine the extracted features which are benign, as well as to analyze dataset for featuring best feature dataset for distinguishing distinct attacks, we used the CICIDS2017 dataset available on the Canadian Institute for Cybersecurity website [14].

This paper expands on earlier methods used as a toolset with which to create tagged datasets that can include data from both host logs and network traffic [15]. In this case, the discussed problem of using unbalanced classes and the approach to batch training of a neural network intrusion classifier with unbalanced classes can be solved by analogy with the results shown in the paper [16].

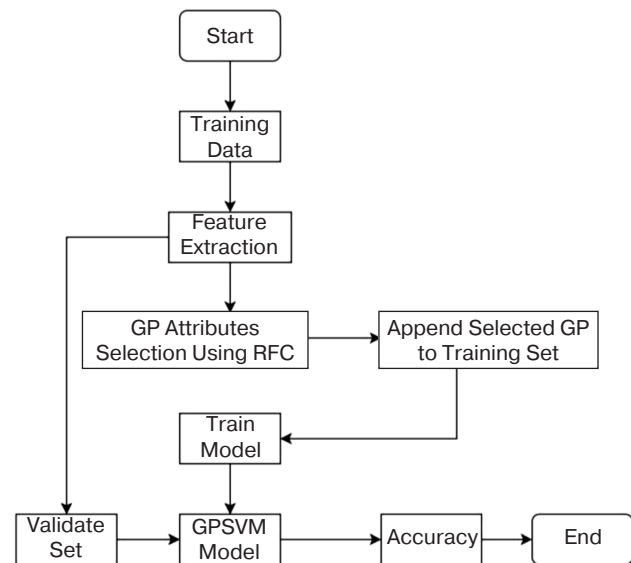


Fig. 1. Flowchart of GPSVM

In our proposed architecture, after carried out training on the CICIDS2017 dataset, features are extracted. For this purpose, datasets are divided into a valid dataset and a dataset that could not be validated, which is sent to genetic programming (GP) attribute selection using request for comments (RFC), after which the selected GP attribute is appended to the training set and sent to the trained model. After that, both datasets go to the GPSVM model to provide better accuracy. Figure 1 shows the flowchart of the GPSVM model as to how the dataset is entered as input to provide an output following its processing via the GPSVM model training set.

2. DATA ANALYSIS

The paper [9] introduced techniques to evaluate random under-sampling (RUS) and synthetic minority over-sampling techniques (SMOTE) and their combination to check the true positive rate of ID results. It shows that RUS gives the superlative performance over the SMOTE that improved results.

While there are a number of available datasets for detecting intrusion attacks, the best dataset as per ID attack is the CICIDS2017, which comprises eight separate files, each containing network activities that have data for five days. After adding eight files to CICIDS2017 dataset, it gives 2830743 instances, 15 classes, and 78 features without any replicated data [9, 14]. However, this dataset is extremely unstable due to the benign class comprising some 80.30% of the dataset. Table 1 shows the CICIDS2017 dataset class distribution with attack labels and the percentage of instances in it.

Below are the three common information that retrieves the evaluation metrics as in this form, precision (P), recall (R), and F-measure (F). Precision (P)

Table 1. CICIDS2017 dataset instances with attack details

No.	Label of attack	Instances	Percentage of total instances
1	Benign attack	2273097	80.3004
2	DoS hulk attack	231073	8.163
3	PortScan attack	158930	5.6144
4	DDoS attack	128027	4.5227
5	DoS Goldeneye attack	10293	0.3636
6	FTP Patator attack	7938	0.2804
7	SSH Patator attack	5897	0.2083
8	DoS Slowloris attack	5796	0.2048
9	DoS Slowhttptest attack	5499	0.1943
10	Bot attack	1966	0.0695
11	Web-Brute force attack	1507	0.0532
12	Web attack XSS	652	0.023
13	Infiltration attack	36	0.0013
14	Web attack-SQL injection attack	21	0.0007
15	Heartbleed attack	11	0.0004
	Total	2830743	100

represents the ratio of accurately classified attacks flow as true positive (TP) in the entire classified flows ($TP + FP$), where FP is false positive:

$$P = \frac{TP}{TP + FP}.$$

Recall (R) is also known as sensitivity, which is a ratio of accurately classified attack flows, i.e., TP , to the generated flows, i.e., ($TP + FN$), where FN is false negative:

$$R = \frac{TP}{TP + FN}.$$

F-measure is the harmonic measurement combination of recall and precision in the single measurement:

$$F = \frac{2}{\frac{1}{P} + \frac{1}{R}}.$$

At the time of execution, training, as well as testing process, is calculated to observe the execution. The weighted average of the three evaluations is considered as comprising a result in the form of (P , R , F) that provides the highest accuracy belonging to the renowned algorithms, i.e., k nearest neighbor (KNN), iterative dichotomizer 3 (ID3), and random forest (RF) methods.

3. RESULTS

In this paper, we have conducted some tests and compared the support vector machine (SVM) model and GPSVM and received better results with the

GPSVM model. Although, SVM gives a good result, GPSVM model gives more accuracy in comparison to the SVM model [17]. Table 2 shows the comparison of the confusion matrix in the SVM and GPSVM models, whereas Table 3 shows model accuracy and cross-validation mean score among the SVM and GPSVM models.

Table 2. Confusion matrix

Models	Confusion matrix
SVM	[[62697 88] [166 47663]]
GPSVM	[[62699 86] [73 47756]]

Table 3. Comparison of SVM and GPSVM models

Models	Model accuracy	Cross-validation mean score
SVM	0.99770726422368	0.9974415541592128
GPSVM	0.998562589334081	0.998499276484312

Figure 2 depicts the model accuracy (1) and cross-validation mean scores (2) to compare the SVM and GPSVM models, supporting the conclusion that the GPSVM model works better than any other current alternative. In order to test both the SVM and GPSVM models, we used the CICIDS2017 dataset for making IDS better to track down intrusion attacks and reduce the attack scenario.

Figure 3 shows important features in the GPSVM model. In our proposed model, the model accuracy enhances the IDS from being vulnerable and gives better output compared to other models.

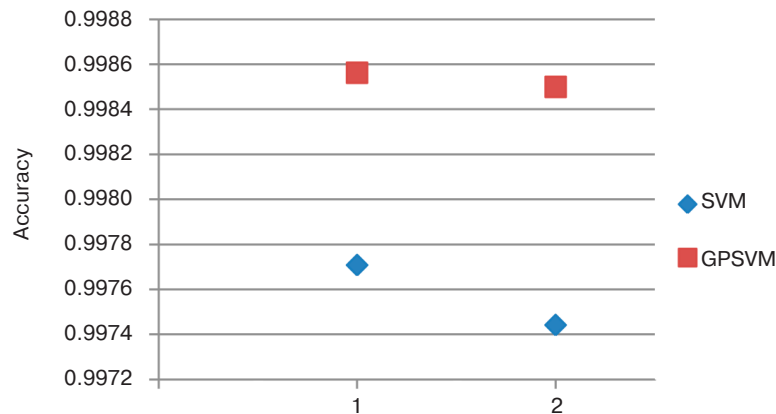


Fig. 2. Comparison of GPSVM and SVM models:
1—model accuracy; 2—cross-validation mean score

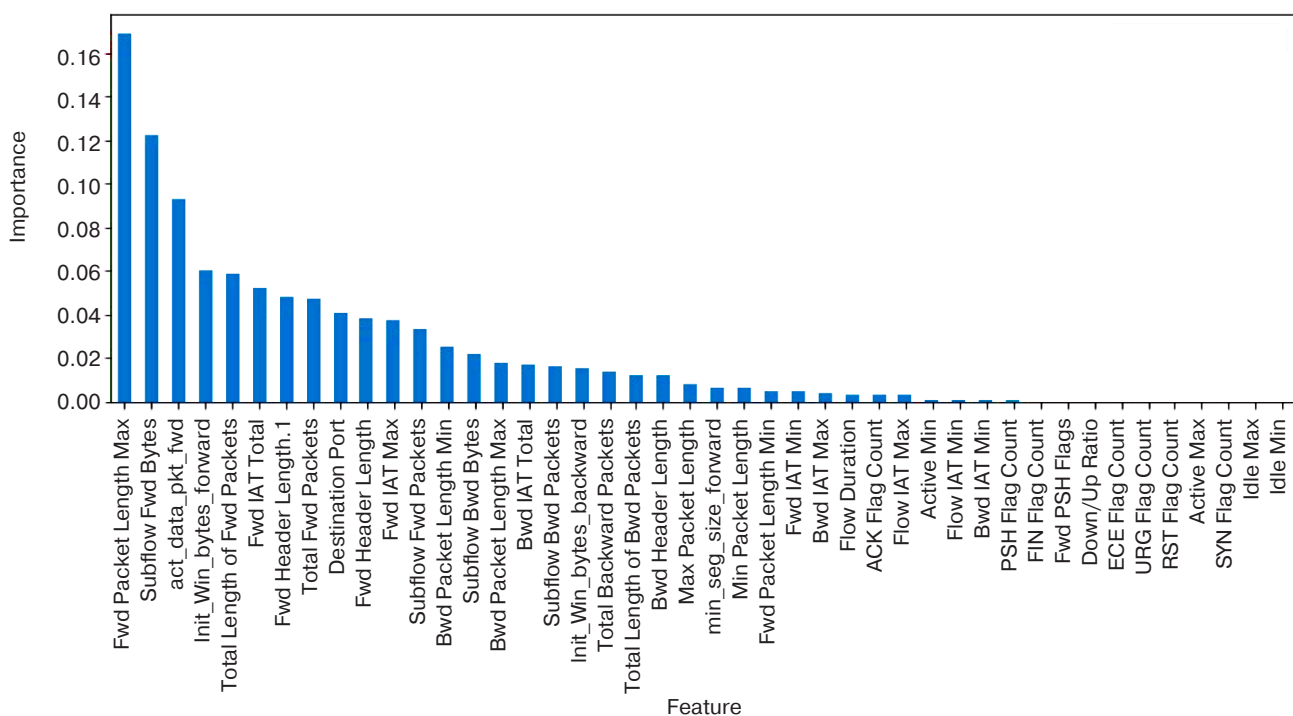


Fig. 3. Important features in the GPSVM model

4. CONCLUSIONS

The presented GPSVM model is concluded to offer an improved approach to tracking intrusion detection that helps to exploit vulnerable systems. This model provides enhanced accuracy for detecting intrusion attacks. In the future, testing this model using a wider variety of resources, along with real-time systems will help to improve the integration of the GPSVM feature extraction technique to develop an improved model version. This will aid IDSs development to improve the reliability of intrusion-detecting machines for various intrusion types. The proposed approach can be used as part of a cloud service for monitoring cyber-attacks using neuro-fuzzy formalism.

ACKNOWLEDGMENTS

The reported was funded by the Russian Foundation for Basic Research, No. 21-57-54002, and Vietnam Academy of Science and Technology, No. QTRU01.14/21-22, 2021.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work. All authors approved the final text of the manuscript for publication.

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в исследование. Все авторы прочитали и согласны с окончательным текстом статьи.

REFERENCES

1. Koch R., Golling M., Rodosek G.D. Towards comparability of intrusion detection systems: New data sets. In: *TERENA Networking Conference (TNC)*. 2014. V. 7.
2. Nehinbe J.O. A critical evaluation of datasets for investigating IDSs and IPSs researches. In: *2011 IEEE 10th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems (CIS)*. IEEE; 2011. P. 92–97. <https://doi.org/10.1109/CIS.2011.6169141>
3. Shiravi A., Shiravi H., Tavallaee M., Ghorban A.A. Toward developing a systematic approach to generate benchmark datasets for intrusion detection. *Computers & Security*. 2012;31(3):357–374. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2011.12.012>
4. Ghorbani A.A., Lu W., Tavallaee M. Detection approaches. In: *Network Intrusion Detection and Prevention*. Boston, MA: Springer; 2010. P. 27–53. https://doi.org/10.1007/978-0-387-88771-5_2
5. Scott P.D., Wilkins E. Evaluating data mining procedures: techniques for generating artificial data sets. *Inf. Softw. Technol.* 1999;41(9):579–587. [https://doi.org/10.1016/S0950-5849\(99\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0950-5849(99)00021-X)
6. Heidemann J., Papadopoulos C. Uses and challenges for network datasets. In: *2009 Cybersecurity Applications & Technology Conference for Homeland Security*. IEEE; 2009. P. 73–82. <https://doi.org/10.1109/CATCH.2009.29>
7. Gharib A., Sharafaldin I., Lashkari A.H., Ghorbani A.A. An evaluation framework for intrusion detection dataset. In: *2016 International Conference on Information Science and Security (ICISS)*. IEEE; 2016. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICISSEC.2016.7885840>
8. Sharafaldin I., Gharib A., Lashkari A.H., Ghorbani A.A. Towards a reliable intrusion detection benchmark dataset. *Software Networking*. 2018;2017(1):177–200. <https://doi.org/10.13052/jsn2445-9739.2017.009>
9. Ho Y.B., Yap W.S., Khor K.C. The effect of sampling methods on the CICIDS2017 network intrusion data set. In: Kim H., Kim K.J. (Eds.). *IT Convergence and Security. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer; 2021. V. 782. P. 33–41. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4118-3_4
10. Sharafaldin I., Lashkari A.H., Ghorbani A.A. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP)*. 2018. P. 108–116. <https://doi.org/10.5220/0006639801080116>
11. Bashir T., Agbata B.C., Ogala E., Obeng-Denteh W. The fuzzy experiment approach for detection and prevention of masquerading attacks in online domain. *East African Sch. J. Eng. Comput. Sci.* 2020;3(10):205–215. <https://doi.org/10.36349/easjecs.2020.v03i10.001>
12. Fang Y., Zhang C., Huang C., Liu L., Yang Y. Phishing email detection using improved RCNN model with multilevel vectors and attention mechanism. *IEEE Access*. 2019;7:56329–56340. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913705>
13. Zhu E., Ju Y., Chen Z., Liu F., Fang X. DTOF-ANN: An artificial neural network masquerading detection model based on decision tree and optimal features. *Appl. Soft Comput.* 2020;95:106505. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106505>
14. Lashkari A.H., Draper-Gil G., Mamun M.S.I., Ghorbani A.A. Characterization of tor traffic using time-based features. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP)*. 2017, February. P. 253–262. <https://doi.org/10.5220/0006105602530262>
15. Nazarov A.N., Sychev A.K., Voronkov I.M. The role of datasets when building next generation intrusion detection systems. In: *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE; 2019. <https://doi.org/10.1109/WECONF.2019.8840124>
16. Pantiukhin D., Nazarov A., Voronkov I.M. Intelligent methods for intrusion detection in local area networks. In: Pozin B., Cavalli A.R., Petrenko A. (Eds.). *Actual Problems of System and Software Engineering. Proceedings of the 6th International Conference (APSSE 2019)*. Moscow; 2019. P. 138–149. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2514/paper84.pdf>
17. Dhoot A., Zong B., Saeed M.S., Singh K. Security analysis of private intellectual property. In: *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*. IEEE; 2021. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH53459.2021.9619179>

About the authors

Anshita Dhoot, Postgraduate Student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) (9, Institutskii per., Moscow oblast, Dolgoprudny, 141701 Russia). E-mail: anshita.dhoot@phystech.edu. <https://orcid.org/0000-0002-5024-6194>

Alexey N. Nazarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: a.nazarov06@bk.ru. ResearcherID G-3154-2013, Scopus Author ID 7201780424, RSCI SPIN-code 6032-5302, <https://orcid.org/0000-0002-0497-0296>

Iliia M. Voronkov, Visiting Lecturer, HSE University (11, Pokrovskii bul., Moscow, 109028 Russia); Deputy Head, Center for Neural Network Technologies, International Center for Informatics and Electronics (19, Presnenskii val, Moscow, 123557 Russia). E-mail: ivoronkov@hse.ru. ResearcherID L-6207-2016, Scopus Author ID 24802429000, RSCI SPIN-code 3869-9670, <https://orcid.org/0000-0002-1552-5083>

Об авторах

Дхут Аншита, аспирант, ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9). E-mail: anshita.dhoot@phystech.edu. <https://orcid.org/0000-0002-5024-6194>

Назаров Алексей Николаевич, 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: a.nazarov06@bk.ru. ResearcherID G-3154-2013, Scopus Author ID 7201780424, SPIN-код РИНЦ 6032-5302, <https://orcid.org/0000-0002-0497-0296>

Воронков Илья Михайлович, приглашенный преподаватель, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (109028, Россия, Москва, Покровский бульвар, д. 11); заместитель начальника, Центр нейросетевых технологий, Международный центр по информатике и электронике (123557, Россия, Москва, ул. Пресненский Вал, д. 19). E-mail: ivoronkov@hse.ru. ResearcherID L-6207-2016, Scopus Author ID 24802429000, SPIN-код РИНЦ 3869-9670, <https://orcid.org/0000-0002-1552-5083>

The text was submitted by the authors in English

Edited for English language and spelling by Thomas A. Beavitt

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

УДК 007.52; 004.89
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Принципы построения и экспериментальные исследования прототипного образца многоагентной робототехнической системы для разбора завалов

С.В. Манько[@],
В.М. Лохин,
С.А.К. Диане

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

Резюме

Цели. В статье обоснованы актуальность создания и перспективы применения многоагентных робототехнических систем для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Целью работы является проверка практической реализуемости алгоритмов управления группой автономных роботов при решении многоэтапных прикладных задач.

Методы. Используются положения теории конечных автоматов в задачах планирования действий многоагентной системы, методы автоматического управления при организации целенаправленного движения роботов-исполнителей, методы машинного зрения в задачах поиска и анализа формы завала.

Результаты. Описаны принципы построения, архитектура и состав программно-алгоритмического обеспечения прототипного образца многоагентной робототехнической системы, разработанной в РТУ МИРЭА в рамках проведения комплексных исследований развития средств и методов группового управления роботами. Рассмотрена многоэтапная задача поиска и устранения завалов. Предложенный алгоритм планирования действий робототехнических агентов определяет временную очередность выполнения этапов данной задачи. Распределение заданий между роботами-исполнителями производится с учетом оценок их пригодности. Автономное функционирование робототехнических агентов определяется командами, поступающими с уровня группового управления, а также априорно заложенной базой знаний со сценарными моделями целесообразных действий. Компенсация неопределенностей внешней среды локального характера в процессе движения роботов базируется на комплексном анализе визуальной и навигационной информации. Наряду с основными элементами многоагентной системы дано описание разработанной инфраструктуры аппаратно-программных средств визуальной навигации и беспроводной связи.

Выводы. Результаты экспериментальных исследований показали эффективность развиваемых подходов к созданию интеллектуальных технологий группового управления автономными роботами на примере задач поиска и разбора завалов. Подтверждена возможность практической реализации многоагентной робототехнической системы на основе разработки и интеграции ряда информационно-управляющих и инфраструктурных подсистем.

Ключевые слова: автономный робот, интеллектуальное управление, групповое управление, многоагентная робототехническая система, разбор завалов

• Поступила: 11.02.2022 • Доработана: 11.03.2022 • Принята к опубликованию: 12.09.2022

Для цитирования: Манько С.В., Лохин В.М., Диане С.А.К. Принципы построения и экспериментальные исследования прототипного образца многоагентной робототехнической системы для разбора завалов. *Russ. Technol. J.* 2022; 10(6):28–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Prototype multi-agent robotic debris removal system: principles of development and experimental studies

Sergey V. Manko[@],
Valery M. Lokhin,
Sekou Abdel Kader Diane

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The article substantiates the relevance of the creation and the prospects of application of multi-agent robotic systems for elimination of consequences of emergency situations. The purpose of this work was to test the practical feasibility of algorithms for controlling a group of autonomous robots when performing multi-stage missions.

Methods. The theses of the finite automata theory in planning actions of a multi-agent system, methods of automatic control in organizing a goal-directed movement of robots, and methods of computer vision in searching and analyzing debris geometry were used.

Results. The principles of development, architecture, and composition are described for the software and algorithms of a prototype of the multi-agent robotic system created at RTU MIREA as part of integrated research for the creation of tools and methods of group control of robots. The multi-stage task of searching and removing debris in the process of eliminating the consequences of emergency situations is analyzed. A proposed algorithm for planning the actions of robotic agents determines the time sequence of the mission stages. Tasks are allocated among the performing robots according to assessments of their suitability. The autonomous functioning of robotic agents is determined by commands coming from the group control level, as well as an a priori embedded knowledge base with scenario models of appropriate actions. Compensation of local environmental uncertainties in the process of robot movement is based on a comprehensive analysis of visual and navigation information. Along with the main elements of the multi-agent system, the developed infrastructure of hardware and software for visual navigation and wireless communication is described.

Conclusions. The results of the experimental studies demonstrated the efficiency of the developed approaches to the creation of intelligent technologies for group control of autonomous robots on the example of debris search and removal tasks. The feasibility of the multi-agent robotic system is demonstrated by the development and integration of a number of information management and infrastructure subsystems.

Keywords: autonomous robot, intelligent control, group control, multi-robot system, debris removal

• Submitted: 11.02.2022 • Revised: 01.03.2022 • Accepted: 12.09.2022

For citation: Manko S.V., Lokhin V.M., Diane S.A.K. Prototype multi-agent robotic debris removal system: principles of development and experimental studies. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):28–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>

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

Актуальность проблематики многоагентных робототехнических систем (МАРС), активный интерес к которым неуклонно возрастает с начала XXI в., определяется широкими перспективами их применения в различных прикладных областях. Основные преимущества совместного использования автономных роботов в составе объединенной группировки связаны с существенным повышением эффективности выполнения поставленных задач за счет объединения функциональных возможностей и ресурсов при организации необходимых взаимодействий.

Исследованию проблем и разработке технологий группового управления автономными роботами во всем мире придается приоритетное значение, а реальные практические результаты, полученные в США и ряде других стран, носят опережающий характер [1, 2].

Программы аналогичных работ в России до определенного момента имели значительное отставание от зарубежного уровня. Однако реализация национальной стратегии научно-технологического развития, одной из главных целей которой является переход к передовым интеллектуальным и роботизированным технологиям, обеспечила резкую активизацию теоретических и экспериментальных исследований соответствующей направленности. Эти исследования выполняются в целом ряде научно-исследовательских центров, академических институтов, проектно-конструкторских организаций и университетов [3–5]. Фундаментальные и прикладные заделы, формируемые на этом фоне силами российской научной школы, в части предлагаемых постановок и решений не только соответствуют современным мировым трендам, но и начинают находить свое практическое воплощение в практических разработках, связанных с созданием интеллектуальных систем управления автономными роботами и многоагентными группировками.

Так, в частности, обобщение результатов, полученных в РТУ МИРЭА в рамках исследовательского проекта «Методы, модели и алгоритмы группового управления автономными роботами на основе комплексного применения аппарата теории конечных автоматов», позволило разработать экспериментальный прототип МАРС для отработки технологий

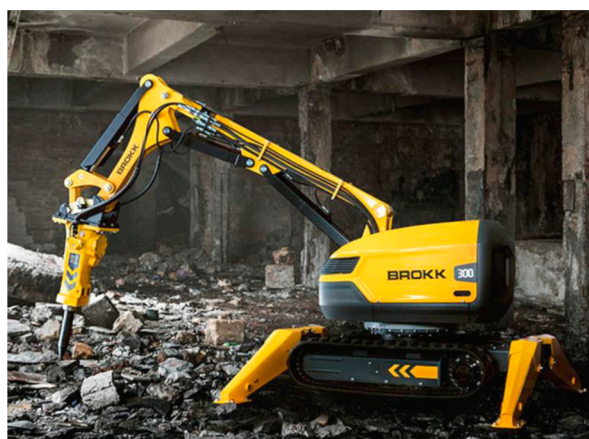
автоматического поиска и разбора завалов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

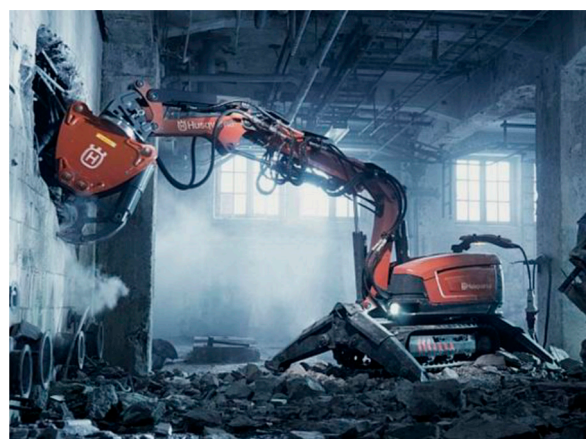
Анализ чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера показывает, что одним из наиболее характерных проявлений их последствий являются масштабные разрушения и завалы, сложности ликвидации которых зачастую усугубляются наличиемотягчающих факторов, связанных с возникновением пожаров, очагов заражения местности и т.д. В этих условиях, когда привлечение человеческих ресурсов может иметь ограниченные объемы или представляется вообще невозможным, применение автономных роботов и, в особенности МАРС, становится единственно оправданной альтернативой.

Очевидно, что многоагентные системы для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, автоматического разбора завалов и решения других задач подобного характера должны формироваться из числа специализированных образцов автономных роботов соответствующего типа [6, 7]. Многие российские и иностранные производители предлагают широкую номенклатуру многофункциональных телеуправляемых мобильных роботов инженерного назначения (с развитым сенсорным оснащением, сменным набором инструмента и навесного оборудования) (рис. 1). Подобные роботы потенциально могут использоваться в составе многоагентных систем для разбора завалов при условии необходимой модернизации средств управления для обеспечения режимов автономной работы и приема/передачи данных по каналам беспроводной сетевой связи.

Основные требования к функциональным возможностям МАРС связаны с необходимостью анализа поставленной прикладной задачи, ее декомпозиции на множество подзадач или составных технологических операций и их последующего выполнения в автономном режиме совместными усилиями отдельных исполнителей, координирующих свои действия [8–10]. Создание таких систем,



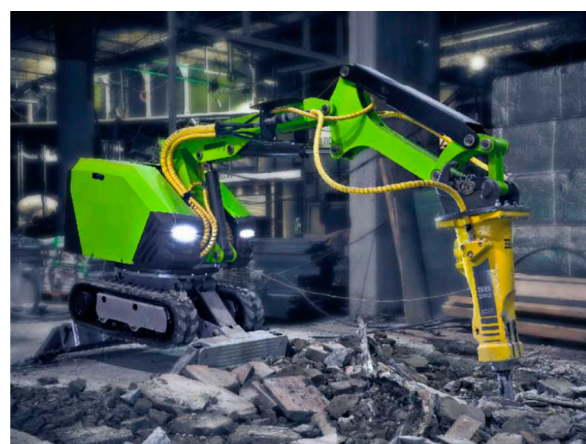
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 1. Образцы специализированных роботов инженерного назначения с телеоператорным управлением: (а) «Brokk 300» (Brokk, Швеция); (б) «Husqvarna 310» (Husqvarna, Швеция); (в) «РОИН» Р-070 (Интехрос, Россия); (г) «Бетонолом 2000» (Роботехникс, Россия)

в полной мере отвечающих предъявляемым к ним требованиям, сопряжено с решением следующих ключевых проблем:

- организации развитого человеко-машинного интерфейса, позволяющего обеспечить оперативную постановку общей прикладной задачи;
- организации целесообразного взаимодействия между отдельными агентами в интересах выполнения общей прикладной задачи;
- обеспечения автономности агентов и системы в целом.

В свою очередь, проблема организации целесообразных взаимодействий между активными элементами в составе МАРС охватывает две важнейшие составляющие:

- планирование координированных действий агентов (исходя из анализа поставленной прикладной задачи, процесса ее выполнения и имеющихся ресурсов) с последующим формированием и выдачей соответствующих заданий;
- обеспечение информационно-логического взаимодействия и совместимости агентов (как на уровне использования единых форматов

представления данных, систем сообщений, команд и целеуказаний, так и на уровне технических каналов их передачи).

Анализ выявленных проблем показывает, что интеграция потенциальных подходов к их решению в рамках единой системы предполагает необходимость ее построения в соответствии со следующими принципами:

- общность целей функционирования агентов;
- адекватность интеллектуальных и функциональных возможностей агентов сложности решаемых задач;
- общность информационного пространства системы;
- взаимная информационно-логическая совместимость агентов.

Следует отметить, что одна из наиболее острых проблем при создании и внедрении МАРС связана с формированием порядка и способов совместного прикладного применения автономных роботов [9, 11] в сочетании с разработкой адекватного набора программно-алгоритмических средств группового управления с их последующей верификацией и отладкой.

ПОРЯДОК И СПОСОБЫ ЦЕЛЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

Эффективность целевого применения МАРС в общем случае будет во многом определяться рациональностью выполняемых ею действий по решению требуемой прикладной задачи. Соответствующий сценарий, определяющий порядок и способы применения МАРС для автоматического поиска и разбора завалов, представлен на рис. 2 и предполагает поэтапное проведение следующей совокупности необходимых операций:

- выдвижение имеющихся роботов к назначенной точке исходного сбора в зоне чрезвычайной ситуации из мест их оперативной доставки или постоянного размещения;
- уточнение общей обстановки, оценка произошедших разрушений и определение параметров их дислокации с помощью одного или нескольких специализированных роботов поисково-разведывательного назначения;
- целенаправленное перемещение МАРС в зону дислокации обнаруженных завалов;
- автоматический послойный разбор завалов с распределением операций по отдельным исполнителям из состава МАРС.

Анализ сценария показывает, что реализация последнего этапа предполагает разработку специализированных программных средств, обеспечивающих не только обработку визуальной информации для установления параметров положения наблюдаемых элементов завала, но и автоматический синтез модели проведения демонтажа его верхнего слоя.

ОБОБЩЕННАЯ АРХИТЕКТУРА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

Разработанный комплекс программно-алгоритмических средств, архитектура которого показана на рис. 3, обеспечивает реализацию всех необходимых функций по обработке информации и интеллектуальному управлению МАРС, ориентируемых на выполнение операций автоматического поиска и разбора завалов и формируемых из числа автономных мобильных роботов с бортовым манипулятором и развитым сенсорным оснащением. Основными структурными элементами комплекса, построенного по блочно-модульному принципу на основе современных технологий обработки знаний, являются подсистема человеко-машинного интерфейса, подсистема интеллектуального планирования и распределения заданий в составе МАРС, а также подсистемы интеллектуального управления автономными роботами.

Программное обеспечение подсистемы интеллектуального планирования заданий в составе МАРС включает следующий набор основных функциональных модулей:

- базу знаний со сценарными моделями выполнения прикладных задач, создаваемыми по описанию оператора [9, 10] либо в автоматическом режиме (на основе информации о структуре наблюдаемого завала) [12] с использованием аппарата конечных автоматов;
- модуль обобщения сенсорной информации для формирования структурной модели наблюдаемого завала;

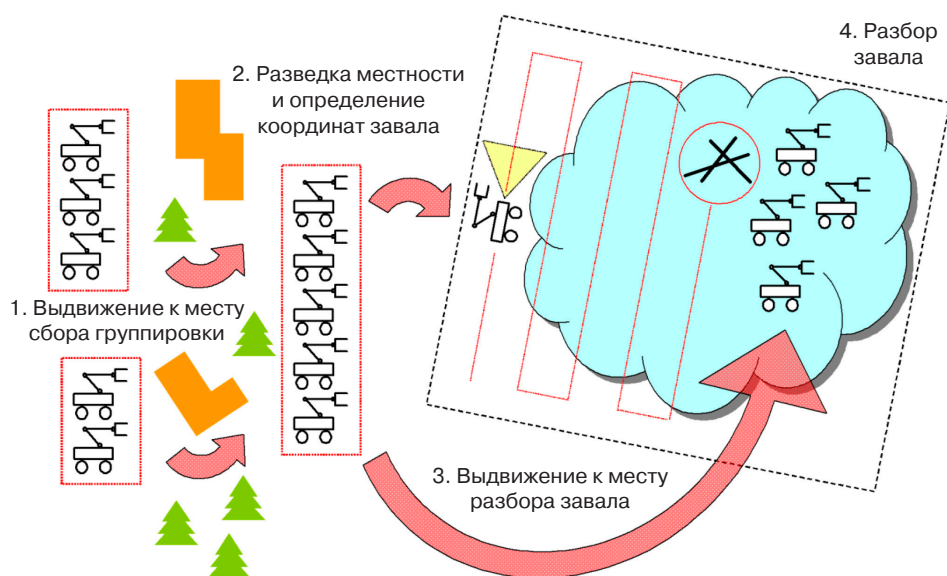


Рис. 2. Обобщенный сценарий функционирования МАРС при выполнении задач автоматического поиска и разбора завалов в составе мероприятий по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций

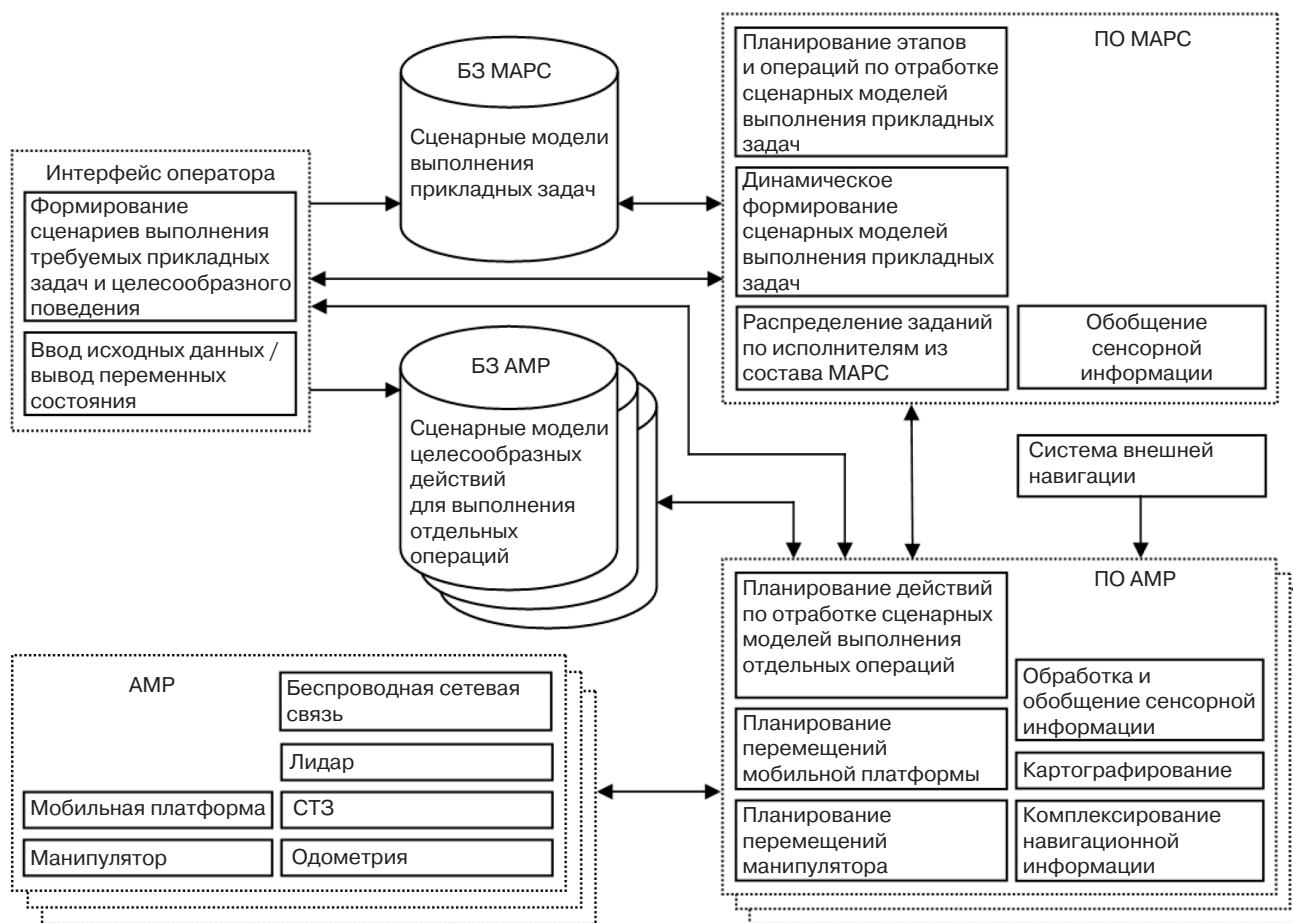


Рис. 3. Обобщенная архитектура комплекса программно-алгоритмических средств демонстрационного образца МАРС для автоматического поиска и разбора завалов. АМР – автономный мобильный робот; БЗ АМР – база знаний автономного мобильного робота; СТЗ – система технического зрения

- модуль динамического формирования сценарных моделей послойного разбора выявляемых завалов на основе аппарата конечных автоматов [12];
- модуль интеллектуального планирования этапов и операций по отработке сценарных моделей поставленных прикладных задач [9, 10];
- модуль распределения заданий между роботами из состава объединенной группировки на основе алгоритмов многокритериальной оценки полезности потенциальных исполнителей [9].

В свою очередь, подсистемы интеллектуального управления автономными роботами, входящими в состав МАРС, объединяет следующий состав программного обеспечения:

- база знаний с априорно заложенными сценарными моделями отработки отдельных операций, построенными на основе аппарата конечных автоматов;
- модуль интеллектуального планирования целесообразных действий на основе обработки сценарных моделей выполнения тех или иных операций [13];

- библиотека программных средств для планирования перемещений подвижной платформы и манипулятора (на основе избирательного использования ряда специализированных алгоритмов, таких, как A^* , потенциальных полей, быстрорастущих случайных деревьев (RRT) и др.), а также для решения задач картографирования (на основе алгоритмов SLAM) [14];
- модуль комплексирования одометрической информации и данных системы внешней навигации;
- модуль обработки и обобщения сенсорной информации от бортовой видеокамеры и лазерного сканирующего дальномера для оценки и распознавания внешней обстановки.

Бортовые подсистемы управления исполнительными устройствами автономных роботов обеспечивают отработку множества командных уставок, формируемых вышестоящей подсистемой.

Подсистема человеко-машинного интерфейса объединяет широкий набор программно-инструментальных средств для контроля работоспособности и текущего состояния МАРС, постановки целей

и задач ее функционирования, формирования сценарных моделей выполнения заданий и управления роботами, а также мониторинга телеметрической информации о ходе и результатах проводимых ими операций [15].

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОБРАЗЕЦ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

Создание демонстрационного образца МАРС ставило своей целью принципиальную отработку интеллектуальных технологий группового управления автономными роботами на примере задач автоматического поиска и разбора завалов в ходе натурных экспериментов с имитацией соответствующих условий на специализированном испытательном полигоне. В качестве условного прототипа автономных роботов инженерного назначения, объединяемых в составе многоагентной системы для автоматического поиска и разбора завалов, используется мобильная платформа «KUKA youBot» (KUKARoboter, Германия), которая построена по схеме «манипулятор на подвижном основании» и оснащается лазерным сканирующим дальнометром, стерео-видеокамерой, устройствами беспроводной сетевой связи (рис. 4) и программно-алгоритмическим обеспечением для поддержания режимов автономного функционирования и группового управления.

Закрытые помещения полигона оборудованы набором из 16 IP-видеокамер «Beward BD3670M» (НПП «Бевард», Россия), равномерно размещаемых под потолком на высоте 4 м и используемых как для непосредственного определения координат положения наблюдаемых подвижных объектов в пределах общего интегрированного навигационного поля (рис. 5), так и в целях эмуляции систем спутниковой навигации. Информационное взаимодействие автономных роботов в составе объединенной группировки реализуется по каналам беспроводной сетевой связи в соответствии со стандартами технологии Wi-Fi с использованием протоколов TCP/IP. При этом единство общего информационного пространства МАРС обеспечивается интеграцией сетевой инфраструктуры аппаратно-программных средств систем беспроводной связи и внешней визуальной навигации, как показано на рис. 6.

Оперативная постановка прикладной задачи и контроль за ходом ее выполнения осуществляется с помощью специализированных опций на панели интерфейса оператора (рис. 7), выводимой на экран монитора центрального компьютера.

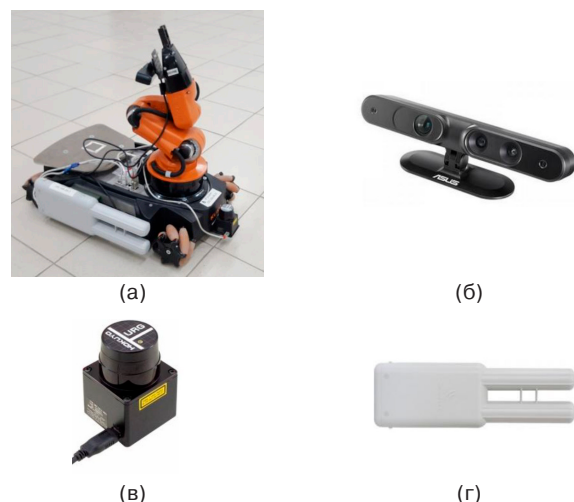


Рис. 4. Мобильный робот «KUKA youBot» с бортовым комплектом информационно-измерительных средств: (а) автономная транспортная платформа; (б) RGBD видеокамера «AsusXtionProLive» (AsusTek Computer Inc., Китай); (в) лазерный сканирующий дальнометр «Hokuyo URG 04LX UG01» (Hokuyo Automatic Co., Япония); (г) беспроводная точка доступа «MikroTik OmniTik UPA-5HnD» (MikroTik, Латвия)

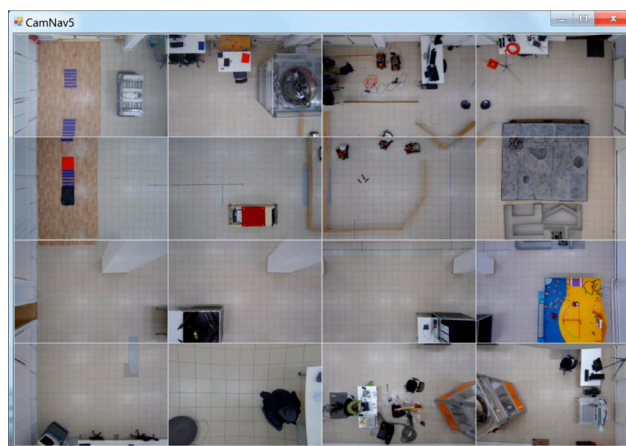


Рис. 5. Интегрированное поле системы визуальной навигации

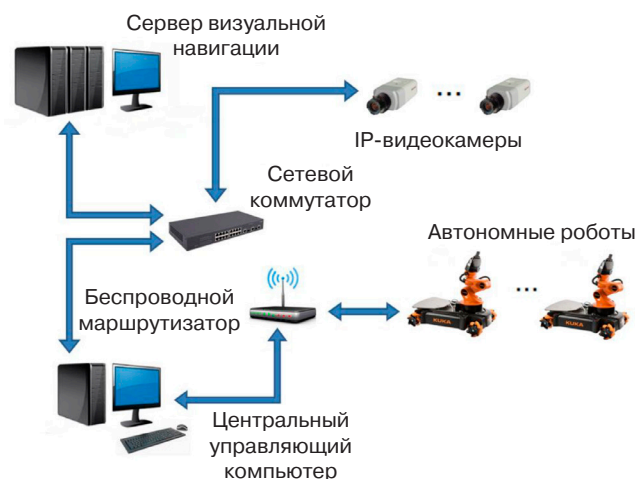


Рис. 6. Объединенная сетевая инфраструктура аппаратно-программных средств системы визуальной навигации и беспроводной связи

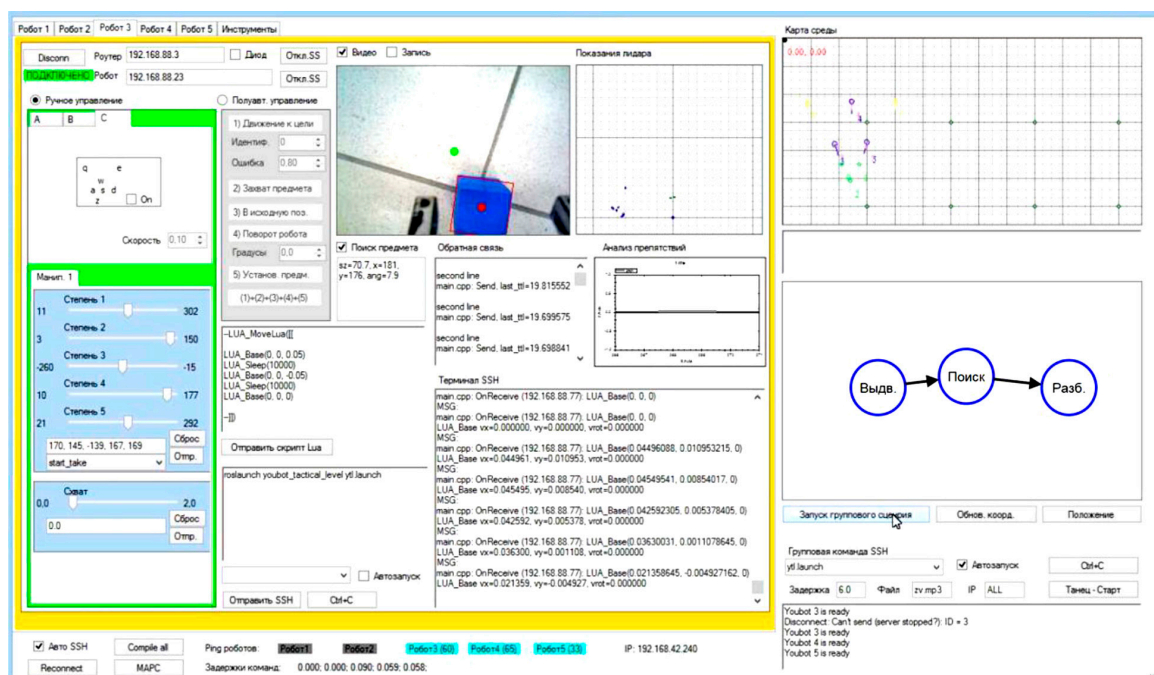


Рис. 7. Интерактивная панель интерфейса оператора демонстрационного образца MAPCS для автоматического поиска и разбора завалов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАТУРНАЯ ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

Серия запланированных экспериментов по натурной отработке программно-алгоритмических средств группового управления автономными роботами для автоматического поиска и разбора завалов выполнялась на примере макетирования последствий чрезвычайной ситуации с условной имитацией зоны разрушений и завалов (рис. 8) на специализированном испытательном полигоне Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА.

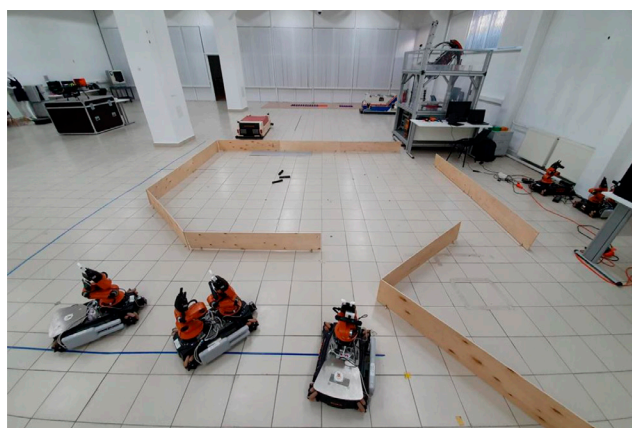


Рис. 8. Макет сцены для проведения экспериментов по автоматическому поиску и разбору завалов с использованием MAPCS

Постановка задачи, осуществляемая оператором с использованием интерактивных средств человеко-машинного интерфейса (рис. 7), предполагает формирование сценарного графа, узлы и дуги которого регламентируют состав и очередность основных этапов предстоящей к выполнению прикладной миссии. При этом с каждым из узлов создаваемого графа ассоциируется набор данных, определяющих параметры проведения соответствующего этапа. В случае необходимости в числе ассоциируемых данных указываются ссылки на привлекаемые алгоритмы или имена вложенных сценарных графов.

Подготовка и спецификация сценарных графов обеспечивает автоматическое построение формализованной модели решаемой прикладной задачи в виде соответствующей сети конечных автоматов, обеспечивающей реализацию контрольно-управляющих функций планирования поведения и целесообразных действий автономных роботов в составе MAPCS.

Так, в частности, постановка прикладной задачи, которая стоит перед MAPCS в рамках проводимых экспериментов, потребовала формирования сценарного графа с последовательным включением этапов выдвижения роботов к месту сбора, поиска и последующего разбора завала, как показано на рис. 8.

Важно отметить, что параметры проведения второго этапа, связанного с разведкой местности, предусматривают два возможных исхода, когда отрицательный результат поиска приводит к завершению всей миссии, в то время как обнаружение завала обуславливает переход к следующей стадии выполнения поставленной задачи.

В свою очередь, последний этап задается вложенным сценарным графом с циклическим повторением операций распознавания структуры верхнего слоя завала, динамического синтеза его модели и планирования операций демонтажа вплоть до последнего составного элемента.

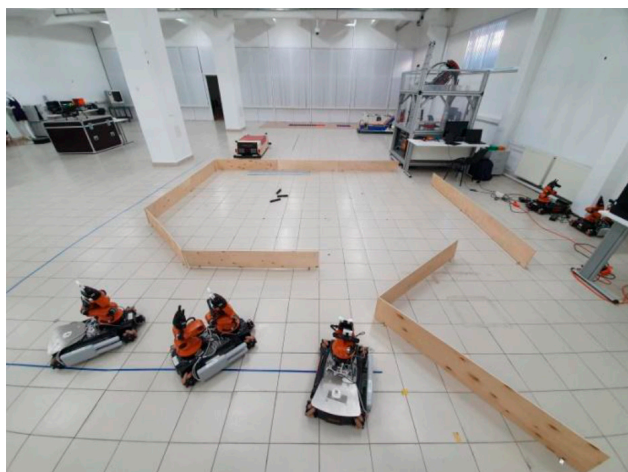
Завершающая стадия постановки задачи связана с инициализацией роботов, указанием их сетевых адресов и параметров функционирования, вводом координат места первоначального сбора и зоны последующей работы.

Запуск MAPC, осуществляемый по команде оператора, обеспечивает переход к непосредственному выполнению поставленной прикладной задачи в автоматическом режиме функционирования в соответствии с оперативно-введенными и априорно-заложенными сценариями автономного и группового управления.

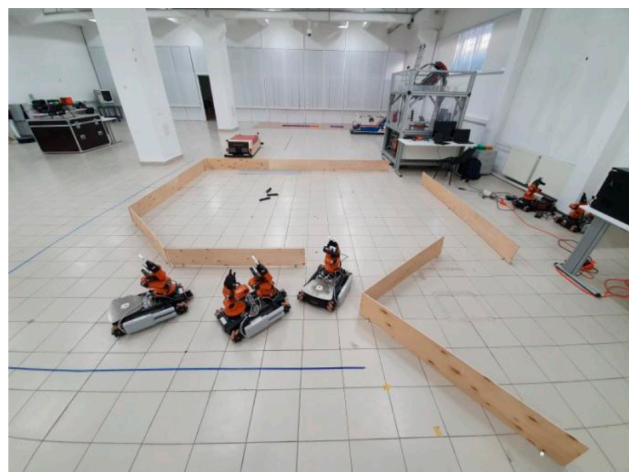
На рис. 9–11 показаны основные фрагменты одного из натурных экспериментов по отработке методов и технологий группового управления автономными роботами, действующими в составе MAPC

при совместном выполнении общей прикладной задачи по автоматическому поиску и разбору завала.

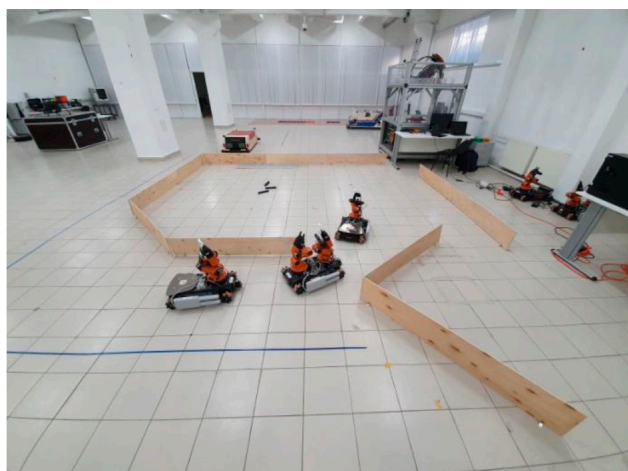
Так, рис. 9а–9г подробно отражает процесс выполнения первого этапа поставленной задачи, связанного с выдвиганием автономных роботов к назначенному месту сбора. Прокладка маршрута их целенаправленного движения обеспечивается алгоритмами A* [16] и RRT [17], в то время как планирование перемещений с учетом условий поддержания конфигурации «конвой» осуществляется с помощью алгоритмической реализации метода «потенциальных полей» [18] и средств обработки визуальной, дальномерической и навигационной информации. Выбор используемых алгоритмов предопределяется сценарием выполнения поставленной задачи на уровне соответствующих ссылок, установленных при спецификации параметров проведения данного этапа. Выход роботов к назначенному месту сбора, подтвержденный по каналам беспроводной сетевой связи, служит не только фактическим подтверждением успешного завершения текущего этапа выполняемой задачи, но и сигналом



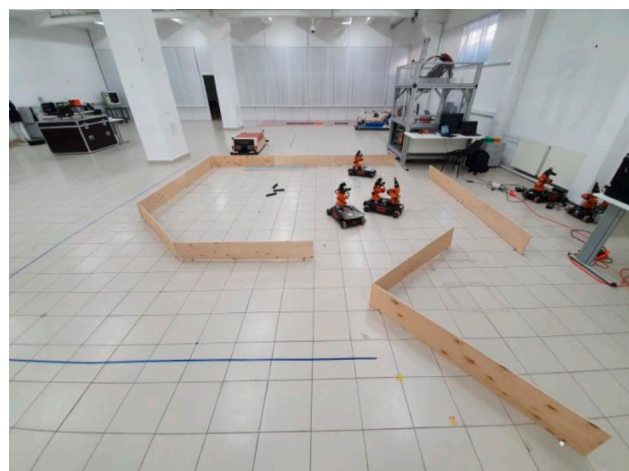
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 9. Передвижение группы автономных роботов с поддержанием конфигурации строя типа «конвой» при выходе к назначенному месту сбора MAPC

о переходе к ее следующей фазе. При этом текущее состояние роботов и выполняемой ими задачи отображается на панели интерфейса оператора.

Рис. 10 иллюстрирует второй этап выполнения поставленной задачи, связанный с разведкой местности и поиском завала.

Выбор робота, используемого в этих целях, осуществляется по критерию подходящего функционала или наименьшего порядкового номера (при прочих равных условиях), а полнота осмотра заданной области определяется сценарием планирования и отработки поисковых движений с привлечением алгоритма A^* и средств обработки визуальной, дальнометрической и навигационной информации. Порядок необходимых действий регламентируется сценарием выполнения поставленной задачи, а также сценарием проведения поисково-разведывательных операций, априорно заложенным в базы знаний интеллектуальных систем управления автономными роботами.

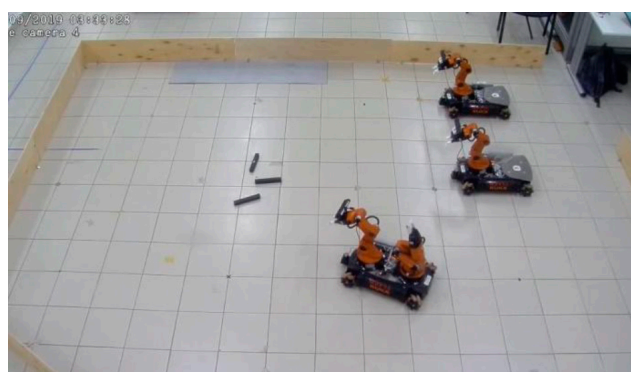
Критерием выявления завала служит превышение критического количества элементов разрушений на единице площади, определяемое по результатам обработки данных с бортового комплекса информационно-измерительных средств робота.

Обнаружение завала позволяет перейти к третьему этапу поставленной задачи, связанному с разбором и эвакуацией найденных объектов, как показано

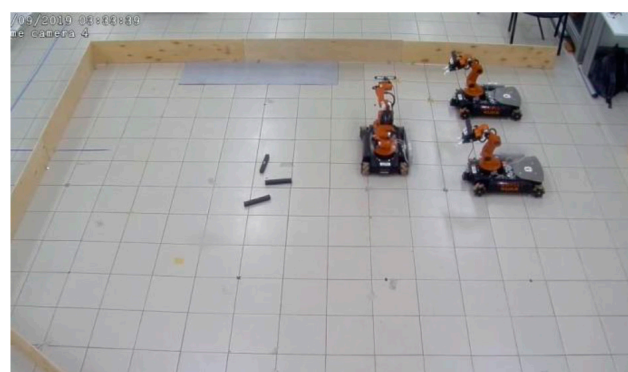
на рис. 11а–11г. Вложенный сценарий его проведения предполагает необходимость циклического повторения процедур обработки изображений, анализа и восстановления структуры верхнего слоя завала, а также динамического построения сценарной модели разбора выделенных элементов.

Формирование такой модели на основе использования аппарата конечных автоматов позволяет обеспечить планирование послойного разбора завала с оперативной выдачей упорядоченного набора заданий по его реализации с указанием удаляемых элементов и параметров их пространственного положения.

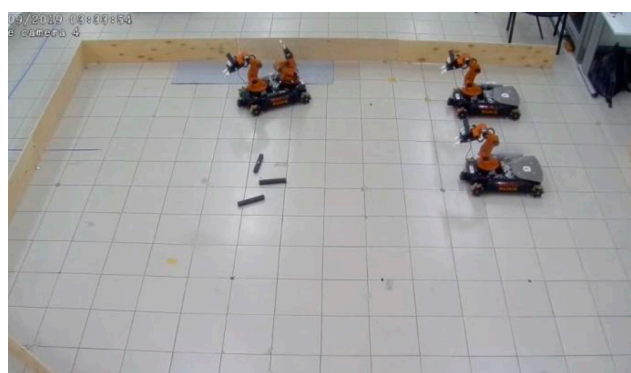
Распределение заданий между роботами осуществляется, исходя из оценок статуса их текущей занятости и степени удаленности по отношению к месту проведения соответствующих операций. Сформированные назначения передаются по каналам беспроводной сетевой связи выбранным адресатам из состава МАРС. Выполнение полученных заданий регламентируется набором сценарных моделей, априорно заложенных в состав бортовой базы знаний интеллектуальной системы управления каждого из роботов и определяющих порядок проведения необходимых операций по захвату и эвакуации указанных элементов завала на основе комбинированного использования целого ряда соответствующих алгоритмов. Так, планирование локальных



(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 10. Функционирование МАРС при выполнении операции разведки местности: (а), (б) выбор робота для поиска завала; (в) поисковые движения робота в ходе проведения разведки; (г) обнаружение завала по результатам обработки изображений с бортовой телекамеры робота

перемещений мобильной платформы и установленного на ней манипулятора осуществляется на основе алгоритмической реализации метода быстро-растущих случайных деревьев (RRT). Прокладка маршрутов целенаправленного движения мобильной платформы обеспечивается алгоритмом A*. Обход подвижных препятствий при перемещении робота в условиях динамически изменяемой сцены контролируется с помощью алгоритмической реализации метода «потенциальных полей». При этом вся совокупность задач планирования перемещений и управления движением робота решается в реальном времени с использованием средств обработки визуальной, дальномерической и навигационной информации для учета особенностей окружающей обстановки.

Объективный контроль результатов отработки каждой составной части сценариев того или иного уровня, осуществляемый на основе обработки показаний информационно-измерительных средств отдельных роботов, позволяет обеспечивать переход к следующей стадии выполнения задачи или ее завершению с отображением всей необходимой информации на интерактивной панели интерфейса оператора.

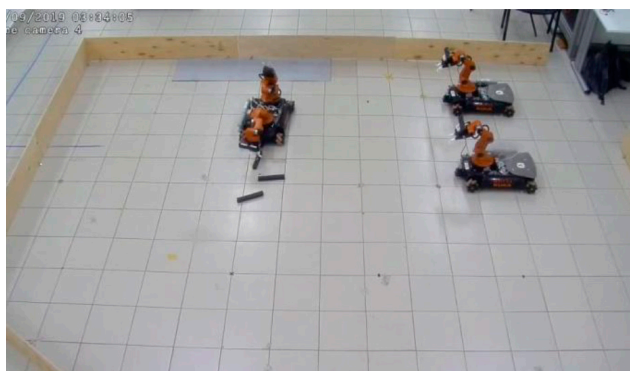
Создание демонстрационного образца МАРС и его натурные испытания позволили на практике отработать средства и методы группового управления автономными роботами, согласованное взаимодействие

которых обеспечивается на основе комбинированного использования различных стратегий:

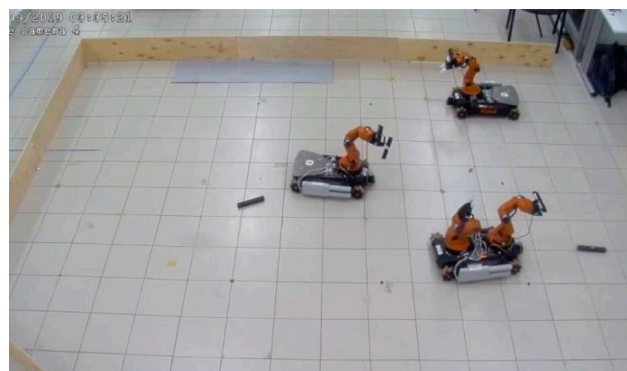
- стратегии централизованного управления при планировании этапов выполнения поставленной прикладной задачи с распределением заданий на проведение необходимых операций отдельным роботам;
- стратегии автономного управления при планировании целесообразных действий и координации движений роботов в процессе их совместного функционирования при выполнении полученных заданий.

Следует отметить, что принципы построения комплекса аппаратных и программно-алгоритмических средств демонстрационного образца МАРС допускают возможность его масштабирования по общему числу роботов, включаемых в состав группировки. Реализация подобных свойств позволяет повысить не только отказоустойчивость системы, но и степень ее универсальности в приложении к различным практическим задачам, сложность решения и объемность которых может потребовать оперативного изменения необходимой численности привлекаемых роботов.

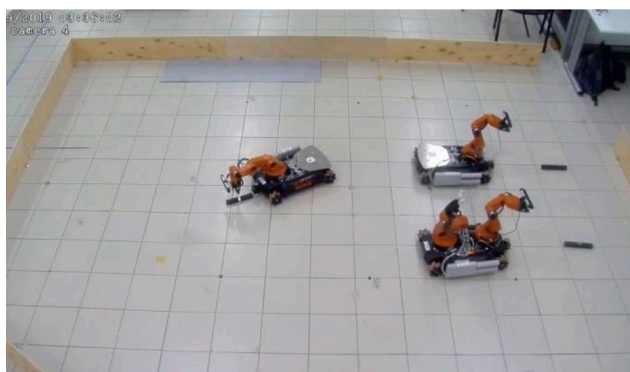
В этом смысле особый интерес приобретает вопрос об объемах информации, передаваемой по каналам беспроводной сетевой связи в процессе функционирования МАРС. Как показывает анализ, результаты



(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 11. Функционирование МАРС
при выполнении операций разбора элементов завала

Таблица. Интенсивность информационных потоков в сети беспроводной передачи данных в составе МАРС

Назначение данных	Частота, Гц	Объем одного сообщения, Кбайт	Число устройств	Суммарная скорость передачи, Кбит/с	Содержание
Навигация	5	102	16	65 280	Изображения с IP-камер
Навигация	5	0.5	1	20	Строка с координатами обнаруженных роботов
Навигация	1	0.1	5	4	Строки с координатами каждого робота
Управление	1	0.1	5	4	Команды тактического уровня управления роботами
Управление	1	0.05	5	2	Подтверждения о выполнении команд тактического уровня
Интерфейс	10	25	5	10 000	Изображение с бортовой видеокамеры
Интерфейс	10	2	5	800	Данные с бортового лидара

которого представлены в таблице, для разработанной конфигурации МАРС с составом из пяти роботов интенсивность информационных потоков в сети передачи данных не превышает критический уровень.

Таким образом, проведенные натурные эксперименты убедительно доказали реальные возможности создания МАРС, ориентированных на выполнение различных прикладных задач, среди которых – автоматический поиск и разбор завалов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание прототипного образца многоагентной робототехнической системы позволило обеспечить комплексную отработку не только методов и алгоритмов группового управления, но и технологий обработки необходимых знаний, а также средств человеко-машинного интерфейса для оперативной постановки решаемых прикладных задач. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на примере задач автоматического поиска и разбора завалов, подтвердили эффективность разработанного программно-алгоритмического обеспечения, текущая версия которого реализует централизованную стратегию группового управления автономными роботами в составе объединенной группировки. Перспективы дальнейшего развития системы предполагают дополнение ее структуры механизмами доски объявлений для поддержки децентрализованных стратегий функционирования автономных роботов на уровне координации планов их поведения и согласования взаимодействий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-29-04379 в рамках исследовательского проекта «Методы, модели и алгоритмы группового

управления автономными роботами на основе комплексного применения аппарата теории конечных автоматов».

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-29-04397) under the Research Project “Methods, Models, and Algorithms for Group Control of Autonomous Robots by the Integrated Application of the Apparatus of the Theory of Finite Automata.”

Вклад авторов

С.В. Манько – разработал алгоритмы планирования и распределения заданий между агентами МАРС; предложил формализованное описание сценария решаемой прикладной задачи в виде сети конечных автоматов.

В.М. Лохин – разработал архитектуру МАРС и обобщенную структуру автономного робототехнического агента в ее составе; предложил концепцию натурного эксперимента по поиску и ликвидации завала и контролировал ход его проведения.

С.А.К. Диане – разработал алгоритмы технического зрения для автономных робототехнических агентов в составе МАРС; программно реализовал ключевые алгоритмы планирования и распределения заданий, а также обработки информации в МАРС.

Authors' contributions

S.V. Manko has developed algorithms for planning and distributing tasks between MARS agents; proposed a formalized description of the scenario of the specified applied problem in the form of a network of finite automata.

V.M. Lokhin has developed the MARS architecture and the generalized structure of its autonomous robotic agent; proposed the concept of a full-scale experiment to search for and eliminate the blockage, and controlled the stages of its implementation.

S.A.K. Diane has developed vision algorithms for autonomous robotic agents in the MARS; programmatically implemented key algorithms for planning, distributing tasks, and processing information in MARS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yasuda T., Ohkura K. (Eds.). *Multi-robot systems: trends and development*. InTech; 2011. 596 p. ISBN 978-953-307-425-2. <https://doi.org/10.5772/544>
2. Seenu S.N., Kuppan Chetty R.M., Ramya M.M. Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems. *Industrial Robot*. 2020;47(6): 929–942. <https://doi.org/10.1108/IR-04-2020-0073>
3. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. *Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2009. 280 с. ISBN 978-5-9221-1141-6
4. Пшихопов В.Х. (ред.). *Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2015. 305 с. ISBN 978-5-9221-1674-9
5. Рубцов В.И., Машков К.Ю., Лапшов В.С., Коновалов К.В. Многоуровневая система управления группой роботов для работы в условиях Арктики. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021;7:53–61.
6. Дацков И.В., Сероштанов А.В. Робототехнические комплексы специального назначения, состоящие на вооружении ФГКУ ЦСООР «Лидер». В сб.: *Материалы XXVII Международной научно-практической конференции «Предупреждение. Спасение. Помощь»*. 16 марта 2017 г. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России; 2017. С. 20–32.
7. Дацков И.В., Кубеко А.В. Возможности ЦСООР «Лидер» по применению робототехнических средств. В сб.: *Материалы XXVII Международной научно-практической конференции «Предупреждение. Спасение. Помощь»*. 16 марта 2017 г. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России; 2017. С. 32–34.
8. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012;3:11–16.
9. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Крюченков Е.Н., Кучерский Р.В., Худак Ю.И. Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012;5:44–50.
10. Лохин В.М., Манько С.В., Карпов С.А., Марголин И.Д. Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017;18(12): 802–811. <https://doi.org/10.17587/mau.18.802-811>
11. Манько С.В., Диане С.А.К., Лохин В.М., Новосельский А.К. Групповое управление роботами в задачах разбора завалов и демонтажа объектов атомной отрасли. *Экстремальная робототехника*. 2017;1(1):302–311.
12. Diane S., Manko S., Lokhin V. Task planning in robot groups for problems with implicitly defined scenarios based on finite-state automata technique. In: *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2017)*. 2017. P. 348–351. <https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970581>
13. Diane S., Manko S., Margolin I., Novosselskiy A. Hierarchical scenarios for behavior planning in autonomous robots. In: *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2019. P. 479–484. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657067>

REFERENCES

1. Yasuda T., Ohkura K. (Eds.). *Multi-robot systems: trends and development*. InTech; 2011. 596 p. ISBN 978-953-307-425-2. <https://doi.org/10.5772/544>
2. Seenu S.N., Kuppan Chetty R.M., Ramya M.M. Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems. *Industrial Robot*. 2020;47(6): 929–942. <https://doi.org/10.1108/IR-04-2020-0073>
3. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravleniya v gruppakh robotov (Models and algorithms of collective control in groups of robots)*. Moscow: Fizmatlit; 2009. 280 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-1141-6
4. Pshikhopov V.Kh. (Ed.). *Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami v neopredelennykh sredakh (Group control of moving objects in undetermined)*. Moscow: Fizmatlit; 2015. 305 p. (in Russ.).
5. Rubtsov V.I., Mashkov K.Yu., Lapshov V.S., Konovalov K.V. Multilevel control system for a group of robots to work in Arctic. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya TulGU*. 2021;7:53–61 (in Russ.).
6. Datskov I.V., Seroshtanov A.V. Special purpose robotic systems in service of FGKU TsSOOR "Lider." In: *Proc. of The 27th International Scientific-Practical Conference "Prevention. Salvation. Help."* Khimki: Akademiya grazhdanskoi zashchity MChS Rossii; 2017. P. 20–32 (in Russ.).
7. Datskov I.V., Kubeko A.V. Capabilities of TsSOOR "Lider" in application of robotic means. In: *Proc. of The 27th International Scientific-Practical Conference "Prevention. Salvation. Help."* Khimki: Akademiya grazhdanskoi zashchity MChS Rossii; 2017. P. 32–34 (in Russ.).
8. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P. Multiagent robotic systems construction principles and design problems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2012;3:11–16 (in Russ.).
9. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P., Kryuchenkov E.N., Kucherskiy R.V., Khudak Yu.I. Action planning and tasks distribution models and algorithms for multiagent robotic systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2012;5:44–50 (in Russ.).
10. Lokhin V.M., Man'ko S.V., Karpov S.A., Margolin I.D. Behavioral mechanisms ensuring network communications in multi-agent robotic systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2017;18(12):802–811 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.18.802-811>
11. Man'ko S.V., Diane S.A.K., Lokhin V.M., Novosel'skii A.K. Group control of robots for debris removal and construction disassembly in the atomic industry. *Ekstremal'naya robototekhnika = Extreme Robotics*. 2017;1(1):302–311 (in Russ.).
12. Diane S., Manko S., Lokhin V. Task planning in robot groups for problems with implicitly defined scenarios based on finite-state automata technique. In: *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2017)*. 2017. P. 348–351. <https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970581>
13. Diane S., Manko S., Margolin I., Novosselskiy A. Hierarchical scenarios for behavior planning in autonomous robots. In: *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2019. P. 479–484. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657067>

14. Егорцев М.В., Диане С.А.К., Кац Н.Д. Алгоритмическое обеспечение системы внешнего наблюдения и маршрутизации автономных мобильных роботов. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):15–23. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-15-23>
15. Лохин В.М., Манько С.В., Александрова Р.И., Романов М.П., Диане С.А.К. Принципы построения и программно-алгоритмическое обеспечение человеко-машинного интерфейса для автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016;17(9): 606–614. <https://doi.org/10.17587/mau.17.606-614>
16. Duchoň F., Babinec A., Kajan M., Beňo P., Florek M., Fico T., Jurišica L. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. *Procedia Engineering*. 2014;96: 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.098>
17. Mohammed H., Jaradat M.A., Romdhane L.B. RRT*N: An improved rapidly-exploring random tree approach for reduced processing times. In: *2018 11th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISMA.2018.8330126>
18. Платонов А.К., Карпов И.И., Кирильченко А.А. *Метод потенциалов в задаче прокладки трассы*. М.: 1974. 27 с. (Препринт. Институт прикладной математики АН СССР; № 124).
14. Egorsev M.V., Diane S.K., Kaz N.D. Algorithmic support of the system of external observation and routing of autonomous mobile robots. *Russ. Technol. J.* 2021;9(3):15–23 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-15-23>
15. Lokhin V.M., Manko S.V., Alexandrova R.I., Romanov M.P., Diane S.A. Man-machine interface for autonomous robots and multi-agent robotic systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2016;17(9):606–614 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.17.606-614>
16. Duchoň F., Babinec A., Kajan M., Beňo P., Florek M., Fico T., Jurišica L. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. *Procedia Engineering*. 2014;96: 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.098>
17. Mohammed H., Jaradat M.A., Romdhane L.B. RRT*N: An improved rapidly-exploring random tree approach for reduced processing times. In: *2018 11th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISMA.2018.8330126>
18. Platonov A.K., Karpov I.I., Kiril'chenko A.A. *Metod potentsialov v zadache prokladki trassy (Method of potentials in the problem of laying a route)*. Moscow; 1974. 27 p. (Preprint. Institute of Applied Mathematics, USSR Academy of Sciences; No. 124) (in Russ.).

Об авторах

Манько Сергей Викторович, д.т.н., профессор кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Специализируется в области интеллектуального управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими системами. Лауреат премии Правительства РФ в области образования. Член научного Совета РАН по робототехнике и мехатронике. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, SPIN-код РИНЦ 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

Лохин Валерий Михайлович, д.т.н., профессор кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Автор более 160 научных и учебно-методических работ в области интеллектуальных информационных технологий и автоматического управления. Лауреат государственной премии РФ в области науки и техники. Лауреат премии Правительства РФ в области образования. Член научного Совета РАН по робототехнике и мехатронике. Заслуженный деятель науки РФ. E-mail: kpu-mirea@yandex.ru. Scopus Author ID 6602931640, <https://orcid.org/0000-0001-6708-9124>

Диане Секу Абдель Кадер, к.т.н., доцент кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Специализируется на вопросах обработки информации и управления в интеллектуальных робототехнических системах. E-mail: sekoudiane1990@gmail.com. ResearcherID T-5560-2017, Scopus Author ID 57188548666, SPIN-код РИНЦ 8691-0290, <https://orcid.org/0000-0002-8690-6422>

About the authors

Sergey V. Manko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). He is a specialist in the field of intelligent control of autonomous robots and multi-agent robotic systems. Russian Federation State Prize Laureate in the field of education. Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on robotics and mechatronics. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, RSCI SPIN-code 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

Valery M. Lokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Author of more than 160 scientific and educational works in the field of intelligent information technologies and automatic control. Laureate of the State Prize of the Russian Federation in the field of science and technology. Russian Federation State Prize Laureate in the field of education. Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on robotics and mechatronics. Honored Worker of Science of the Russian Federation. E-mail: kpu-mirea@yandex.ru. Scopus Author ID 6602931640, <https://orcid.org/0000-0001-6708-9124>

Sekou Abdel Kader Diane, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sekoudiane1990@gmail.com. ResearcherID T-5560-2017, Scopus Author ID 57188548666, RSCI SPIN-code 8691-0290, <https://orcid.org/0000-0002-8690-6422>

УДК 621.391

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-42-51>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Сравнение алгоритмов многокритериальной оптимизации характеристик радиотехнических устройств

А.В. Смирнов[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Вопрос о выборе метода решения задачи многокритериальной оптимизации из множества известных методов актуален для многих практических областей. Цель исследования – сравнить результаты применения разных методов на выбранных классах задач по качеству решений, затратам времени и другим критериям.

Методы. В работе сравниваются результаты применения различных алгоритмов при решении пяти задач многокритериальной оптимизации характеристик аналоговых и цифровых фильтров и многоступенчатых согласующих СВЧ-трансформаторов. Исследовались популяционный алгоритм GDE3, осуществляющий поиск одновременно всей аппроксимации множества Парето-оптимальных решений, и три алгоритма, основанные на скаляризации целевой функции, которые в одном цикле поиска находят один элемент указанного множества. Это многократный запуск покоординатного поиска MSPS, многократный запуск алгоритма последовательного квадратичного программирования MSSQP и алгоритм роя частиц PSO.

Результаты. Проведенное исследование показало, что популяционный алгоритм GDE3 позволяет успешно находить множества решений для всех рассмотренных задач. В двух задачах из пяти алгоритмы MSPS и PSO существенно уступили GDE3 как по качеству решений, так и по затратам времени на поиск одного решения. В одной из задач алгоритм MSSQP оказался неработоспособным. В других задачах алгоритмы, основанные на скаляризации, находили решения, не только не уступающие, а в некоторых случаях и превосходящие результаты GDE3. При этом затраты времени на поиск одного решения у MSPS и PSO оказались значительно большими, чем у GDE3 и MSSQP.

Выводы. Алгоритм GDE3 можно рекомендовать как базовый для решения подобных задач. Алгоритмы, основанные на скаляризации, целесообразно применять при поиске небольшого числа элементов множества Парето-оптимальных решений. Необходимо исследовать влияние особенностей рельефов отдельных показателей качества и скалярных целевых функций на процесс поиска решения.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, Парето-оптимальное решение, фронт Парето, показатель качества, скаляризация целевой функции, популяционный алгоритм

• Поступила: 02.05.2022 • Доработана: 20.05.2022 • Принята к опубликованию: 15.09.2022

Для цитирования: Смирнов А.В. Сравнение алгоритмов многокритериальной оптимизации характеристик радиотехнических устройств. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):42–51. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-42-51>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Comparison of algorithms for multi-objective optimization of radio technical device characteristics

Alexander V. Smirnov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The selection of a method for solving multi-objective optimization problems has many practical applications in diverse fields. The present work compares the results of applying different methods to the selected classes of problems by solution quality, time consumption, and various other criteria.

Methods. Five problems related to the multi-objective optimization of analog and digital filters, as well as multistep impedance-matching microwave transformers, are considered. One of the compared algorithms comprises the Third Evolution Step of Generalized Differential Evolution (GDE3) population-based algorithm for searching the full approximation of the Pareto set simultaneously, while the other three algorithms minimize the scalar objective function to find only one element of the Pareto set in a single search cycle: these comprise Multistart Pattern Search (MSPS), Multistart Sequential Quadratic Programming (MSSQP) method and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms.

Results. The computer experiments demonstrated the capability of GDE3 to solve all considered problems. MSPS and PSO showed significantly inferior results than to GDE3 for two problems. In one problem, MSSQP could not be used to reach acceptable decisions. In the other problems, MSPS, MSSQP, and PSO reached decisions comparable with GDE3. The time consumption of the MSPS and PSO algorithms was much greater than that of GDE3 and MSSQP.

Conclusions. The GDE3 algorithm may be recommended as a basic method for solving the considered problems. Algorithms minimizing scalar objective function may be used to obtain several elements of the Pareto set. It is necessary to investigate the impact of landscape features of individual quality indices and scalar objective functions on the extreme search process.

Keywords: multi-objective optimization, Pareto optimality, Pareto front, quality index, scalarizing objective function, population-based algorithm

• Submitted: 02.05.2022 • Revised: 20.05.2022 • Accepted: 15.09.2022

For citation: Smirnov A.V. Comparison of algorithms for multi-objective optimization of radio technical device characteristics. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):42–51. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-42-51>

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

Задачи многокритериальной оптимизации (МКО) представляют значительный интерес в радиотехнике и других областях исследований [1]. Целью многокритериальной оптимизации является поиск аппроксимации множества Парето-оптимальных решений (ПОР) [2], которые невозможно улучшить по одному из показателей качества (ПК), не ухудшив при этом хотя бы один из остальных ПК.

Методы решения задач МКО разделяются на два основных класса [3, 4]. Первый из них основан на решении задачи минимизации скалярной целевой

функции (ЦФ), которую представим в обобщенном виде [5]:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^M \left(W_j \cdot \max \left(\frac{(Q_j(\mathbf{x}) - Q_{jt})}{Q_{jt}^{q_j}}, 0 \right) \right), \quad (1)$$

где $Q_j(\mathbf{x})$ и Q_{jt} – текущее и целевое значения j -го ПК; W_j – весовой коэффициент j -го ПК. Показатель степени $q_j = 1$, в том случае, если необходимо нормировать отклонение ПК от целевого значения для приведения слагаемых в (1) к одному диапазону величин. Показатель степени $q_k = 0$, если такая нормировка

не требуется. Соотношение (1) охватывает различные варианты скаляризации задачи МКО. Приняв все $Q_{jt} = 0$ и считая при этом знаменатели равными единице, получаем задачу минимизации взвешенной суммы ПК. Другой вариант – задать целевые значения Q_{jt} , а также $W_k = 1$, $W_j \gg 1$, где $j = 1, \dots, M, j \neq k$. При этом получаем задачу минимизации ПК Q_k при фиксации остальных ПК вблизи целевых значений. Методы, основанные на скаляризации, позволяют находить одно ПОР в цикле поиска.

Методы из второго класса (далее – популяционные алгоритмы МКО) позволяют в одном цикле поиска вычислить сразу несколько элементов аппроксимации множества ПОР благодаря использованию популяции агентов. Классификация и описания алгоритмов этого типа даны в [3, 4].

Для сравнения разных методов решения задачи МКО применяют наборы тестовых функций [6] и критерии качества аппроксимации множества ПОР [3]. Как правило, оценивают результаты применения популяционных алгоритмов МКО на тестовых функциях, как, например, в [7, 8]. Сравнение с результатами применения методов, основанных на скаляризации, не проводится. Это оправдано в случае тестовых функций, все свойства которых известны, и можно объективно оценить качество находимых аппроксимаций множества ПОР. Но в практических приложениях о функциях, описывающих ПК, в большинстве случаев заранее ничего не известно, и необходимо решать задачу «Black Box Optimization», собирая информацию о значениях ПК в процессе поиска.

Ответ на вопрос о том, какой алгоритм даст наилучшую аппроксимацию, можно получить только сопоставив результаты применения разных методов, как популяционных, так и основанных на скаляризации. Такое сравнение для специфического класса задач выполнено в [9], и сделан вывод о преимуществе популяционных алгоритмов по качеству получаемых решений. В то же время для других задач итог может быть иным. В работе [10] автор исследовал возможности применения популяционных алгоритмов из свободно распространяемой библиотеки PlatEMO [11], работающей в среде *MATLAB*, для решения задачи МКО частотных характеристик аналоговых электрических фильтров и сделал вывод, что в случае оптимизации по двум ПК популяционные методы позволяют получить лучшие решения по сравнению с методами, основанными на скаляризации, а в случае оптимизации по трем ПК результат противоположный. Однако этот вывод был получен при использовании в экспериментах не самого эффективного алгоритма поиска экстремума скалярной ЦФ. В работе [12] было выполнено сравнение различных алгоритмов, основанных

на скаляризации, но не проводилось их сравнение с популяционными алгоритмами.

Цель данной работы – сравнить результаты применения алгоритмов МКО разных классов на примерах нескольких задач оптимизации характеристик радиотехнических устройств. Среди показателей, характеризующих сравниваемые методы, высший приоритет в выполняемом исследовании присвоен получению наилучших результатов. При равенстве по этому критерию может проводиться сравнение по затратам времени на поиск одного ПОР и по другим показателям.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧ И ВЫБОР АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Задача 1. МКО частотных характеристик аналоговых фильтров. Определения ПК и методы их расчета даны в [13] и других работах автора. Приведем перечень ПК:

- неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания DH_p , дБ;
- минимальное затухание в полосе задерживания H_s , дБ;
- превышение АЧХ заданного уровня в полосе перехода DH_t ;
- неравномерность частотной характеристики задержки в полосе пропускания DT_d , %.

Характеристики рассчитываются на безразмерной шкале частот, нормированной к верхней граничной частоте полосы пропускания фильтра низких частот (ФНЧ). Необходимо совместно минимизировать DH_p и DT_d при выполнении ограничений $DH_t \leq 0$, $H_s \geq H_{st}$.

Задача 2. МКО одновременно частотных и временных характеристик аналоговых фильтров. Определения ПК и методы их расчета приведены в [13]. Помимо указанных выше ПК частотной области, введены ПК временной области:

- максимальное значение напряжения (выброс) переходного процесса Um , нормированное к установившемуся значению;
- длительность нарастания (фронта) переходного процесса Tfr ;
- длительность установления переходного процесса Tss .

Последние два ПК вычисляются на безразмерной шкале времени, привязанной к нормированной шкале частот. Необходимо совместно минимизировать Tss и максимизировать H_s при выполнении ограничений $DH_t \leq 0$, $Um \leq U_{mt}$, $Tfr \leq T_{frt}$.

Задача 3. МКО частотных характеристик цифровых фильтров. Определения ПК и методы их расчета даны в [5]. Перечень ПК и постановка задачи оптимизации такие же, как для Задачи 1.

Задача 4. МКО частотных характеристик согласующих многоступенчатых СВЧ-трансформаторов (переходов). Определены следующие ПК:

- максимальный KP_{max} и минимальный KP_{min} коэффициенты передачи мощности в полосе согласования;
- неравномерность коэффициента передачи мощности в полосе согласования $DKP = KP_{max} - KP_{min}$.

Метод расчета этих ПК здесь не приводится вследствие ограниченного объема статьи и будет опубликован отдельно. Необходимо совместно минимизировать DKP и максимизировать KP_{min} при заданном значении ширины полосы частот согласования DFM .

Задача 5. Еще одна задача МКО частотных характеристик согласующих многоступенчатых СВЧ-трансформаторов. Помимо ПК, определенных для Задачи 4, вводится относительная неравномерность частотной характеристики задержки в полосе согласования DTd , %. Необходимо минимизировать DKP и DTd при заданных значениях ширины полосы согласования DFM и максимального коэффициента передачи мощности KPt .

Рассмотрим алгоритмы, применявшиеся для решения перечисленных задач.

Для реализации популяционного алгоритма использовалась упомянутая выше библиотека PlatEMO. Из 71 представленного в ней алгоритма был выбран алгоритм GDE3 (the third evolution step of generalized differential evolution), который по результатам работы [10] показал лучшие характеристики. Задаваемыми параметрами являются размер популяции N_{pop} и количество вычислений набора ПК $Neval$. Их значения находились экспериментально для каждой задачи. Для этого выполнялись сеансы поиска с увеличением значений N_{pop} и $Neval$ до тех пор, пока улучшалась находимая аппроксимация множества ПОР.

Далее укажем алгоритмы поиска экстремумов скалярных ЦФ.

MSPS – Multistart Pattern Search, многократный запуск пошагового поиска. В Задачах 1 и 2 был реализован программой SOFTD [13], а в Задаче 3 – программой HODF [5]. Обе программы написаны на языке C++. В Задачах 4 и 5 алгоритм был реализован в среде MATLAB.

PSO – Particle Swarm Optimization, алгоритм роя частиц [3, 4], реализуемый в MATLAB функцией *particleswarm*(..) из модуля *Global Optimization Toolbox*. Данный алгоритм по результатам работы [12] продемонстрировал способность находить глобальные экстремумы скалярных ЦФ со сложным рельефом.

MSSQP – Multistart Sequential Quadratic Programming, многократный запуск алгоритма последовательного квадратичного программирования,

реализуемого в MATLAB функцией *fmincon*(..) из модуля *Optimization Toolbox*. В отличие от алгоритмов MSPS и PSO, которые ищут минимумы скалярной ЦФ вида (1), в MSSQP ограничения на ПК учитываются не в виде штрафных слагаемых, а включаются в функцию Лагранжа, имеющую вид:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = Q_k(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{M-1} \lambda_i g_i(\mathbf{x}), \quad (2)$$

$$g_i(\mathbf{x}) = Q_j(\mathbf{x}) - Q_{jt}, \quad i = 1, \dots, M-1, \quad j = 1, \dots, M, \quad j \neq k,$$

где λ_i – множители Лагранжа; Q_j – ПК; Q_{jt} – их целевые значения.

Строго говоря, данный алгоритм не предназначен для поиска глобальных экстремумов ЦФ со сложным рельефом, содержащим много локальных экстремумов. Однако, как было показано в [12], для некоторых задач он находит хорошее приближение к глобальному минимуму ЦФ в большинстве запусков из стартовых точек, равномерно распределенных в пространстве поиска. При этом продолжительность поиска оказывается значительно меньше, чем для других алгоритмов.

Количество NT запусков алгоритмов, основанных на скаляризации, для поиска одного ПОР подбиралось в каждой задаче так, чтобы получать решение, которое не удавалось бы существенно улучшить при дальнейшем увеличении NT . Остальные параметры задавались равными значениям по умолчанию.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Рассмотрим результаты экспериментов для аналогового ФНЧ, передаточная функция (ПФн) которого содержит $NP = 6$ полюсов и $NZ = 0$ нулей. Нижняя граничная частота полосы задерживания на шкале частот, нормированной к верхней граничной частоте полосы пропускания, $F_s = 2$. Результаты, полученные с применением алгоритма GDE3, в виде графиков аппроксимаций фронта Парето для $Hst = 30$ дБ и $Hst = 40$ дБ приведены на рис. 1. Для первого из этих случаев $Neval = 1 \cdot 10^6$, а для второго $Neval = 0.5 \cdot 10^6$. Продолжительность поиска, соответственно 4 и 2 мин. В обоих случаях задавалось $N_{pop} = 50$.

На этом же рисунке показаны решения, полученные с помощью алгоритмов, основанных на скаляризации ЦФ. Поиск одного решения алгоритмом MSPS занимал в среднем 2 мин., алгоритмом MSSQP – 10 с, а алгоритмом PSO – 5 мин. При этом число запусков MSPS задавалось равным 3000, число запусков PSO – 40, запусков MSSQP – 20. Из результатов запусков выбирался наилучший. Следует отметить, что примерно половина запусков MSSQP при поиске каждого ПОР давала один и тот же наилучший

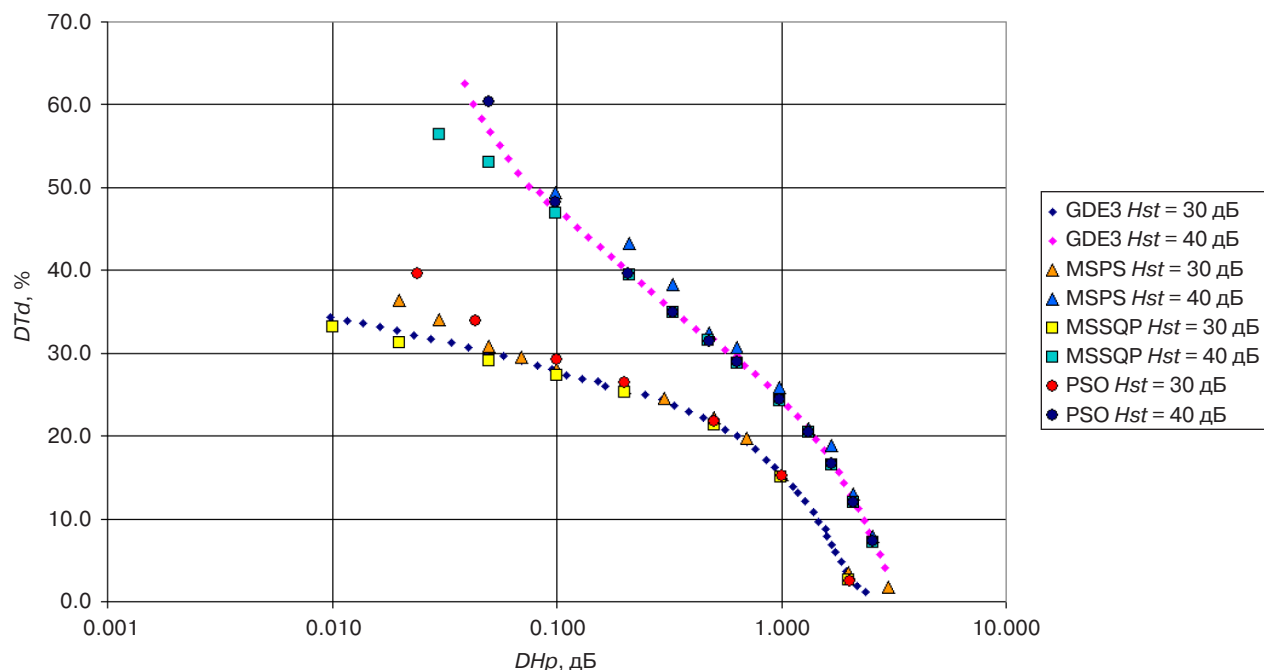


Рис. 1. Результаты решения Задачи 1

результат, а остальные приводили к недопустимым решениям. Результаты двух других алгоритмов в большинстве опытов оказывались распределенными в широком диапазоне значений.

Сопоставление ПК решений, находимых разными алгоритмами, показывает, что выигрыш в качестве решения по сравнению с GDE3 дает только MSSQP при малых значениях DH_p . Два других алгоритма, основанных на скаляризации ЦФ, в лучшем случае показывают такие же результаты, как GDE3,

а при малых значениях DH_p проигрывают ему. К тому же они требуют значительно больших затрат времени на поиск решений.

Задача 2. Приведем результаты экспериментов для того же ФНЧ, что и в Задаче 1. Результаты, полученные с помощью сравниваемых алгоритмов, показаны на рис. 2. В первой серии экспериментов задавались ограничения $T_{fr} \leq 0.5$, $U_m \leq 1.1$, $DH_t \leq 0$, а во второй серии ограничение на T_{fr} было исключено.

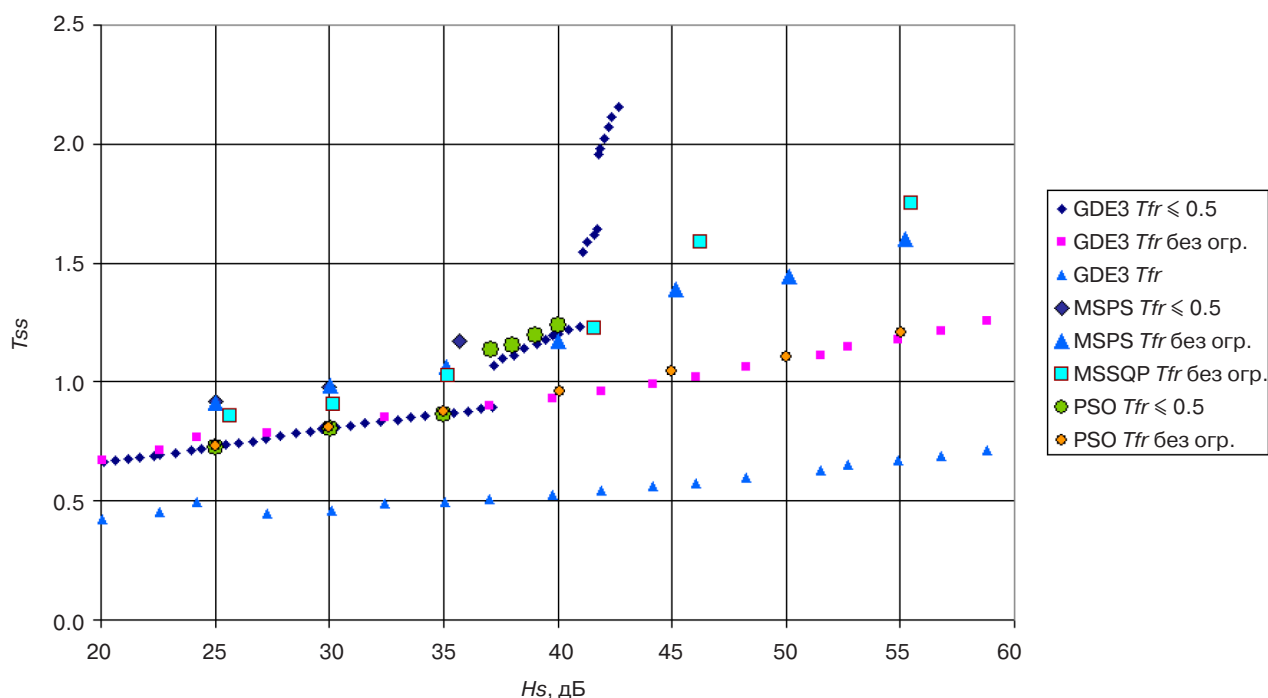


Рис. 2. Результаты решения Задачи 2

В первую очередь отметим, что при наличии ограничения на Tfr алгоритм MSSQP вообще не смог находить допустимые, т.е. удовлетворяющие всем ограничениям решения. При отсутствии данного ограничения MSSQP находил допустимые решения, но они оказывались заметно хуже, чем для GDE3 и PSO. При этом количество допустимых решений в сериях из $NT = 200$ запусков, занимавших время 40–60 с, измерялось единицами. Алгоритм MSPS в обеих сериях экспериментов также показал результаты, существенно уступающие решениям GDE3 и PSO.

Алгоритмы GDE3 и PSO в обеих сериях экспериментов показали близкие по значениям ПК результаты. Параметры GDE3 в обоих случаях задавались $Npop = 50$, $Neval = 200000$. Поиск аппроксимации множества ПОР занимал около 7 мин. Для PSO задавалось количество запусков $NT = 40$. Продолжительность поиска одного решения составляла 8–10 мин.

Заметим, что при наличии ограничения на Tfr фронт Парето получается разрывным. Для пояснения причин этого эффекта на рис. 2 приведен также график значений Tfr , полученных в случае, когда ограничение на этот ПК не наложено. Пока Tfr меньше уровня ограничения $Tfr = 0.5$, аппроксимации фронтов Парето, полученные при наличии и отсутствии указанного ограничения, совпадают. Ограничение на Tfr неактивно и не влияет на результаты поиска. Если же значение Tfr должно превысить заданный порог, то ограничение становится активным, и для его выполнения переходный процесс приобретает колебательный характер. Разрывность фронта Парето в этом случае

обусловлена переходами момента, когда выполняется условие завершения переходного процесса [5] с одной волны на другую.

Задача 3. На рис. 3 приведены результаты экспериментов для ФНЧ, ПФН которого содержит $NP = 4$ полюса и $NZ = 4$ нуля. Значение верхней граничной частоты полосы пропускания на шкале частот, нормированной к частоте дискретизации, $Fp = 0.1$; значение нижней граничной частоты полосы задерживания $Fs = 0.2$. С помощью популяционного алгоритма GDE3 были получены аппроксимации фронта Парето задач минимизации ПК DHp и DTd при $Npop = 50$ и задании ограничений $Hst = 30$ дБ и $Hst = 40$ дБ. Количества выполнений расчета ПК задавались, соответственно $Neval = 10^6$ и $Neval = 1.5 \cdot 10^6$, а затраты времени составляли примерно 6 и 9 мин.

Затем были получены точки этих аппроксимаций с помощью алгоритмов, основанных на скаляризации ЦФ. Лучшие результаты показал алгоритм MSPS – найденные им решения полностью покрывают диапазоны решений, полученных с помощью GDE3, не уступая, а местами даже немного превосходя их по значениям ПК. При этом в случае $Hst = 30$ дБ множество решений MSPS имеет наименьшую нижнюю границу по показателю DHp . Во всех опытах задавалось число запусков поиска $NT = 2000$. Значения времени выполнения одного поиска оказались в диапазоне от 5 до 8.5 мин.

Алгоритм PSO при решении Задачи 3 оказался хуже, чем MSPS, т.к. найденные им решения занимают более узкие диапазоны значений ПК при приблизительно таких же затратах времени на выполнение одного поиска.

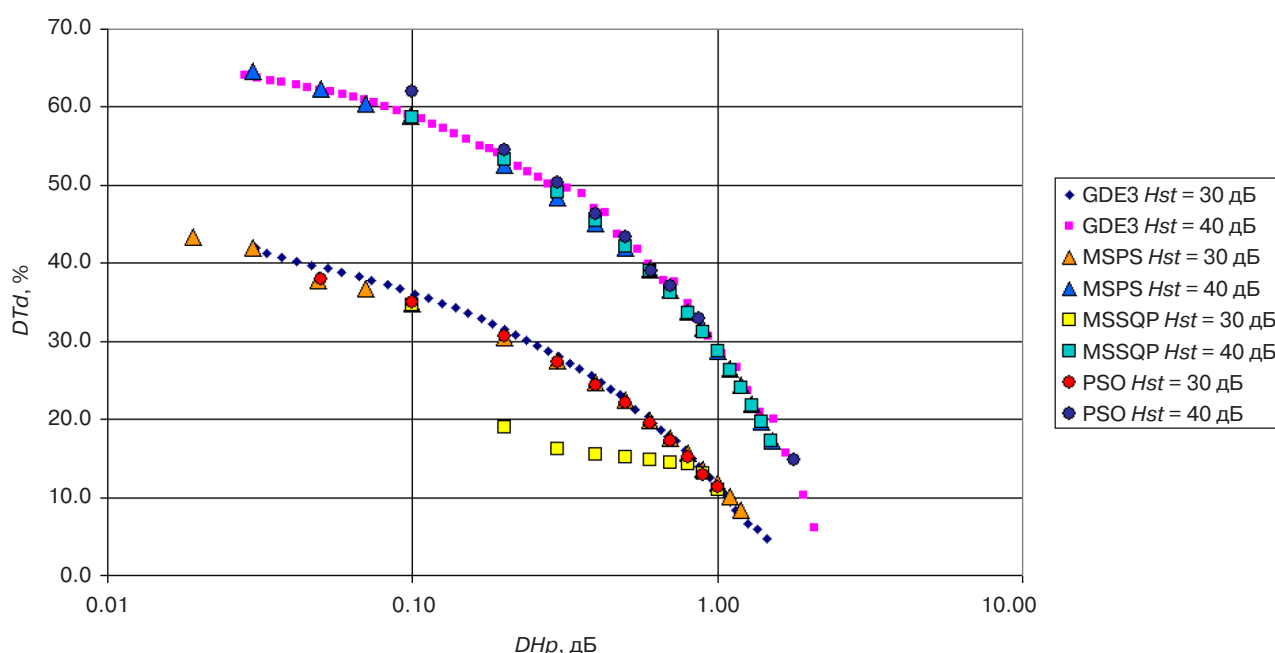


Рис. 3. Результаты решения Задачи 3

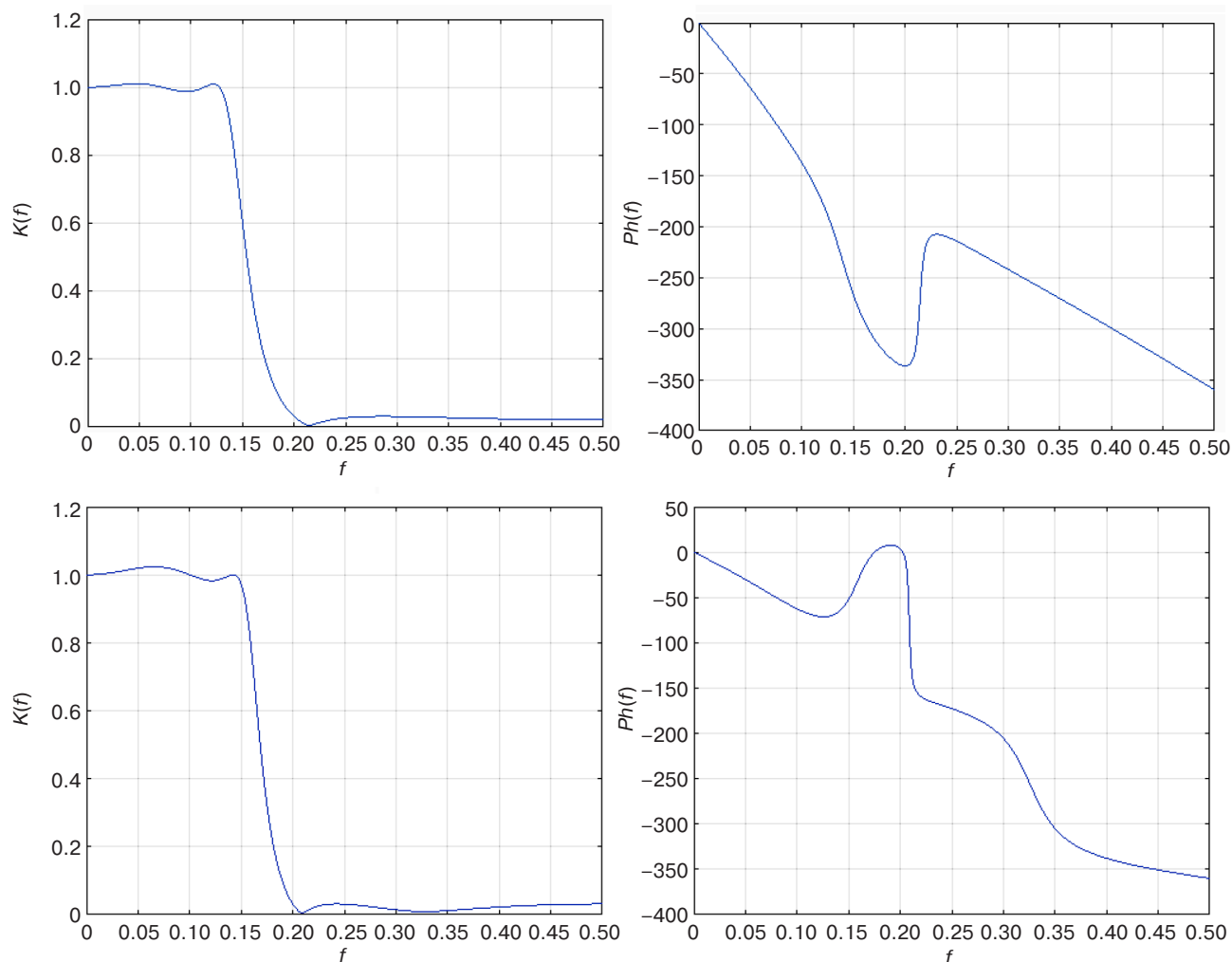


Рис. 4. Сравнение АЧХ – $K(f)$ и ФЧХ – $Ph(f)$ фильтров, найденных с помощью алгоритмов MSPS (наверху) и MSSQP (внизу) при задании $HSt = 30$ дБ, $DHp \leq 0.2$ дБ

Алгоритм MSSQP также проигрывает GDE3 и MSPS по значению нижней границы диапазона DHp . Но в случае $HSt = 30$ дБ этот алгоритм нашел решения в диапазоне значений DHp 0.2–0.8 дБ с меньшими значениями DTd по сравнению с остальными алгоритмами. Эти решения расположены в области пространства поиска, в которую другие алгоритмы не попадали. При этом ФЧХ решений, полученных с MSSQP, существенно отличаются от ФЧХ решений остальных алгоритмов (рис. 4), хотя АЧХ имеют сходный вид. В то же время в случае $Hst = 40$ дБ результаты MSSQP близки к полученным другими методами.

Задача 4. Рассмотрим пример результатов решения этой задачи при согласовании линий с отношением волновых сопротивлений $Z_{w2}/Z_{w1} = 10$, ширине полосы частот согласования $DFM = 1.2$, количестве ступеней трансформатора $Nst = 4$ и $Nst = 5$ (рис. 5).

Поиск алгоритмом GDE3 для обоих значений Nst осуществлялся при значениях параметров $Npop = 100$, $Neval = 1 \cdot 10^6$ и занимал приблизительно

2 мин. Следует отметить, что при уменьшении количества вычислений ПК и, соответственно, продолжительности поиска в 10 раз ухудшение результатов было незначительным.

Все три алгоритма, основанные на скаляризации ЦФ, показали одинаковые результаты. Поэтому на рис. 5 показаны лишь решения, полученные с помощью MSSQP, которые попадают на аппроксимации фронта Парето, найденные алгоритмом GDE3. Однако по продолжительности поиска одного решения методы существенно различаются. Если для MSPS и PSO требовалось 40–50 с, то для MSSQP всего 3–4 с. Заметим, что крайние правые точки рядов, полученных с помощью MSSQP, совпадают с результатами для чебышевских аппроксимаций, а расположенные правее них точки рядов GDE3 не являются ПОР.

Задача 5. Задача решалась при условиях $Z_{w2}/Z_{w1} = 12$, $DFM = 1$, $KPt = 1$ для значений количества ступеней $Nst = 3, 4$ и 5. Аппроксимации фронтов Парето, полученные с помощью сравниваемых алгоритмов, приведены на рис. 6.

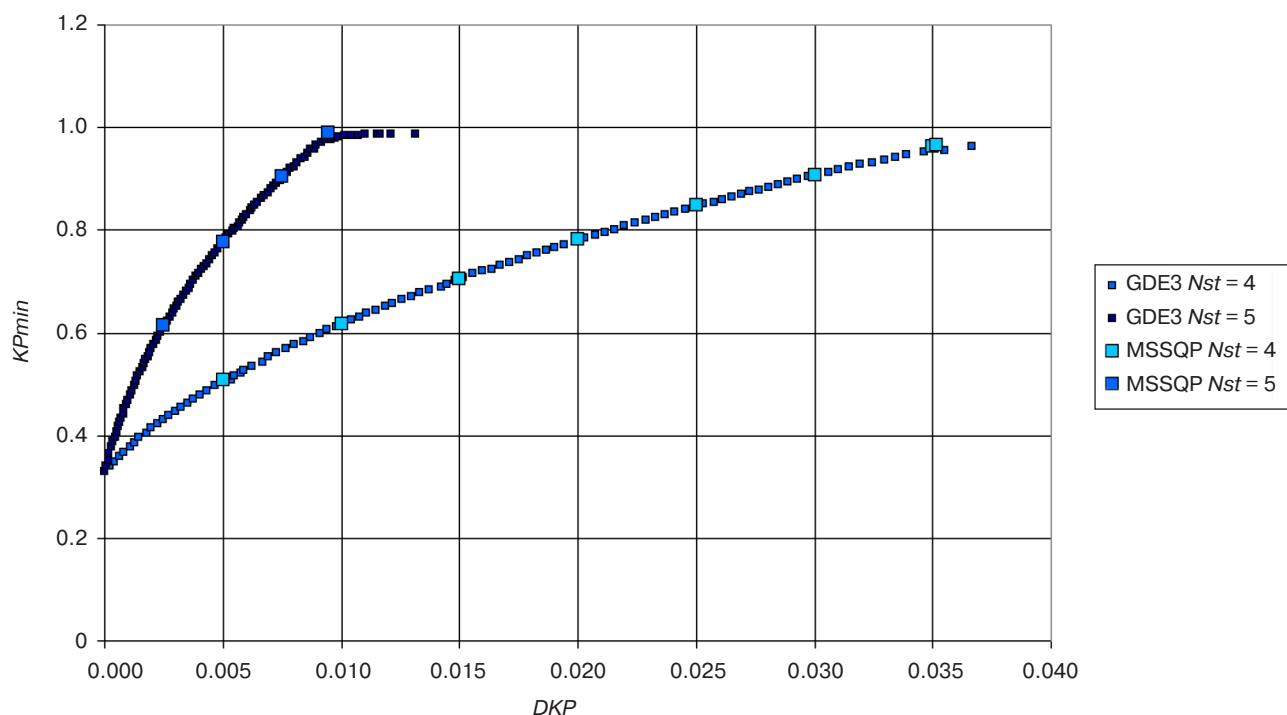


Рис. 5. Результаты решения Задачи 4

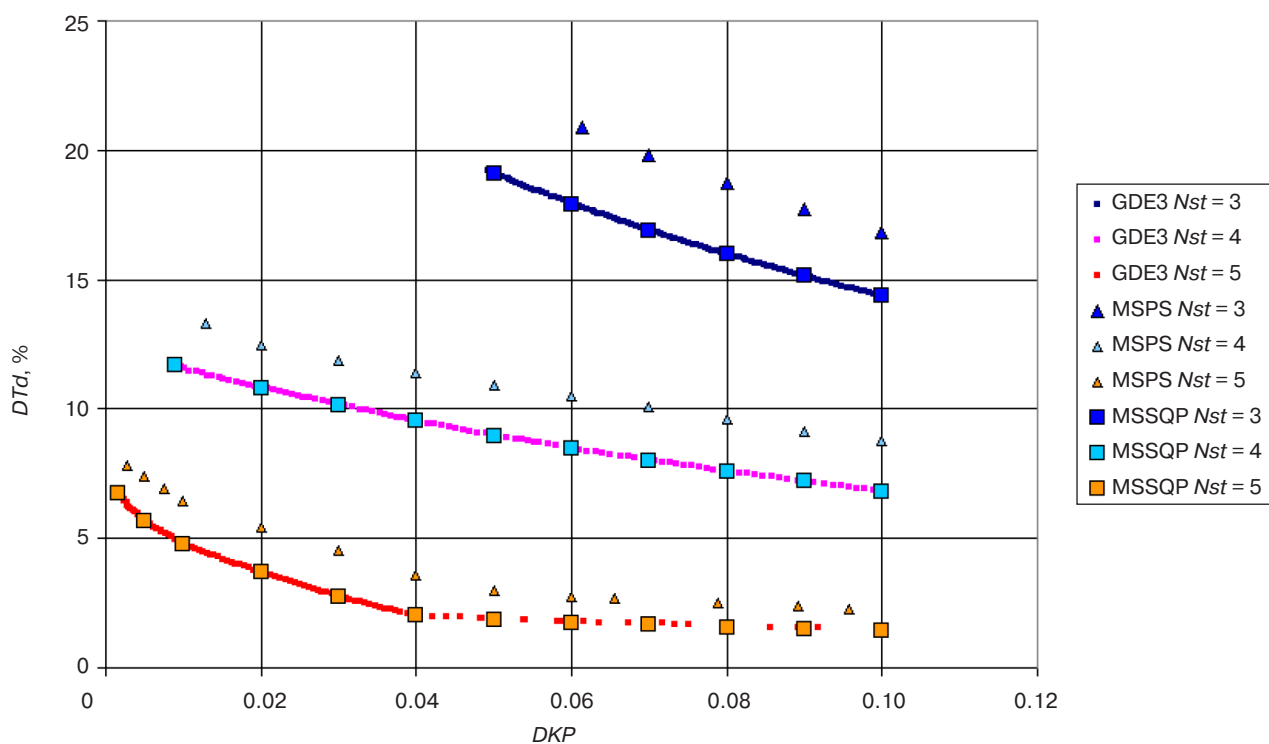


Рис. 6. Результаты решения Задачи 5

Для алгоритма GDE3 задавались значения параметров $N_{pop} = 100$, $N_{eval} = 1 \cdot 10^5$. Дальнейшее увеличение этих параметров не давало положительного эффекта. Продолжительность поиска при увеличении числа ступеней Nst возрастала в диапазоне от 55 до 71 с. Верхний предел значений DKP был задан равным 0.1. В случае $Nst = 5$ в диапазоне $DKP > 0.04$ аппроксимация фронта Парето

получается разрывной. Это объясняется тем, что значение DTd в этом диапазоне изменяется незначительно, что затрудняет оценку доминированности решений.

Для алгоритма MSPS задавалось $NT = 200$. Средняя продолжительность поиска одного решения для трех значений Nst составляла 7, 14 и 20 с. Найденные решения во всех случаях были

существенно хуже полученных с помощью GDE3. Увеличение числа запусков NT не дало улучшения. Алгоритм PSO при близких затратах времени дал решения, совпадающие с решениями MSPS, поэтому его результаты на рис. 6 не показаны.

Алгоритм MSSQP при решении данной задачи продемонстрировал высокую эффективность. При $NT = 10$ от 60 до 100% запусков давали одинаковый результат, совпадающий с решениями GDE3 во всем диапазоне значений. Остальные запуски приводили к недопустимым решениям с нарушениями ограничений. Средняя продолжительность поиска для трех значений Nst оказалась равной 1.6, 5.2 и 7.5 с. При этом данный алгоритм находит решения с заданными значениями DKP и в области, в которой аппроксимация фронта Парето, полученная с помощью GDE3, оказалась разрывной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что популяционный алгоритм МКО GDE3 позволяет находить решение для всех рассмотренных задач. Можно рекомендовать начинать решение задач МКО таких

типов с его применения, чтобы получить аппроксимацию множества ПОР в широком диапазоне значений ПК.

Далее целесообразно проверить применимость к конкретной задаче алгоритма MSSQP и возможность получения с его помощью решений, превосходящих по качеству полученные посредством GDE3. Экспериментальная проверка необходима, т.к. ответа на вопросы, по каким причинам алгоритм MSSQP для одних задач оказывается эффективным, а для других – непригодным, а также как он находит недоступные для других алгоритмов решения Задачи 3, пока нет. Необходим анализ влияния особенностей рельефов отдельных ПК в задачах МКО на процесс поиска решения. Эта область в последние годы активно исследуется, в т.ч. с применением интеллектуальных технологий [14, 15]. Но достаточно общих результатов на сегодня еще нет.

Применять MSSQP или, если он не находит пригодные решения, другие алгоритмы, основанные на скаляризации ЦФ, следует в случаях, когда надо найти небольшое число ПОР или необходимо обеспечить точные значения части ПК, что затруднительно при использовании популяционных алгоритмов МКО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуткин Л.С. *Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества*. М.: Советское радио; 1975. 368 с.
2. Черноуцкий И.Г. *Методы оптимизации в теории управления: учебное пособие*. СПб.: Питер; 2004. 256 с.
3. Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2017. 446 с.
4. Jasbir S.A. *Introduction to optimum design*. 4th edition. Elsevier; 2017. 670 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-15344-5>
5. Смирнов А.В. Оптимизация характеристик цифровых фильтров одновременно в частотной и временной областях. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):63–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>
6. Liu S., Lin Q., Tan K.Ch., Li Q. Benchmark problems for CEC2021 competition on evolutionary transfer multiobjective optimization. Technical Report. 2021. 24 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.08033>
7. Ray T., Mamun M.M., Singh H.K. A simple evolutionary algorithm for multi-modal multi-objective optimization. 2022. 8 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/2201.06718.pdf>
8. Wang Z., Yao X. An efficient multi-indicator and many-objective optimization algorithm based on two-archive. 2022. 15 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/2201.05435v1.pdf>

REFERENCES

1. Gutkin L.S. *Optimizatsiya radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazatelei kachestva (Optimization of Radio Electronic Devices with Aggregation of Quality Indices)*. Moscow: Sovetskoe radio; 1975. 368 p. (in Russ.).
2. Chernorutskii I.G. *Metody optimizatsii v teorii upravleniya: uchebnoe posobie (Optimization Methods in the Control Theory)*. St. Petersburg: Piter; 2004. 256 p. (in Russ.).
3. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennye prirodoy: uchebnoe posobie (Modern Search Optimization Algorithms. Nature-Inspired Optimization Algorithms)*. Moscow: Izd. MG TU im. Bauman; 2017. 446 p. (in Russ.).
4. Jasbir S.A. *Introduction to optimum design*. 4th edition. Elsevier; 2017. 670 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-15344-5>
5. Smirnov A.V. Optimization of digital filters performances simultaneously in frequency and time domains. *Russ. Technol. J.* 2020;8(6):63–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>
6. Liu S., Lin Q., Tan K.Ch., Li Q. Benchmark problems for CEC2021 competition on evolutionary transfer multiobjective optimization. Technical Report. 2021. 24 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.08033>
7. Ray T., Mamun M.M., Singh H.K. A simple evolutionary algorithm for multi-modal multiobjective optimization. 2022. 8 p. Available from URL: <https://arxiv.org/pdf/2201.05435v1.pdf>

9. Chen T., Li M. The weights can be harmful: Pareto search versus weighted search in multi-objective search-based software engineering. 2022. 40 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/2202.03728.pdf>
10. Смирнов А.В. Применение популяционных алгоритмов в задачах многокритериальной оптимизации характеристик электрических фильтров. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(3). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.015>
11. Tian Y., Cheng R., Zhang X., Jin Y. PlatEMO: A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2017;12(4):73–87. <https://doi.org/10.1109/MCI.2017.2742868>
12. Смирнов А.В. Свойства целевых функций и алгоритмов поиска в задачах многокритериальной оптимизации. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):75–85. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-75-85>
13. Смирнов А.В. Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях. *Российский технологический журнал*. 2018;6(6):13–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
14. Mersmann O., Bischl B., Trautmann H., Preuss M., Weihs C., Rudolf G. Exploratory landscape analysis. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'11)*. 2011. P. 829–836. <https://doi.org/10.1145/2001576.2001690>
15. Trajanov R., Dimeski S., Popovski M., Korošec P., Eftimov T. Explainable landscape-aware optimization performance prediction. In: *2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/SSCI50451.2021.9660124>
8. Wang Z., Yao X. An efficient multi-indicator and many-objective optimization algorithm based on two-archive. 2022. 15 p. Available from URL: <https://arxiv.org/pdf/2201.05435v1.pdf>
9. Chen T., Li M. The weights can be harmful: Pareto search versus weighted search in multi-objective search-based software engineering. 2022. 40 p. Available from URL: <https://arxiv.org/pdf/2202.03728.pdf>
10. Smirnov A.V. Application of population algorithms in the problems of multiobjective optimization of electrical filters characteristics. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(3) (in Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.015>
11. Tian Y., Cheng R., Zhang X., Jin Y. PlatEMO: A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2017;12(4):73–87. <https://doi.org/10.1109/MCI.2017.2742868>
12. Smirnov A.V. Properties of objective functions and search algorithms in multi-objective optimization problems. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):75–85 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-75-85>
13. Smirnov A.V. Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domain. *Russ. Technol. J.* 2018;6(6):13–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
14. Mersmann O., Bischl B., Trautmann H., Preuss M., Weihs C., Rudolf G. Exploratory landscape analysis. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'11)*. 2011. P. 829–836. <https://doi.org/10.1145/2001576.2001690>
15. Trajanov R., Dimeski S., Popovski M., Korošec P., Eftimov T. Explainable landscape-aware optimization performance prediction. In: *2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/SSCI50451.2021.9660124>

Об авторе

Смирнов Александр Витальевич, к.т.н., доцент, профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: av_smirnov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2696-8592>

About the author

Alexander V. Smirnov, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Telecommunications, Institute of Radioelectronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: av_smirnov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2696-8592>

УДК 621.396.66
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-52-59>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Защита аппаратуры с батарейным питанием от ошибочного подключения напряжения обратной полярности

В.П. Бабенко,
В.К. Битюков[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. В настоящее время широкое применение находит аппаратура с батарейным питанием (беспроводные датчики, кардиостимуляторы, «умные» браслеты, очки виртуальной реальности, беспилотные летающие аппараты, роботы, пирометры, автомобили, DC/DC преобразователи и др.). Для этих устройств принципиально важным вопросом является безопасное подключение первичных источников электропитания и наличие защиты от напряжения обратной полярности. Традиционное решение проблемы «переполюсовки» (подачи на прибор напряжения питания обратной полярности) с использованием диодов Шоттки при резервировании системы или увеличения мощности путем объединения источников питания по схеме ИЛИ вследствие большого падения напряжения приводит к значительным потерям мощности при больших токах, сложной проблеме теплоотвода и увеличению массогабаритных параметров. Это предопределило реализацию эффективных средств защиты аппаратуры с батарейным питанием от ошибочного подключения напряжения обратной полярности.

Методы. Задача решена с использованием схемотехнического моделирования в среде *Electronics Workbench*.

Результаты. Показано, что минимальный уровень потерь и малое падение напряжения при защите аппаратуры от обратной полярности питающего напряжения обеспечивают схемные решения «идеального диода» на дискретных компонентах и микросхемы типа «интегрального диода» с внешним и внутренним силовым транзистором MOSFET. Схемотехническое моделирование «идеальных диодов» на *p*- и *n*-канальных транзисторах, которые отличаются высокими техническими параметрами, позволило уточнить характеристики, потери напряжения и мощности в защищаемых цепях и показать простоту непосредственно самого технического решения. В статье обсуждены вопросы эффективности и современная элементная база устройств защиты.

Выводы. Приведены примеры элементной базы устройств защиты от «переполюсовки» источников питания, варианты защиты аппаратуры от воздействия напряжения обратной полярности, а также схемотехнические решения на дискретных и интегральных компонентах. Моделирование передаточных характеристик устройств защиты показало ограничение на минимальную величину входных напряжений около 4 В, обусловленную используемым MOSFET транзистором.

Ключевые слова: защита, батарейное электропитание, MOSFET, диод Шоттки, паразитный диод, «идеальный диод», подключение, напряжение, обратная полярность

• Поступила: 02.02.2022 • Доработана: 31.03.2022 • Принята к опубликованию: 05.09.2022

Для цитирования: Бабенко В.П., Битюков В.К. Защита аппаратуры с батарейным питанием от ошибочного подключения напряжения обратной полярности. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):52–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-52-59>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Protection of battery-powered devices against accidental swap of power supply connections

Valery P. Babenko,
Vladimir K. Bitukov @

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

Abstract

Objectives. Battery-powered devices (e.g., wireless sensors, pacemakers, watches and other wrist-worn devices, virtual reality glasses, unmanned aerial vehicles, robots, pyrometers, cars, DC/DC converters, etc.) are widely used today. For such devices, it is highly important to ensure safe primary power supply connection, including protection against reverse polarity. The conventional solution to the reverse polarity problem, involving the use of Schottky diodes during system redundancy or increasing power by combining two or more power supplies in the OR-ing circuit due to a large voltage drop, results in significant power losses at high currents, heat dissipation problems, and an increase in the mass and size of the equipment. For this reason, it becomes necessary to develop efficient battery-powered equipment protection against incorrect reverse polarity connection.

Methods. The problem is solved using circuit simulation in the *Electronics Workbench* environment.

Results. When protecting equipment against reverse voltage polarity, it is shown that the minimum level of losses and low voltage drop are provided by “ideal diode” circuit solutions based on discrete components and microcircuits of the “integrated diode” type with external and internal power metal–oxide–semiconductor field-effect transistors (MOSFETs). The circuit simulation of ideal diodes based on *p*- and *n*-channel transistors with superior technical parameters allows the characteristics and voltage and power losses in the protected circuits to be specified along with a presentation of the proposed technical solution simplicity. The contemporary component base of protection devices is discussed in terms of efficiency.

Conclusions. Examples of equipment for protecting against reverse voltage polarity are given along with circuit solutions based on discrete and integrated components. The simulation of the transfer characteristics of protection devices shows the limit for the minimum input voltage value of around 4 V using a MOSFET transistor.

Keywords: protection, battery power, MOSFET, Schottky diode, parasitic diode, ideal diode, connection, voltage, reverse polarity

• Submitted: 02.02.2022 • Revised: 31.03.2022 • Accepted: 05.09.2022

For citation: Babenko V.P., Bitukov V.K. Protection of battery-powered devices against accidental swap of power supply connections. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):52–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-52-59>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Портативность, функциональность и удобство использования электронной аппаратуры (беспроводных датчиков, кардиостимуляторов, «умных» браслетов, очков виртуальной реальности, беспилотных летающих аппаратов, роботов, пирометров, автомобилей, DC/DC преобразователей и др.) требуют применения в них автономного питания [1–6].

Для аппаратуры с батарейным питанием существует возможность неправильного ее подключения к первичному источнику электропитания, поэтому целесообразно предусмотреть защиту от «переплюсовки», т.е. от подачи на аппаратуру напряжения питания обратной полярности. Обычно батарейный отсек и контакты аппаратуры с батарейным питанием конструктивно выполняют таким образом, чтобы исключить возможность размещения элемента электропитания неправильно. Однако сохраняется вероятность ошибочного подключения клемм аккумулятора в устройствах автомобильной электроники, мобильного электротранспорта, телекоммуникационных серверах, системах хранения данных, инфраструктурном оборудовании серверов, а также при использовании дисковых элементов питания. При «переплюсовке» аккумулятора или при переходных процессах во время коммутации индуктивной нагрузки на линиях электропитания могут возникать напряжения обратной полярности, способные приводить к серьезным сбоям и повреждениям электронных систем и блоков. Обратная полярность при неверном включении аккумулятора электротранспорта опасна тем, что в течение некоторого времени могут генерироваться значительные токи величиной десятки-сотни ампер.

В таких случаях для защиты от неверной полярности источника питания приходится использовать схемотехнические решения и дополнительные электронные компоненты, что и является предметом анализа данной работы.

Для лучшего понимания процессов и факторов, влияющих на характеристики устройств защиты от «переплюсовки», использовалось схемотехническое моделирование в среде *Electronics Workbench* (*EWB*), что обусловлено спецификой поставленной задачи [7]. Кроме традиционного SPICE-анализа¹ *EWB* позволяет пользователям подключать к исследуемой схеме виртуальные контрольно-измерительные приборы, приближенные к реальным аналогам. В *EWB* имеется встроенная обширная библиотека аналоговых и цифровых электронных компонентов, большой профессиональный набор методов анализа различных характеристик электронных схем. Накоплен значительный опыт и существует обширная литература

по использованию *EWB* в разных областях аналоговой и цифровой электроники [7, 8]. Имеется встроенная библиотека мощных *n*- и *p*-канальных MOSFET² производителей International Rectifier (США) и Zetex Semiconductors (Великобритания), мощных диодов с *p-n*-переходом и диодов Шоттки (Motorola, США). При работе в *EWB* удобно использовать два способа моделирования, поддерживаемые программой:

- имитация электронной лаборатории, когда в электронную схему устанавливаются виртуальные измерительные приборы, подобные реальным приборам, и моделирование запускается выключателем Activate Simulation на рабочей панели;
- квазипрофессиональное моделирование, когда вид анализа задается из меню Analysis, в окне которого устанавливается вид анализа и узлы схемы, для которых просматривается результат моделирования.

ДИОДНАЯ ЗАЩИТА ОТ ОБРАТНОГО НАПЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

В самых простых способах защиты оборудования от обратного напряжения питания используется диод VD1 (рис. 1а), включенный последовательно с нагрузкой R1 [9].

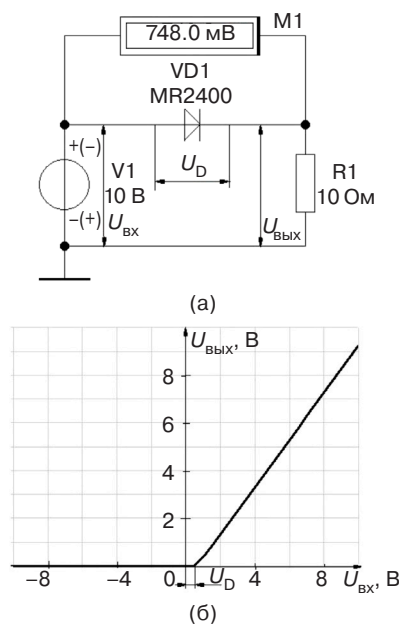


Рис. 1. Диодная защита от обратного напряжения питания: (а) схема, (б) передаточная характеристика. MR2400 – диод (производитель Infineon Technologies AG, Германия). Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81³

² MOSFET – metal–oxide–semiconductor field-effect transistor.

³ ГОСТ 2.710-81. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

¹ SPICE – simulation program with integrated circuit emphasis.

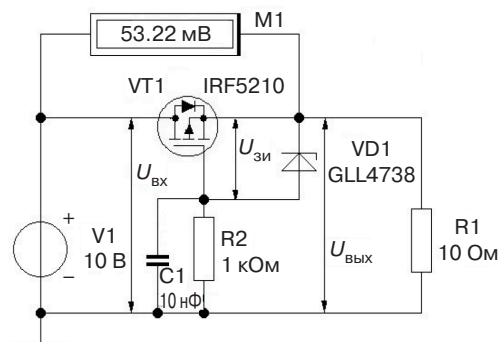
Передаточная характеристика (зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ на нагрузке R1 от входного напряжения $U_{\text{вх}}$) приведена на рис. 16. Для удобства оценки результатов при моделировании в режиме Analysis/DC Sweep напряжение источника V1, определяющего входное напряжение $U_{\text{вх}}$, изменялось в диапазоне от -10 В до $+10$ В. Вольтметр M1 показывал падение напряжения U_D на диоде VD1 в прямом направлении $U_D = 0.748$ В при прохождении через него тока нагрузки I_H около 1 А. При этом потери мощности в данной цепи на защитном диоде составили 0.748 Вт, что является крайне нежелательным для устройств с батарейным питанием. Диоды Шоттки с падением напряжения $U_D = 0.3 \dots 0.4$ В несколько улучшают характеристики диодной защиты. Но если речь идет о низких напряжениях питания порядка 3.3 В и ниже, характерных для питания современных интегральных схем (ИС) и микроконтроллеров, то даже такое незначительное падение напряжения может быть неприемлемым.

Иногда, когда нет возможности использовать специализированные ИС защиты от «переплюсовки», применяют схемы на дискретных компонентах с использованием дешевых, доступных и обладающих малым сопротивлением канала в открытом состоянии MOSFET. Подобные схемы за свои характеристики часто называют «идеальным диодом», а иногда «умным диодом»⁴.

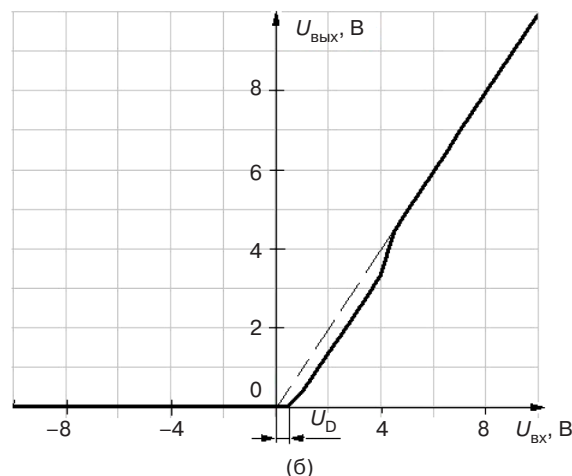
«ИДЕАЛЬНЫЙ ДИОД» НА p-MOSFET

Схема с использованием p-канального MOSFET, приведенная на рис. 2а, выполняет функцию защитного диода⁵.

В данной схеме на сток транзистора VT1 подано положительное напряжение источника входного напряжения V1. До подачи напряжения $U_{\text{вх}}$ канал транзистора заперт, т.к. затвор и исток имеют потенциал «земли» и напряжение $U_{\text{зи}}$ между затвором и истоком равно нулю. При подаче входного напряжения $U_{\text{вх}}$ положительной полярности ток протекает через прямосмещенный паразитный диод (Body Diode) в структуре MOSFET и нагрузку R1, создавая падение напряжения, близкое к $U_{\text{вх}}$. Паразитный диод открыт до тех пор, пока не откроется канал транзистора VT1 (это произойдет при напряжении $U_{\text{вх}}$ около 4.5 В). При этом открытый канал, благодаря своему низкому сопротивлению, шунтирует паразитный диод, обеспечивая на нем малое падение напряжения,



(а)



(б)

Рис. 2. Защита от «переплюсовки» на основе p-MOSFET: (а) схема, (б) передаточная характеристика. GLL4738 – стабилитрон (производитель Vishay, США)

что видно на передаточной характеристике, приведенной на рис. 2б [10, 11]. Вольтметр M1 измеряет падение напряжения $U_{\text{си}} = 53.22$ мВ на открытом транзисторе. При токе нагрузки $I_H = 1$ А это соответствует сопротивлению канала открытого транзистора $r_{\text{си откр}}$, равному 0.053 Ом, что близко к данным для транзистора IRF5210 $r_{\text{DS ON}} = 0.06$ Ом. При изменении полярности входного напряжения $U_{\text{вх}}$, формируемого источником V1, транзистор VT1 запирается и блокирует ток нагрузки (второй квадрант характеристики, показанной на рис. 2б).

Стабилитрон VD1 защищает транзистор VT1 от превышения допустимого напряжения «затвор-исток». Величина напряжения стабилизации выбирается равной $U_{\text{ст}} = 9 \dots 10$ В, чтобы напряжение было достаточным для надежного открытия транзистора VT1. Конденсатор C1 сглаживает отрицательные выбросы напряжения на нагрузке, которые могут возникать при быстром изменении полярности входного напряжения.

Если входное напряжение $U_{\text{вх}}$ невысокое и не превышает допустимых напряжений MOSFET ключа (обычно около 20 В), то защита от превышения допустимого напряжения не требуется. Схему можно

⁴ Basics of Ideal Diodes. Application Note. Texas Instruments Incorporated. SLVAE57B – FEBRUARY 2021. 24 p. <https://www.ti.com/lit/an/slvae57b/slvae57b.pdf?ts=1639001451460>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

⁵ <https://www.terraelectronica.ru/news/5444>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022 (in Russ.).

упростить, исключив элементы VD1, C1 и R2, при этом затвор транзистора подключается к «земле».

Минимальное входное напряжение при нормальной работе, начиная с которого эта схема имеет минимальные потери и похожа на «идеальный диод», начинается с напряжения отпирания транзистора (около 4.5 В). При меньшем напряжении канал транзистора заперт, а открыт только паразитный диод и падение напряжения на коммутаторе составляет около $U_D = 0.7$ В (рис. 2б). Пример защиты электронной автомобильной аппаратуры от напряжения обратной полярности приведен в литературе⁶.

Схема «идеального диода» на *p*-MOSFET привлекает простотой, имеет малое падение напряжения на транзисторном ключе в нормальном режиме работы и блокирует ток в случае «переплюсовки». Но при прочих равных условиях *p*-канальный MOSFET уступает своим *n*-канальным собратьям по таким параметрам как сопротивление открытого канала, максимальный ток, входная емкость и стоимость.

«ИДЕАЛЬНЫЙ ДИОД» НА *n*-MOSFET

Аналогичную схему защиты от «переплюсовки» можно реализовать на *n*-MOSFET, если включить его в цепь отрицательного вывода источника напряжения V1, как показано на рис. 3а [12].

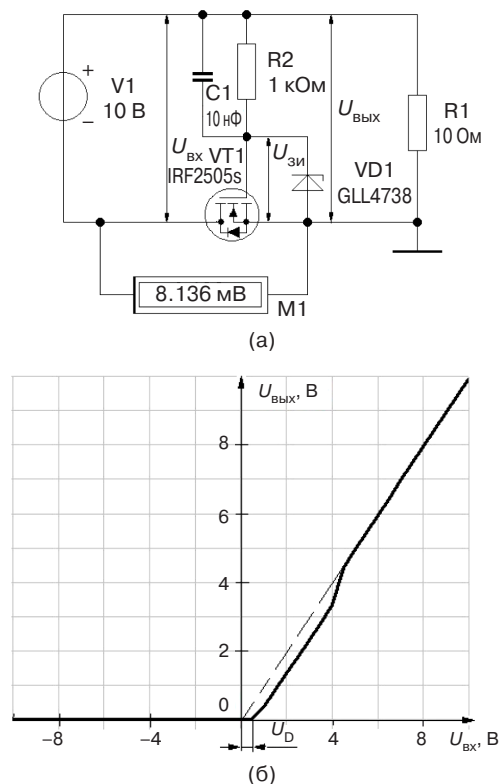


Рис. 3. Защита от переплюсовки на основе *n*-MOSFET: (а) схема, (б) передаточная характеристика

⁶ <https://www.terraelectronica.ru/news/5446>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022 (in Russ.).

Как и в предыдущей схеме, до подачи входного напряжения $U_{вх}$ канал транзистора VT1 заперт, т.к. $U_{зи} = 0$. При подаче положительного входного напряжения $U_{вх}$ открывается паразитный диод транзистора VT1 и ток протекает через сопротивление нагрузки R1. Как видно из передаточной характеристики (рис. 3б), при напряжении $U_{вх}$ около +4.5 В канал транзистора VT1 становится проводящим. Падение напряжения на открытом канале транзистора становится минимальным и равным 8.136 мВ. При токе нагрузки около 1 А это соответствует сопротивлению открытого канала $r_{си\text{ откр}}$, равному 8.136 мОм, что близко к данным Datasheet⁷ для транзистора IRL2505S $r_{DS\text{ ON}} = 0.008$ Ом.

Рассеиваемая мощность на транзисторе VT1 незначительна и равна около 8 мВт.

При «переплюсовке» источника питания транзистор VT1 запирается и блокирует обратный ток (второй квадрант передаточной характеристики, показанной на рис. 3б). Стабилитрон VD1, как и в предыдущей схеме, защищает от превышения допустимого напряжения транзистора VT1. Конденсатор C1 ≈ 10 нФ необходим для сглаживания отрицательного выброса напряжения на выходе, который может возникнуть в момент переключения полярности входного напряжения и привести к повреждению используемых электронных компонентов. Увеличением емкости конденсатора C1 можно увеличить время нарастания напряжения на затворе, что позволяет реализовать функцию «плавного включения».

При входном напряжении $U_{вх}$, меньшем допустимых напряжений для транзистора, можно исключить схему защиты от превышения между затвором и истоком, исключив элементы VD1, C1 и R2. При этом затвор транзистора подключается к «плюсу» источника питания.

Схема на *n*-MOSFET обеспечивает наиболее эффективную защиту от «переплюсовки». Однако вследствие того, что защита включена в «земляную» шину, возможны неудобства при построении большой системы с «земляной» звездой.

«ИДЕАЛЬНЫЙ ДИОД» В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Производители электронных компонентов предлагают достаточно широкий выбор высокоэффективных решений «идеальных диодов». Например, интегральный контроллер LM74610-Q1 (компания Texas Instruments, США)⁸, схема включения которого

⁷ Datasheet IRL2505S International Rectifier. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/84685/IRF/IRL2505S.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

⁸ Datasheet LM74610-Q1 Texas Instruments. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/810348/TI1/LM74610-Q1.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

показана на рис. 4, с внешним n -MOSFET VT1 выполняет функции «идеального диода». При правильной (положительной) полярности входного напряжения транзистор открывается и пропускает ток. Благодаря низкому сопротивлению открытого канала уровень рассеиваемой мощности оказывается минимальным. Если на вход схемы поступает напряжение обратной полярности, контроллер выключает транзистор менее чем за 8 мкс. Как и обычный диод, «идеальный диод» подключается к линии питания только с помощью выводов «Anode» и «Cathode». Контроллер не имеет связи с общим выводом, что обеспечивает нулевой ток собственного потребления. Для управления внешним силовым транзистором используется схема накачки заряда с внешним конденсатором V_{cap} .

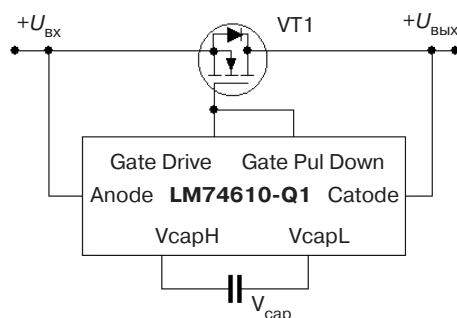


Рис. 4. Схема включения «идеального диода» LM74610-Q1

Контроллер предназначен для широкого спектра автомобильных приложений, способен выдерживать обратное напряжение до 45 В. Величина тока в цепи и рассеиваемой мощности определяется характеристиками внешнего транзистора.

Представленные на рис. 5 «идеальные диоды» LTC4411 и LTC4412 компании Linear Technology (США)^{9, 10}, ориентированы на использование p -канального MOSFET. При этом LTC4411 (рис. 5а) содержит встроенный транзистор с сопротивлением канала в открытом состоянии $r_{DS\ ON} = 0.14$ Ом, а LTC4412 – внешний транзистор, что расширяет диапазон контролируемых им токов.

Во время нормальной работы «идеальных диодов» падение напряжения на транзисторе может составлять до 28 мВ при токе не больше 2.6 А и входном напряжении от +2.6 В до +5.5 В. На кристалле интегральной схемы имеется устройство тепловой защиты, блокирующее ток при превышении допустимой температуры. Транзистор также отключается, если выходное напряжение превышает входное, при этом

обратный ток не превышает 1 мкА. Вывод CTL позволяет управлять включением/выключением с помощью внешних команд. Статусный вывод STAT индицирует состояние, когда при резервировании питания подается от альтернативного источника, напряжение на нагрузке имеется, а ток от основного источника питания через «идеальный диод» не протекает.

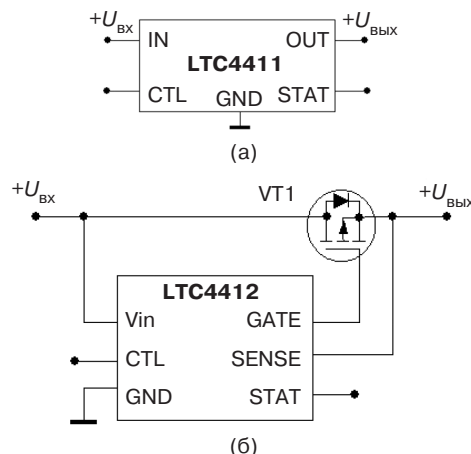


Рис. 5. Схема включения «идеального диода»: (а) LTC4411, (б) LTC4412

Контроллер LTC4412 (рис. 5б) управляет внешним p -MOSFET (в соответствии с устоявшимися правилами, если транзистор внешний, то управляющая схема называется контроллером). Допустимое входное напряжение – до 40 В, коммутируемый ток целиком определяется характеристиками внешнего транзистора. Выводы SENSE и STAT используются для переключения или распределения тока нагрузки при работе от нескольких источников питания. Драйвер затвора содержит внутренний ограничитель напряжения для защиты затвора транзистора.

На базе LTC4412 компания Linear Technology выпустила микросхему управления электропитанием LTC4412ES¹¹, представляющую собой «идеальный диод» с внешним p -канальным MOSFET и встроенным диодом Шоттки, что позволяет обеспечить эффективную работу по технологии «монтажное ИЛИ» нескольких источников питания на общую нагрузку (рис. 6).

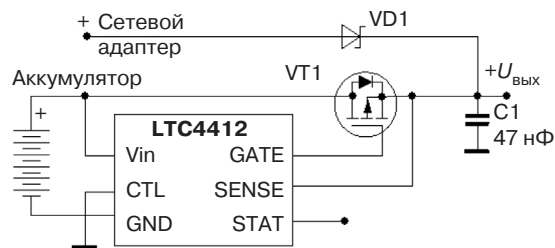


Рис. 6. Схема управления резервным питанием

⁹ Datasheet LTC4411 Linear Technology. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/94411/LINER/LTC4411.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

¹⁰ Datasheet LTC4412 Linear Technology. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/82845/LINER/LTC4412.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

¹¹ Datasheet LTC4412ES6 Linear Technology. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/82846/LINER/LTC4412ES6.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

При нормальной работе ток в нагрузку поступает от сетевого адаптера через диод Шоттки VD1. При отключении внешнего питания ток в нагрузку поступает от резервного аккумулятора. Падение напряжения на внешнем p -канальном MOSFET составляет менее 20 мВ.

ИС предназначена для использования в сотовых телефонах, ноутбуках, цифровых видеокамерах, бесперебойных источниках питания, мощных USB-периферийных устройствах, устройствах альтернативной энергетики.

На рис. 7 приведена схема защиты от напряжений при обратной полярности аккумулятора на базе специализированного контроллера LTC4359 (Linear Technology) с внешним n -MOSFET¹².

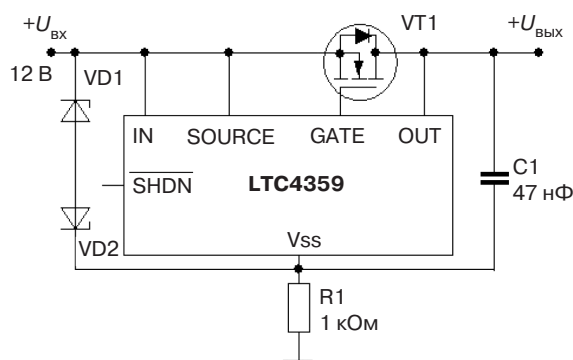


Рис. 7. Схема защиты аппаратуры автомобиля от обратной полярности аккумулятора

Стабилитроны VD1, VD2 и резистор R1 расширяют диапазон возможных входных напряжений.

¹² Datasheet LTC4359 Linear Technology. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1039943/LINER/LTC4359.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

При использовании рекомендуемого в качестве внешнего VT1 транзистора n -канального MOSFET BSC028N06NS (компания Infineon Technologies AG, Германия)¹³ с сопротивлением канала $r_{DS\ ON} = 2.8$ мОм и током до 132 А достигается небольшое тепловыделение, малые потери напряжения и малые габаритные размеры. Контроллер позволяет управлять питанием при резервировании (вывод SHDN), а также удовлетворяет строгим требованиям, предъявляемым к автомобильному и телекоммуникационному оборудованию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена элементная база устройств защиты от ошибочного подключения напряжения обратной полярности источников питания, варианты защиты аппаратуры от воздействия напряжения обратной полярности, а также схемотехнические решения на дискретных и интегральных компонентах. Схемотехническое моделирование «идеальных диодов» на p - и n -канальных транзисторах, которые отличаются высокими техническими параметрами, позволило уточнить характеристики, потери напряжения/мощности в защищаемых цепях и показать простоту непосредственно самого технического решения.

Вклад авторов

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

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

¹³ Datasheet BSC028N06NS Infineon Technologies. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/470560/INFINEON/BSC028N06NS.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guy J. Схема защиты от переплюсовки с автоматическим исправлением полярности. *РадиоЛоцман*. 2021;(7–8):120–121. URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=643745>
2. Чоудхари В. Решения устойчивого к переходным процессам первичного DC/DC-преобразователя системы питания автомобильной электроники. *Силовая электроника*. 2017;3(66):30–34. URL: <https://power-e.ru/wp-content/uploads/6630.pdf>
3. Казанцев Д.П., Щербак В.Ф., Закамалдин Д.А., Казанцев Ю.Е., Пронин А.В., Молодых С.В. *Электрокардиостимулятор*: пат. 2531695 РФ. Заявка № 2012156979/14; заявл. 24.12.2012, опубл. 27.10.2014. Бюл. № 30.
4. Гарелина С.А., Латышенко К.П., Фрунзе А.В., Горбунов Р.А. Практическая реализация пирометров для измерения температуры пламени и объектов сквозь пламя. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2020;2(45):110–115.

REFERENCES

1. Guy J. Automatic polarity correction circuit for reverse polarity protection. *RadioLotsman = RadioLocman*. 2021;(7–8):120–121 (in Russ.). Available from URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=643745>
2. Choudhary V. Transient resistant primary DC/DC converter solutions for automotive power systems. *Silovaya elektronika = Power Electronics*. 2017;3(66):30–34 (in Russ.). Available from URL: <https://power-e.ru/wp-content/uploads/6630.pdf>
3. Kazantsev D.P., Shcherbak V.F., Zakamaldin D.A., Kazantsev Yu.E., Pronin A.V., Molodykh S.V. *Electric cardiac pacemaker*: RF Pat. 2531695. Publ. 27.10.2014 (in Russ.).
4. Garelina S.A., Latyshenko K.P., Frunze A.V., Gorbunov R.A. Practical implementation of pyrometers for measuring flame temperature and objects through a flame. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoi zashchity = Scientific and Educational Tasks of Civil Defence*. 2020;2(45):110–115 (in Russ.).

5. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Понижающе-повышающий DC/DC преобразователь с единственной индуктивностью. *Микроэлектроника*. 2022;51(1): 60–70. <https://doi.org/10.31857/S0544126921060041>
6. Oleynik V. Схема коррекции полярности защищает устройства с батарейным питанием. *РадиоЛоцман*. 2021;(7–8):122–124. URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=643793>
7. Бабенко В.П., Битюков В.К. Имитационное моделирование процессов переключения силовых полевых транзисторов в программе Electronics Workbench. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(2):199–205. <https://doi.org/10.1134/S0033849419020025>
8. Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С. Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключках. *Российский технологический журнал*. 2018;6(1):20–39. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39>
9. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Силовой MOSFET-ключ переменного тока. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем* «Радиоинфоком-2021»: Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2021. С. 305–308.
10. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Источники вторичного электропитания*. М.: Инфра-Инженерия; 2020. 376 с.
11. Бабенко В.П., Битюков В.К. Нитрид-галлиевые транзисторы в силовых цепях постоянного и переменного тока. В сб.: *Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ – 2021: Материалы XIV Международной научно-технической конференции*. Владимир: ВлГУ; 2021. С. 54–59.
12. Walker J. MOSFET в низковольтных схемах защиты от обратного напряжения. *РадиоЛоцман*. 2019;2: 58–59. URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=588375>
5. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. DC/DC buck-boost converter with single inductance. *Mikroelektronika = Russian Microelectronics*. 2022;51(1):60–70 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0544126921060041>
6. Oleynik V. Polarity correcting circuit protects battery-powered device. *RadioLotsman = RadioLocman*. 2021; (7–8):122–124 (in Russ.). Available from URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=643793>
7. Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of switching of high-power FETS using the Electronics Workbench software. *J. Commun. Technol. Electron.* 2019;64(2): 176–181. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020025> [Original Russian Text: Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of switching of high-power FETS using the Electronics Workbench software. *Radiotekhnika i elektronika*. 2019;64(2):199–205 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0033849419020025>]
8. Babenko V.P., Bityukov V.K., Kuznetsov V.V., Simachkov D.S. Simulation of static and dynamic losses in MOSFET keys. *Russ. Technol. J.* 2018;6(1):20–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39>
9. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. AC power MOSFET switch. In: *Actual Problems and Perspectives for the Development of Radio Engineering and Infocommunication (Radioinfocom 2021): Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2021. P. 305–308 (in Russ.).
10. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Secondary power sources*. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2020. 376 p. (in Russ.).
11. Babenko V.P., Bityukov V.K. Gallium nitride transistors in DC and AC power circuits. In: *Perspective Technology in Means of Information Transfer – PTMIT-2021: Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference*. Vladimir: VIGU; 2021. P. 54–59 (in Russ.).
12. Walker J. FET supplies low-voltage reverse-polarity protection. *RadioLotsman = RadioLocman*. 2019;2:58–59 (in Russ.). Available from URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=588375>

Об авторах

Бабенко Валерий Павлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vbabenko16091940@gmail.com. Scopus Author ID 57220534735, SPIN-код РИНЦ 2815-3866

Битюков Владимир Ксенофонтович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, SPIN-код РИНЦ 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

About the authors

Valery P. Babenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Wave Processes and Technology, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vbabenko16091940@gmail.com. Scopus Author ID 57220534735, RSCI SPIN-code 2815-3866

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

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

УДК 621.385.6
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-60-69>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Технология синтеза и электронная структура тройных карбонатов бария-стронция-кальция для катодов СВЧ-приборов

В.И. Капустин ^{1, @},
И.П. Ли ^{2, @},
Н.Е. Кожевникова ²,
Э.Ф. Худайгулова ³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² АО «Плутон», Москва, 107120 Россия

³ Московский государственный университет, Москва, 119991 Россия

@ Авторы для переписки, e-mail: kapustin@mirea.ru, i.li@pluton.msk.ru

Резюме

Цели. Тройные карбонаты бария-стронция-кальция различных марок широко используются для нанесения оксидных покрытий на катоды электровакуумных приборов. Из всех типов катодов в электровакуумных приборах оксидные катоды являются одними из самых распространенных, т.к. сочетают в себе эффективность, долговечность, работу при относительно небольших температурах и сравнительно невысокую стоимость. Цели работы – разработка технологии синтеза тройных карбонатов бария-стронция-кальция с неравновесным фазовым составом, состоящим из собственно тройного карбоната и фазы чистого карбоната бария, разработка методики контроля качества такого карбоната для применения его в качестве компонента катодного материала для СВЧ-приборов, а также исследование влияния на электронную структуру кристаллитов оксида бария легирующих микропримесей из состава других фаз катодного материала.

Методы. Использована методика прецизионного рентгеноструктурного анализа и методы электронной спектроскопии.

Результаты. Разработана технология совместного осаждения тройных карбонатов бария-стронция-кальция из их азотнокислых солей, которая при выборе оптимального режима осаждения позволяет получать порошки тройного карбоната с неравновесным фазовым составом. Методами электронной спектроскопии показано, что легирующие примеси кальция, стронция, никеля в кристаллитах оксида бария, формирующихся при термообработке тройных карбонатов, существенно влияют на параметры электронной структуры кристаллитов.

Выводы. Совместное влияние кальция и стронция свидетельствует о наличии так называемого синергетического эффекта при легировании оксида бария двумя другими химическими элементами. Методика прецизионного рентгеноструктурного анализа позволяет эффективно контролировать качество неравновесного фазового состава тройных карбонатов, формирующегося при синтезе тройных карбонатов методом титрования и контролировать процессы агломерации наночастиц либо рекристаллизации наноструктурированных фаз, формирующихся при синтезе тройных карбонатов.

Ключевые слова: металлопористые катоды, катодный материал, термоэлектронная эмиссия, электронная структура, рентгеноструктурный анализ

• Поступила: 28.03.2022 • Доработана: 05.04.2022 • Принята к опубликованию: 07.09.2022

Для цитирования: Капустин В.И., Ли И.П., Кожевникова Н.Е., Худайгулова Э.Ф. Технология синтеза и электронная структура тройных карбонатов бария-стронция-кальция для катодов СВЧ-приборов. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-60-69>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Technology of synthesis and electronic structure of triple barium–strontium–calcium carbonates for cathodes of microwave devices

Vladimir I. Kapustin ^{1, @},
Illarion P. Li ^{2, @},
Natalya E. Kozhevnikova ²,
Elvira F. Khudaigulova ³

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Pluton, Moscow, 107120 Russia

³ Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

@ Corresponding authors, e-mail: kapustin@mirea.ru, i.li@pluton.msk.ru

Abstract

Objectives. Triple barium–strontium–calcium carbonates of various grades are widely used for depositing oxide coatings on cathodes of electrovacuum devices. Of all types of cathodes used in electrovacuum devices, oxide cathodes are among the most common, due to combining efficiency, durability, operation at relatively low temperatures, and a relatively low cost. The aims of this work were to: create a technology for the synthesis of triple barium–strontium–calcium carbonates with nonequilibrium phase compositions that comprise the triple carbonate proper and a pure barium carbonate phase; develop a quality control procedure for such a carbonate for using it as a component of the cathode material for microwave devices; study how the electronic structure of barium oxide crystallites is affected by doping microimpurities from other phases of the cathode material.

Methods. The study used precision X-ray diffraction analysis and electron spectroscopy.

Results. A technology was developed for the co-precipitation of triple barium–strontium–calcium carbonates from their nitrate salts. Under optimal precipitation conditions, this produces triple carbonate powders with nonequilibrium phase compositions. Electron spectroscopy showed that the parameters of the electronic structure of the crystallites are significantly affected by doping impurities of calcium, strontium, and nickel in barium oxide crystallites formed by heat treatment of triple carbonates.

Conclusions. Calcium and strontium have a synergistic effect on the doping of barium oxide with the two other chemical elements. As well as efficiently controlling the quality of the nonequilibrium phase composition of triple carbonates, which is formed during the synthesis of triple carbonates by the titration method, precision X-ray diffraction analysis can be used to efficiently control the processes of agglomeration of nanoparticles or recrystallization of nanostructured phases formed during the synthesis of triple carbonates.

Keywords: porous-metal cathodes, cathode material, thermionic emission, electronic structure, X-ray diffraction analysis

• Submitted: 28.03.2022 • Revised: 05.04.2022 • Accepted: 07.09.2022

For citation: Kapustin V.I., Li I.P., Kozhevnikova N.E., Khudaigulova E.F. Technology of synthesis and electronic structure of triple barium–strontium–calcium carbonates for cathodes of microwave devices. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-60-69>

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

Тройные карбонаты бария-стронция-кальция до настоящего времени широко применяются в качестве компонента многих типов катодов СВЧ электровакуумных приборов, в частности в качестве основного компонента оксидно-никелевого катода. Основные характеристики тройных карбонатов строго определены по химическому и гранулометрическому составу [1, 2]. Существуют различные технологии синтеза тройных карбонатов [3–11]. В то же время эффективность функционирования таких катодов сильно зависит от технологии синтеза тройных карбонатов бария-стронция-кальция. На рис. 1а приведена равновесная тройная диаграмма состояния тройных карбонатов [12], а на рис. 2б – диаграмма состояния тройных оксидов [13], которые формируются в результате разложения тройных карбонатов при активировании катодов прогревом при температуре примерно 1000 °С. На диаграммах заштрихованы области составов, применяемых в катодной электронике.

Практически применяемые составы тройных карбонатов представляют собой арагонит с ромбоэдрической кристаллической структурой – тройной твердый раствор карбонатов. Однако известно [14], что в случае термического разложения такого тройного карбоната при активировании катодов и образовании тройного твердого раствора оксидов бария-стронция-кальция работа выхода такого материала будет выше, чем работа выхода чистого оксида

бария. Действительно, в литературе отмечено, что фазовый состав тройных карбонатов, а значит и эффективность его применения при изготовлении катодов, сильно зависит от режима его синтеза [12, 15].

Целями данной работы являются разработка технологии синтеза тройных карбонатов бария-стронция-кальция с неравновесным фазовым составом, состоящим из собственно тройного карбоната и фазы чистого карбоната бария, разработка методики контроля качества такого карбоната для применения его в качестве компонента катодного материала для СВЧ-приборов, а также исследование влияния на электронную структуру кристаллитов оксида бария легирующих микропримесей из состава других фаз катодного материала.

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ТРОЙНОГО КАРБОНАТА

Тройные карбонаты бария-стронция-кальция марки КТА-1-6 получали быстрым приливанием 3.5-молярного водного раствора углекислого аммония, стабилизированного аммиаком к 1-молярному водному раствору соответствующих азотнокислых солей при комнатной температуре. Тройной карбонат бария-стронция-кальция марки КТА-1-4 получали приливанием 0.9-молярного водного раствора соответствующих азотнокислых солей, нагретых до 45 °С, к 3.5-молярному водному раствору углекислого аммония, стабилизированного аммиаком.

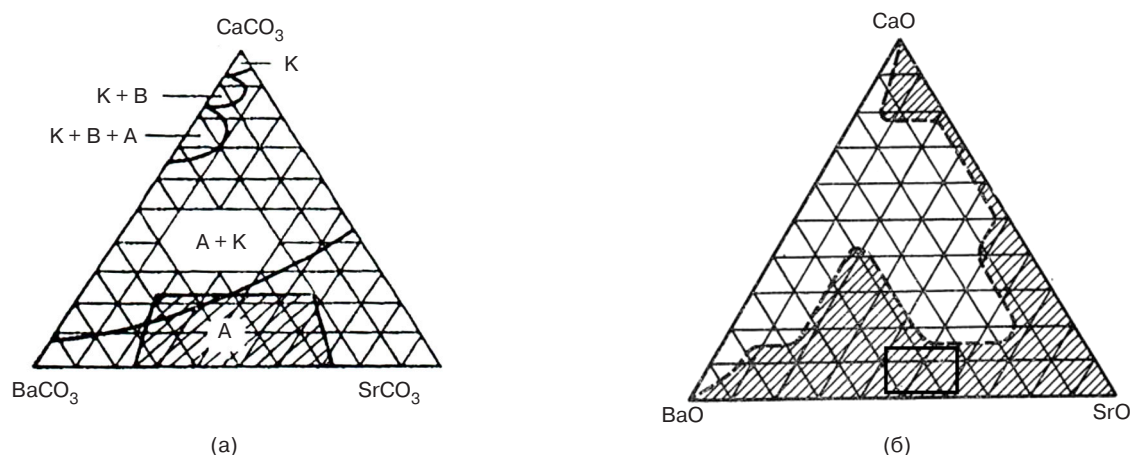
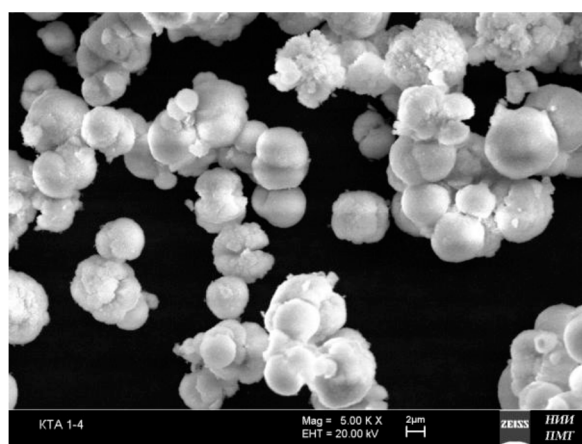


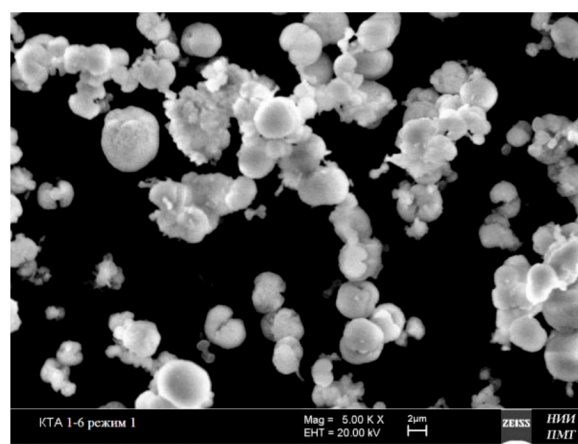
Рис. 1. Фазовые диаграммы систем $\text{BaCO}_3\text{--SrCO}_3\text{--CaCO}_3$ (а) [1] и BaO--CaO--SrO (б) [2]

Таблица 1. Режимы синтеза тройных карбонатов бария-стронция-кальция

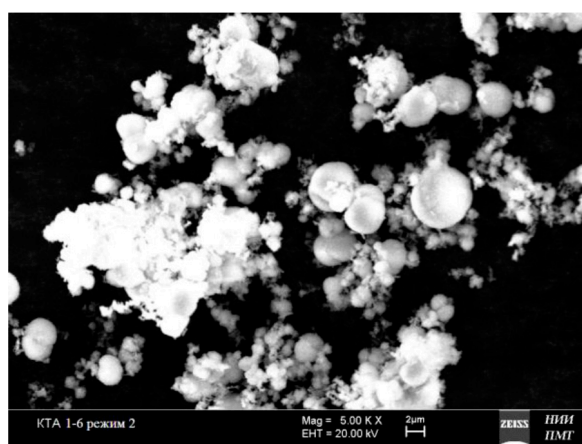
Параметр	Варианты продуктов синтеза			
	КТА-1-4	КТА-1-6, режим 1	КТА-1-6, режим 2	КТА-1-6, режим 3
Морфология продукта	Рис. 2а	Рис. 2б	Рис. 2в	Рис. 2г
Средний размер зерна, мкм (измерено на ПСХ-10а, ЛабНаучПрибор, Россия)	3.9	1.9	0.9	2.0
Состав $\text{BaCO}_3\text{:SrCO}_3\text{:CaCO}_3$, %	50:43:6	50:43:6	50:43:6	54:40:5
Температура раствора нитратов, °С	46	26	30	30
Молярная концентрация раствора нитратов	0.9	1	1	1



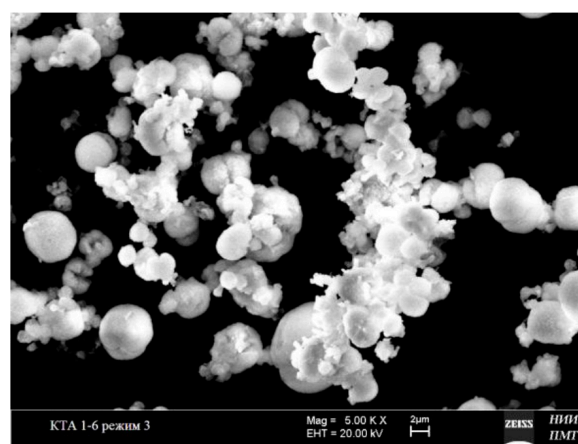
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 2. Микрофотографии частиц тройного карбоната бария-стронция-кальция

При отработке технологии синтеза неравновесных фазовых составов тройных карбонатов были исследованы различные режимы синтеза, различающиеся скоростью приливания осаждающего компонента в раствор азотнокислых солей и скоростью перемешивания реагирующих растворов.

Структуру порошков продуктов синтеза исследовали методом электронной спектроскопии, фазовый состав исследовали методом рентгенофазового анализа. В табл. 1 приведены режимы синтеза тройных карбонатов, а на рис. 2 – морфология частиц продуктов синтеза.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ СИНТЕЗА

Продукты синтеза были исследованы методом рентгеноструктурного анализа с использованием добавления в анализируемый материал 20%-го порошка германия в качестве внутреннего эталона, т.к. параметры кристаллической структуры германия известны до пятого знака после запятой. Предварительно были проведены исследования чистого карбоната бария, рентгенограмма которого приведена на рис. 3а. На рис. 3б в качестве примера

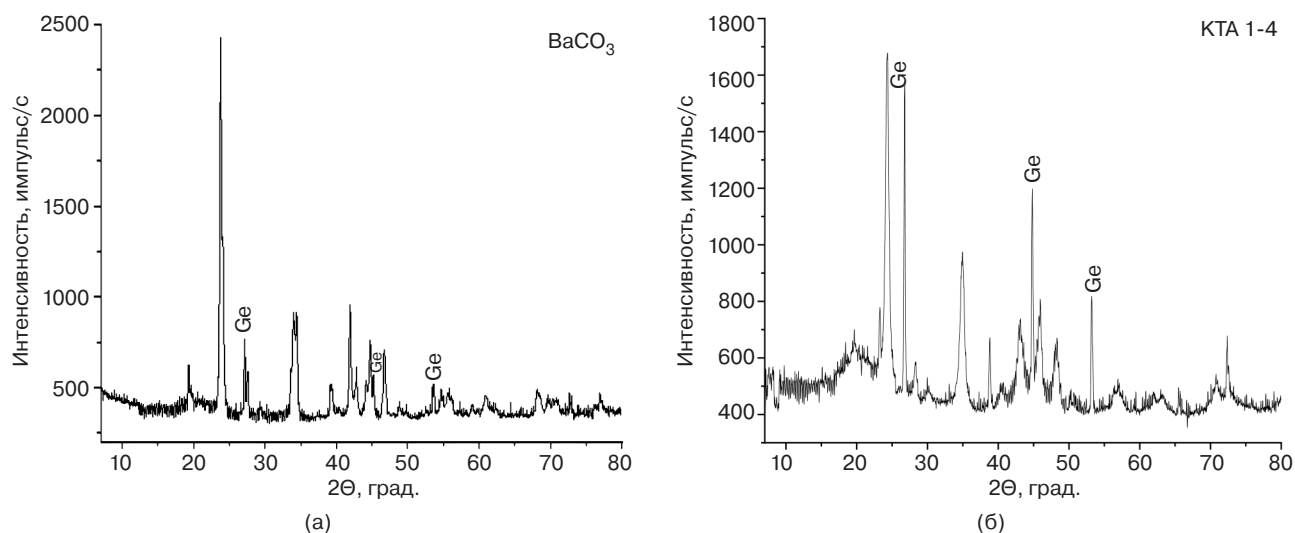


Рис. 3. Рентгенограмма карбоната BaCO_3 (а) и тройного карбоната марки КТА-1-4 (б)

приведена рентгенограмма синтезированного нами тройного карбоната марки КТА-1-4.

Анализ фазового состава различных продуктов синтеза тройного карбоната показал, что, помимо твердых растворов тройных карбонатов, в продуктах синтеза содержится и чистый карбонат бария, причем содержание его сильно зависит от режима синтеза. Наиболее значимые характеристики рентгенофазового анализа продуктов синтеза тройных карбонатов, а также характеристики чистого карбоната бария приведены в табл. 2.

Анализ полученных рентгенограмм и параметров, приведенных в табл. 2, позволил сформулировать критерии контроля качества тройных карбонатов бария-стронция-кальция для эффективного применения данного материала в качестве компонента катодов СВЧ-приборов. На рис. 4 приведена схема выделения критериев качества тройного карбоната по участку рентгенограммы в области двойных углов развертки рентгеновского спектра 22° – 28° .

На рис. 4 пик 1 – это пик германия, используемого в качестве внутреннего эталона и позволяющего

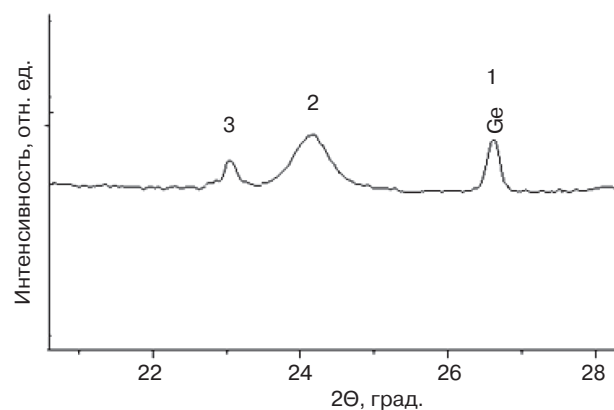


Рис. 4. Схема выделения параметров контроля качества тройных карбонатов

определять положение других пиков на рентгенограмме с точностью до пятого знака после запятой. При этом пик 2 относится к фазе твердого раствора тройных карбонатов, а пик 3 – к фазе чистого карбоната бария. Резюмируя результаты исследований, можно сформулировать физические критерии качества тройного карбоната бария-стронция-кальция

Таблица 2. Параметры контроля качества тройных карбонатов

Параметры	Материал				
	BaCO_3	КТА-1-4	КТА-1-6, режим 1	КТА, режим 2	КТА, режим 3
a , положение пика тройного карбоната, град.	–	23.318	23.654	24.673	23.644
d , межплоскостное расстояние пика в тройном карбонате, А	–	3.660	3.611	3.608	3.613
$\delta\theta$, уширение пика тройного карбоната, град.	–	0.40	0.43	0.46	0.42
a_0 , положение пика карбоната бария, град.	23.778	23.262	23.660	24.22	23.618
Δa , смещение пика карбоната бария, град.	Эталон	–0.516	–0.118	0.442	–0.160
$\delta\theta_0$, уширение пика карбоната бария, град.	0.31	0.20	0.06	0.07	0.10
I , площадь пика карбоната бария в образце относительно площади тройного карбоната, %	100	7.5	1.1	3.8	2.3

для применения его в качестве компонента материалов катодов СВЧ-приборов:

- положение пика 2 (тройного карбоната) отражает состав твердого раствора тройного карбоната;
- ширина пика 2 (тройного карбоната) отражает разброс состава тройного карбоната;
- положение пика 3 (чистого карбоната бария) отражает уровень легирования микропримесями, в том числе кальция и стронция;
- ширина пика 3 (чистого карбоната бария) отражает размер кристаллитов чистого карбоната бария;
- отношение площадей пиков 3 и 2 отражает содержание чистого карбоната бария в продукте синтеза.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

Другим компонентом оксидно-никелевых катодов, помимо тройного карбоната бария-стронция-кальция, является никель в виде порошка с размером частиц 15–25 мкм. Никель выполняет функцию металлической фазы, повышающей тепло- и электропроводность материала, а также катализатора разложения тройного карбоната до соответствующих оксидов бария-стронция-кальция. Кроме того, атомы никеля, внедряясь в кристаллическую решетку оксида бария, влияют на параметры электронной структуры оксида. Очевидно, что функции катализатора и легирующего элемента более эффективно смогут выполнять наночастицы никеля, введенные в состав катодного материала в качестве дополнительного компонента. В связи с этим, нами была исследована электронная структура материала состава $0.9\text{Ni} + 0.1(\text{тройной карбонат КТА-1-6} + 0.1\text{Ni(нано)})$. В качестве нанопорошка был использован порошок никеля с размерами частиц 80 нм, изготовленный по нашему заказу в Научно-производственном комплексе «Передовые порошковые технологии» (г. Томск, Россия) распылением проволоки никеля методом электровзрыва.

При исследовании электронной структуры материалов был использован электронный спектрометр высокого разрешения Theta Probe (производитель Thermo Fisher Scientific, США). Спектрометр оснащен электронным анализатором высокого разрешения типа сферического зеркала, источником рентгеновского излучения, электронными пушками нескольких типов и позволяет проводить исследования материалов методами электронной спектроскопии для химического анализа и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов.

В качестве исходных компонентов при изготовлении экспериментальных образцов были использованы порошок тройного карбоната марки КТА-1-6

(ОСТ 11-ОД0.028.002-76¹, Плутон, Россия); порошок никеля с размерами частиц 15–25 мкм марки ПНК-1Л7 (Кольская ГМК, Россия); порошок наноникеля (ТУ 1791-003-36280340-2008, Передовые порошковые технологии², Россия). После перемешивания компонентов в смесителе типа «турбула» ПАСМ1.000.001 (НПК «ИСТЭЛ», Россия) образцы материалов помещали в молибденовые лодочки (изготовленные вручную по ГОСТ 25442-82³ из листа молибдена марки МЧ, толщиной листа 0.22 мм, ПО «Вольфрам», Россия) с алундированным молибденовым вкладышем (изготовлены алундированием листов молибдена по внутренней технологии предприятия) на никелевых пластинах и спекали «насыпью» в вакуумной печи СШВЭ-1-2,5/25-И2 (НПО «ЦНИИТМАШ, Россия) с плавным подъемом температуры до 1200 °С в течение 2 ч. Для исследования прессовали таблетки диаметром 7.6 мм и толщиной 1 мм. Прессование осуществляли на лабораторном прессе Vaneox 25t (FLUXANA GmbH & Co.KG., Германия) в стальных пресс-формах при удельном усилии прессования $P_{\text{уд}} \sim 4.5\text{--}5 \text{ т/см}^2$.

На рис. 5 приведен электронный спектр состояний бария в исследованном образце материала состава $0.9\text{Ni} + 0.1(\text{тройной карбонат КТА-1-6} + 0.1\text{Ni(нано)})$, а в табл. 3 дана его расшифровка.

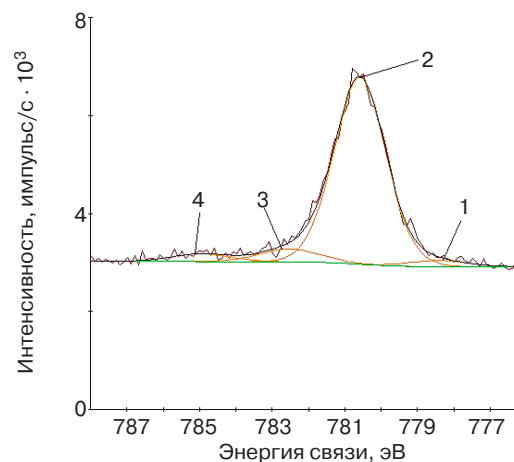


Рис. 5. Электронный спектр бария в образце материала $0.9\text{Ni} + 0.1(\text{КТА} + 0.1\text{Ni (нано)})$

¹ ОСТ 11-ОД0.028.002-76. Приборы электровакуумные. Карбонаты щелочно-земельных металлов бария, стронция, кальция. Технические условия. <http://www.docum.ru/ost.asp?id=262135>. Дата обращения 28.10.2022. [OST 11-ОД0.028.002-76. Electro-vacuum devices. Carbonate of alkaline-earth metals of barium, strontium, calcium. Specifications. <http://www.docum.ru/ost.asp?id=262135>. Accessed October 28, 2022 (in Russ.).]

² <http://www.nanosized-powders.com>. Дата обращения 28.10.2022. / Accessed October 28, 2022 (in Russ.).

³ ГОСТ 25442-82. Межгосударственный стандарт. Полосы молибденовые отожженные для глубокой вытяжки. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов; 2004. [GOST 25442-82. Interstate standard. Molybdenum annealed strips for deep drawing. Specifications. Moscow: Izd. Standartov; 2004 (in Russ.).]

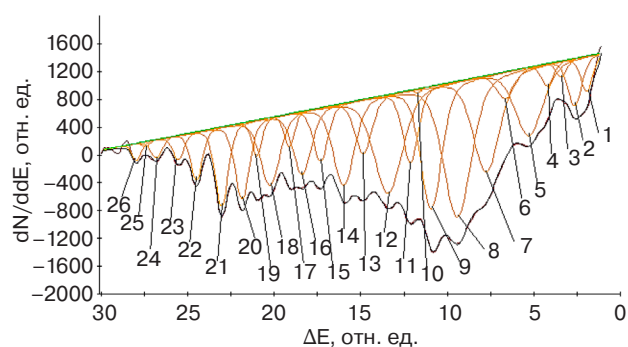
Таблица 3. Расшифровка электронного спектра бария в образце материала 0.9Ni + 0.1(KTA + 0.1Ni (нано))

№ пика	Энергия пика, эВ	Интенсивность пика, импульс/с	Ширина пика, эВ	Барий в соединении
1	778.43	124.17	1.96	Ba(OH) ₂ · 2H ₂ O
2	780.58	3806.47	1.74	Ba _(1-y) O _(1-x) Ni _y
3	782.51	262.61	1.98	BaO _(1-x)
4	784.94	159.08	1.95	Ba _(1-y) O _(1-x) Ca _y

Таблица 4. Параметры характеристических потерь в оксидных фазах материала 0.9Ni + 0.1(KTA + 0.1Ni (нано))

№ фазы	Фазовый состав	Параметр				
		$E_{\text{пов}}, \text{эВ}$	$E_{\text{об}}, \text{эВ}$	$N_{\text{пов}}, \text{м}^{-3}$	$N_{\text{об}}, \text{м}^{-3}$	$N_{\text{пов}}/N_{\text{об}}$
1	BaO _(1-x)	1.96	2.56	$4.84 \cdot 10^{24}$	$4.15 \cdot 10^{24}$	1.17
2	Ba _(1-y-z) O _(1-x) Ca _y Sr _z	3.40	5.42	$1.05 \cdot 10^{25}$	$1.33 \cdot 10^{25}$	0.79
3	Ba _(1-y) O _(1-x) Ni _y	7.81	10.84	$4.76 \cdot 10^{25}$	$4.60 \cdot 10^{25}$	1.03

Методом спектроскопии характеристических потерь энергии электронов были исследованы плазменные потери энергии электронов при возбуждении объемных и поверхностных плазмонов в оксидных фазах из табл. 3. На рис. 6 приведен спектр характеристических потерь энергии электронов после его дифференцирования для более четкого выделения пиков характеристических потерь.

**Рис. 6.** Спектр характеристических потерь энергии электронов в материале 0.9Ni + 0.1(KTA + 0.1Ni (нано))

Оксид бария, формирующийся при термообработке материала и содержащий кислородные вакансии, является полупроводником донорного типа, при этом остальные карбонатные или оксидные фазы в катодном материале – диэлектрики. Поэтому при бомбардировке поверхности материала электронами средних энергий они будут испытывать характеристические потери энергии, обусловленные возбуждением объемных и поверхностных плазмонов – коллективных колебаний электронов кислородных вакансий, энергии которых, соответственно $E_{\text{об}}$ и $E_{\text{пов}}$, определяются известными выражениями:

$$\Delta E_{\text{об}} = \sqrt{\frac{e^* \hbar^2 N_{\text{об}}}{\epsilon \epsilon_0 m^*}}, \quad (1)$$

$$\Delta E_{\text{пов}} = \sqrt{\frac{e^* \hbar^2 N_{\text{пов}}}{\epsilon \epsilon_0 m^*}}, \quad (2)$$

где e^* – эффективный заряд кислородной вакансии, m^* – эффективная масса электронов кислородных вакансий, $\hbar$ – постоянная Планка, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, $\epsilon = 3.6$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость оксида бария, $N_{\text{об}}$ – объемная концентрация кислородных вакансий, $N_{\text{пов}}$ – поверхностная концентрация кислородных вакансий.

Таким образом, полные потери ΔE на возбуждение плазменных колебаний можно представить в виде:

$$\Delta E = n_1 E_{\text{об}} + n_2 E_{\text{пов}}, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 – целые числа.

Пики характеристических потерь 1–26 на рис. 6 хорошо группируются в 9 рядов, которые (по три ряда) относятся к фазам BaO_(1-x), Ba_(1-y)O_(1-x)Ni_y, Ba_(1-y)O_(1-x)Ca_y. В табл. 4 приведены сводные данные по параметрам характеристических потерь энергии электронов, а также рассчитанные значения объемной и поверхностной концентрации кислородных вакансий в различных фазах оксида бария.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, технология совместного осаждения тройных карбонатов бария-стронция-кальция из их азотнокислых солей при выборе оптимального режима осаждения позволяет получать порошки

тройного карбоната с неравновесным фазовым составом.

Результаты исследования электронной структуры карбонатов, содержащих нанопорошок никеля, позволяют сделать следующие выводы:

1. В фазе $Ba_{(1-y)}O_{(1-x)}Ni_y$ величины объемной и поверхностной концентраций кислородных вакансий выше, чем в простой фазе $BaO_{(1-x)}$, что должно сопровождаться более низкой работой выхода данной фазы, а значит и более высокой плотностью тока термоэмиссии.
2. В фазе $Ba_{(1-y)}O_{(1-x)}Ca_ySr_z$ величина объемной концентрации вакансий меньше, чем в фазе $Ba_{(1-y)}O_{(1-x)}Ni_y$, однако отношение поверхностной и объемной концентрации вакансий существенно меньше единицы, т.е. поверхность обеднена кислородными вакансиями, что должно сопровождаться уменьшением искривления энергетических зон вверх, т.е. снижением работы выхода материала.
3. Совместное влияние кальция и стронция свидетельствует о наличии так называемого синергетического эффекта при легировании оксида бария двумя другими химическими элементами.

Результаты исследования кристаллической структуры тройных карбонатов, синтезированных методом титрования, позволяют сделать следующие заключения:

- методика прецизионного рентгеноструктурного анализа позволяет эффективно контролировать качество неравновесного фазового состава тройных карбонатов, формирующегося при синтезе тройных карбонатов методом титрования;
- методика прецизионного рентгеноструктурного анализа позволяет эффективно контролировать процессы агломерации наночастиц либо рекристаллизации наноструктурированных фаз, формирующихся при синтезе тройных карбонатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов Б.П. *Оксидный катод*. М.: Энергия; 1979. 240 с.
2. Капустин В.И., Ли И.П., Кожевникова Н.Е., Худайгулова Э.Ф. Новые критерии контроля качества тройных карбонатов бария-стронция-кальция. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2021;3(262):94–98. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46663947>
3. Карсакова М.Б., Петрова О.Б. Процессы кристаллообразования тройных карбонатов для технологии катодов электровакуумных приборов. В сб.: *Молодежь и XXI век – 2022*. Материалы 12-й Международной молодежной научной конференции: в 4-х т. Курск; 2022. Т. 4. С. 32–36.

Вклад авторов

В.И. Капустин – определение научной концепции; изучение электронной структуры материалов; анализ и интерпретация данных; написание первоначального текста статьи.

И.П. Ли – исследование структуры порошков синтезированных продуктов методом электронной спектроскопии; анализ и интерпретация данных; участие в написании первоначальной версии текста статьи.

Н.Е. Кожевникова – разработка технологии синтеза неравновесных фазовых составов тройных карбонатов; синтез тройных карбонатов марок КТА-1-6, КТА-1-4; подготовка образцов материалов для изучения их электронной структуры; участие в написании первоначальной версии текста статьи.

Э.Ф. Худайгулова – исследование фазового состава порошков синтезированных продуктов методом рентгенофазового анализа; участие в написании первоначальной версии текста статьи.

Все авторы одобрили окончательный вариант текста статьи.

Authors' contributions

V.I. Kapustin – definition of the research concept; study of the electronic structure of materials; analysis and interpretation of data; writing the initial text of the manuscript.

I.P. Li – investigation of the powder structure of synthesized products via electron spectroscopy; analysis and interpretation of data; participation in writing the initial text of the manuscript.

N.E. Kozhevnikova – development of technology for the synthesis of non-equilibrium phase compositions of triple carbonates; conducting the synthesis of triple carbonates of KTA-1-6, KTA-1-4 grades; preparation of samples of materials to study their electronic structure; participation in writing the initial text of the manuscript.

E.F. Khudaigulova – investigation of the phase composition of powders of synthesized products via X-ray phase analysis; participation in writing the initial text of the manuscript.

All authors have approved the final manuscript for publication.

REFERENCES

1. Nikonov B.P. *Oksidnyi katod (Oxide Cathode)*. Moscow: Energiya; 1979. 240 p. (in Russ.).
2. Kapustin V.I., Li I.P., Kozhevnikova N.E., Khudaigulova E.F. New criteria for quality control of raw barium-strontium-carbonates calcium. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory*. 2021;3(262):94–98 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46663947>
3. Karsakova M.B., Petrova O.B. Processes of crystal formation of triple carbonates for the technology of cathodes of electrovacuum devices. In: *Youth and 21st century 2022*. Proceedings of the 12th International Youth Scientific Conference. In 4 v. Kursk; 2022. V.1. P. 32–36 (in Russ.).

4. Мосин А.Д., Пастушкова А.А. Исследование структуры тройных карбонатов. В сб.: *Научно-технический прогресс: информация, технология, механизм*. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак; 2020. С. 83–87.
5. Капустин В.И., Ли И.П., Кожевникова Н.Е., Карсакова М.Б., Худайгулова Э.Ф. Синтез и анализ наноразмерных кристаллитов тройных карбонатов бария–стронция–кальция для катодов СВЧ приборов. В сб.: *XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. Сборник докладов. Санкт-Петербург. 30 мая – 3 июня 2022 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 427–431. URL: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2022/427-431.pdf>
6. Александров Е.М., Шофман Г.С., Лубянецкая К.Ф., Фельдман Ф.С. *Способ изготовления эмиссионного материала для оксидных катодов*: пат. 2019878 РФ. Заявл. 26.02.1992; опублик. 15.09.1994.
7. Артюшенко А.И., Батура З.Е., Кривобок В.И., Находнова А.П. *Способ получения мелкодисперсных порошков тройных и двойных карбонатов щелочноземельных элементов*: пат. 180572 РФ. Заявка № 809296/23-4; заявл. 19.12.1962; опублик. 19.03.1966. Бюл. № 8.
8. Доржин Г.С., Незнаев Г.Н., Китаева Т.И., Русакова Ж.П. *Способ получения смешанных карбонатов щелочноземельных металлов*: пат. 520330 РФ. Заявка № 2013007; заявл. 05.04.1974; опублик. 05.07.1976.
9. Евстигнеева Н.К., Калинина И.Д. *Способ получения порошков двойных или тройных карбонатов щелочноземельных металлов*: пат. 880983 РФ. Заявка № 2895040; заявл. 04.01.1980; опублик. 15.11.1981.
10. Смородинова Л.А., Арянина Т.Г. *Эмиссионный материал*: пат. 873301 РФ. Заявка № 2860081; заявл. 27.12.1979; опублик. 15.10.1981.
11. Киселев А.Б., Лобова Э.В., Никонов Б.П. *Способ изготовления активного покрытия оксидных катодов*: пат. 383109 РФ. Заявка № 1608332/26-25; заявл. 04.01.1971; опублик. 23.05.1973.
12. Большаков А.Ф., Абалдуев Б.В., Попов А.И. Фазовая неоднородность смешанных кристаллов карбонатов щелочноземельных металлов и ее влияние на свойства оксидного катода. *Известия АН СССР. Сер. Неорганические материалы*. 1977;13(7):1270–1274.
13. Мойжес Б.Я. *Физические процессы в оксидном катоде*. М.: Наука; 1968. 480 с.
14. Капустин В.И., Ли И.П. *Теория, электронная структура и физикохимия материалов катодов СВЧ приборов: монография*. М.: ИНФРА-М; 2020. 370 с. ISBN 978-5-16-015560-9
15. Чистякова М.А., Подкопаева Н.Н., Коникова Р.А. Исследование структурно-фазовых превращений оксидного покрытия катодов в процессе формирования и срока службы. *Электронная техника. Серия 4. Электровакuumные и газоразрядные приборы*. 1977;4:106–113.
4. Mosin A.D., Pastushkova A.A. Study of the structure of triple carbonates. In: *Scientific and technological progress: information, technology, mechanism the collection*. Collection of articles on results of the International Scientific and Practical Conference. Sterlitamak; 2020. P. 83–87 (in Russ.).
5. Kapustin V.I., Li I.P., Kozhevnikova N.E., Karsakova M.B., Khudaigulova E.F. Synthesis and analysis of nanoscale crystallites of triple barium–strontium–calcium carbonates for cathodes of microwave devices. In: *XI Vserossiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Elektronika i mikroelektronika SVCh” (The 11th All-Russian Scientific and Technical Conference “Microwave Electronics and Microelectronics.”* Collection of reports. St. Petersburg. May 30 – June 3, 2022). St. Petersburg: SPbGETU LETI. P. 427–431 (in Russ.). Available from URL: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2022/427-431.pdf>
6. Aleksandrov E.M., Shofman G.S., Lubyansetskaya K.F., Fel’dman F.S. *Method for manufacturing emission material for oxide cathodes*: RF Pat. 2019878. Publ. 15.09.1994 (in Russ.).
7. Artyushenko A.I., Batura Z.E., Krivobok V.I., Nakhodnova A.P. *Method for obtaining fine powders of triple and double carbonates of alkaline earth elements*: RF Pat. 180572. Publ. 19.03.1966 (in Russ.).
8. Dorzhin G.S., Neznaev G.N., Kitaeva T.I. Rusakova Zh.P. *Method for obtaining mixed carbonates of alkaline earth metals*: RF Pat. 520330. Publ. 05.07.1976 (in Russ.).
9. Evstigneeva N.K., Kalinina I.D. *Method for obtaining powders of double or triple carbonates of alkaline earth metals*: RF Pat. 880983. Publ. 15.11.1981 (in Russ.).
10. Smorodina L.A., Aryanina T.G. *Emission material*: RF Pat. 873301. Publ. 15.10.1981 (in Russ.).
11. Kiselev A.B., Lobova E.V., Nikonov B.P. *Method for manufacturing an active coating of oxide cathodes*: RF Pat. 383109. Publ. 23.05.1973 (in Russ.).
12. Bol’shakov A.F., Abalduyev B.V., Popov A.I. Phase inhomogeneity of mixed crystals of alkaline earth metal carbonates and its influence on the properties of an oxide cathode. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Neorganicheskiye materialy*. 1977;13(7):1270–1274 (in Russ.).
13. Moizhes B.Ya. *Fizicheskie protsessy v oksidnom katode (Physical processes in the oxide cathode)*. Moscow: Nauka; 1968. 480 p. (in Russ.).
14. Kapustin V.I., Li I.P. *Teoriya, elektronnaya struktura i fizikokhimiya materialov katodov SVCh priborov: monografiya (Theory, electronic structure and physical chemistry of microwave device cathode materials)*. Moscow: INFRA-M; 2020. 370 p. (in Russ.). ISBN 978-5-16-015560-9
15. Chistyakova M.A., Podkopaeva N.N., Konikova R.A. Investigation of structural-phase transformations of the oxide coating of cathodes during the formation and service life. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 4. Elektrovakuumnye i gazorazryadnye pribory*. 1977;4:106–113 (in Russ.).

Об авторах

Капустин Владимир Иванович, д.ф.-м.н., профессор, главный специалист, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kapustin@mirea.ru. Scopus Author ID 7006839899, ResearcherID U-9032-2017, SPIN-код РИНЦ 5072-5992

Ли Илларион Павлович, д.т.н., директор технического центра «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон» (105120, Россия, Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11). E-mail: i.li@pluton.msk.ru. SPIN-код РИНЦ 9208-6634

Кожевникова Наталья Евгеньевна, начальник лаборатории синтеза эмиссионно-активных соединений АО «Плутон» (105120, Россия, Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11). E-mail: azariia@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8022-1238>

Худайгулова Эльвира Фанильевна, магистрант, Физический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2). E-mail: hudaygulovaelya@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-2778-0329>

About the authors

Vladimir I. Kapustin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Specialist, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kapustin@mirea.ru. Scopus Author ID 7006839899, ResearcherID U-9032-2017, RSCI SPIN-code 5072-5992

Illarion P. Li, Dr. Sci. (Eng.), Director of the Technical Center “Basic Technology of Electric Vacuum Devices,” Pluton (11, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya ul., Moscow, 105120 Russia). E-mail: i.li@pluton.msk.ru. RSCI SPIN-code 9208-6634

Natalya E. Kozhevnikova, Head of the Laboratory for the Synthesis of Emission-Active Compounds, Pluton (11, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya ul., Moscow, 105120 Russia). E-mail: azariia@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8022-1238>

Elvira F. Khudaigulova, Undergraduate Student, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University (1-2, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia). E-mail: hudaygulovaelya@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-2778-0329>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 517.63
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-70-77>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Методы и эффективные алгоритмы решения многомерных интегральных уравнений

А.Б. Самохин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
© Автор для переписки, e-mail: absamokhin@yandex.ru

Резюме

Цели. Интегральные уравнения давно и широко используются в математической физике для доказательства теорем существования и единственности решения краевых задач для дифференциальных уравнений. Однако, несмотря на то что интегральные уравнения имеют ряд преимуществ по сравнению с соответствующими краевыми задачами – все краевые условия присутствуют в ядрах уравнений, они практически не использовались для численного решения задач. Это связано с тем, что при дискретизации интегральных уравнений возникают системы уравнений с плотными матрицами, в отличие от разреженных матриц в случае дифференциальных уравнений. В последнее время, в связи с развитием вычислительной техники и методов вычислительной математики, интегральные уравнения начали использоваться при численном решении конкретных задач. В работе предложены два метода численного решения двумерных и трехмерных интегральных уравнений, описывающих многие важные классы задач математической физики.

Методы. Для дискретизации интегральных уравнений использовался метод коллокации на неравномерной и равномерной сетках. Для численного решения полученных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) используются итерационные методы. Для случая равномерной сетки построен эффективный метод умножения матрицы СЛАУ на вектор.

Результаты. Построены соответствующие СЛАУ, описывающие рассматриваемые классы задач. Для решения систем уравнений, полученных с использованием равномерной сетки, предложены эффективные алгоритмы решения, использующие быстрое дискретное преобразование Фурье.

Выводы. СЛАУ с использованием неравномерной сетки имеют преимущество, связанное с хорошим описанием областей сложной конфигурации, но при этом есть существенные ограничения на размерность СЛАУ. При использовании равномерной сетки размерность СЛАУ может быть на несколько порядков больше, однако в этом случае могут возникать трудности с описанием сложной конфигурации области. Выбор того или иного метода зависит от конкретной задачи и имеющихся вычислительных ресурсов. Для многих двумерных задач может быть предпочтительнее СЛАУ на неравномерной сетке, а для трехмерных задач – предпочтительнее СЛАУ на равномерной сетке.

Ключевые слова: интегральные уравнения, метод коллокации, быстрое преобразование Фурье

• Поступила: 14.12.2021 • Доработана: 10.01.2022 • Принята к опубликованию: 15.09.2022

Для цитирования: Самохин А.Б. Методы и эффективные алгоритмы решения многомерных интегральных уравнений. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):70–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-70-77>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Methods and effective algorithms for solving multidimensional integral equations

Alexander B. Samokhin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Integral equations have long been used in mathematical physics to demonstrate existence and uniqueness theorems for solving boundary value problems for differential equations. However, despite integral equations have a number of advantages in comparison with corresponding boundary value problems where boundary conditions are present in the kernels of equations, they are rarely used for obtaining numerical solutions of problems due to the presence of equations with dense matrices that arise that when discretizing integral equations, as opposed to sparse matrices in the case of differential equations. Recently, due to the development of computer technology and methods of computational mathematics, integral equations have been used for the numerical solution of specific problems. In the present work, two methods for numerical solution of two-dimensional and three-dimensional integral equations are proposed for describing several significant classes of problems in mathematical physics.

Methods. The method of collocation on non-uniform and uniform grids is used to discretize integral equations. To obtain a numerical solution of the resulting systems of linear algebraic equations (SLAEs), iterative methods are used. In the case of a uniform grid, an efficient method for multiplying the SLAE matrix by vector is created.

Results. Corresponding SLAEs describing the considered classes of problems are set up. Efficient solution algorithms using fast Fourier transforms are proposed for solving systems of equations obtained using a uniform grid.

Conclusions. While SLAEs using a non-uniform grid can be used to describe complex domain configurations, there are significant constraints on the dimensionality of described systems. When using a uniform grid, the dimensionality of SLAEs can be several orders of magnitude higher; however, in this case, it may be difficult to describe the complex configuration of the domain. Selection of the particular method depends on the specific problem and available computational resources. Thus, SLAEs on a non-uniform grid may be preferable for many two-dimensional problems, while systems on a uniform grid may be preferable for three-dimensional problems.

Keywords: integral equations, collocation method, fast Fourier transform

• Submitted: 14.12.2021 • Revised: 10.01.2022 • Accepted: 15.09.2022

For citation: Samokhin A.B. Methods and effective algorithms for solving multidimensional integral equations. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):70–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-70-77>

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

Пусть в евклидовом пространстве E_n , где $n = 2, 3$, задана ограниченная область Q . Это значит, что Q является фигурой на плоскости ($n = 2$) или в пространстве ($n = 3$). Будем рассматривать следующее интегральное уравнение в области Q

$$(1 + \alpha\eta(x))u(x) + \int_Q \frac{K(x-y)}{R^m} \eta(y)u(y)dy = \\ = u^0(x), x \in Q, m \leq n. \quad (1)$$

В (1) $R = |x - y|$; $x = (x_1, \dots, x_n)$; $y = (y_1, \dots, y_n)$; α, η, K, u^0 – известные функции, причем $K(x - y)$ – дифференцируемая функция координат; u – неизвестная функция.

Уравнение вида (1) описывает многие практически важные классы задач. Опишем некоторые задачи математической физики, которые сводятся к уравнению (1):

- рассеяние акустических волн на прозрачном неоднородном препятствии [1]. В этом случае $m < n$, $\alpha = 0$, а остальные функции, входящие

в уравнение (1), являются скалярными. Тогда уравнение является классическим интегральным уравнением Фредгольма 2-го рода;

- рассеяние электромагнитных волн на неоднородном, в общем случае анизотропном, диэлектрическом теле [2, 3]. В этом случае $m = n$ и поэтому интегральный оператор в (1) будет сингулярным; u, u^0 будут векторными функциями; a и K – тензорными. Величина α определяет внеинтегральный член сингулярного оператора и зависит от формы выделяемой особенности и ее центра. Например, если выделяемая особенность – шар ($n = 3$) или круг ($n = 2$), то $\alpha = 1/n$ [4, 5].

С помощью интегральных уравнений могут быть описаны и другие классы задач математической физики [6–8].

Ниже будем полагать, что уравнение (1) имеет единственное решение в соответствующем функциональном пространстве. Для решения (1), которое описывает реальные задачи, возможно использование только численных методов. Тогда уравнение (1), с использованием метода Галеркина или метода коллокации, аппроксимируется системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с плотной матрицей. При этом, в силу многомерности уравнения, размерность N получающихся систем, как правило, очень велика ($N \gg 1000$).

Основными критериями эффективности численного алгоритма являются: число арифметических операций T , которое требуется выполнить для получения решения исходной задачи; объем требуемой памяти компьютера M для реализации алгоритма. При использовании прямого метода Гаусса для решения СЛАУ необходимо выполнить $T \sim N^3$ арифметических операций и хранить в памяти компьютера порядка $M \sim N^2$ чисел. Ясно, что для решения рассматриваемых задач требуются значительные вычислительные ресурсы. Для итерационных методов указанные характеристики алгоритмов оцениваются формулами [9]:

$$T \sim LT_A, M \sim M_A, \quad (2)$$

где T_A – число арифметических операций, которое требуется для умножения матрицы СЛАУ на вектор; L – количество итераций, необходимое для получения решения с заданной точностью; M_A – число различных элементов матрицы.

МЕТОД КОЛЛОКАЦИИ

Для аппроксимации интегрального уравнения (1) будем использовать метод коллокации [3, 10, 11]. Отметим важное отличие многомерных задач от одномерных, рассматриваемых на отрезке $[a, b]$. Для

таких одномерных задач при численном решении не возникает проблем, связанных с описанием границы области. Для двумерных и, тем более, трехмерных задач возникают определенные сложности при дискретизации интегральных уравнений, определенных в областях сложной формы.

Представим область Q в виде объединения N_Q ячеек $\Omega(i)$, $i = 1, \dots, N_Q$. Узловые точки в этих ячейках будем выбирать в их центрах, которые определяются формулами [12]:

$$x_l^c = \frac{\int x_l dx}{mes \Omega}, \quad l = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где $dx = dx_1 dx_2$ для двумерных задач, $dx = dx_1 dx_2 dx_3$ для трехмерных задач, $x^c = (x_1^c, \dots, x_n^c)$ – центр ячейки Ω , а $mes \Omega$ – ее объем ($n = 3$) или площадь ($n = 2$).

Если в области Ω определена дифференцируемая функция своих аргументов $f(x)$, то справедливо приближенное равенство:

$$\int_{\Omega} f(x) dx \approx f(x^c) mes \Omega. \quad (4)$$

Выражение (4) будет точным равенством, если $f(x)$ – линейная функция аргументов.

Если в качестве ячеек рассматриваются тетраэдры ($n = 3$) или треугольники ($n = 2$) произвольной формы, то можно достаточно точно описать многие сложные конфигурации области Q . Центр соответствующих ячеек определяется простой формулой:

$$x_l^c = \frac{\sum_{k=1}^{n+1} x_l^{(k)}}{n+1}, \quad l = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где $(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ – декартовы координаты k -й вершины ячейки.

Будем аппроксимировать интегральное уравнение (1) СЛАУ размерности $\sim N_Q$ относительно значений неизвестной функции в узловых точках области Q , находящихся в центрах x^{ci} ячеек $\Omega(i)$, $i = 1, \dots, N_Q$. Размеры ячеек будем выбирать так, чтобы в пределах ячейки искомая функция слабо менялась. Тогда соответствующую СЛАУ можно представить в следующем виде [3, 13]:

$$\gamma(i)u(i) + \sum_{j=1}^{N_Q} A(i, j) \eta(j)u(j) = u^0(i),$$

$$i = 1, \dots, N_Q, \quad \gamma(i) = 1 + \alpha(i)\eta(i),$$

$$A(i, j) = \int_{\Omega(j)} \frac{K(x^{ci} - y)}{|x^{ci} - y|^m} dy, i \neq j, \quad A(i, i) = 0,$$

$$u(i) = u(x^{ci}), u^0(i) = u^0(x^{ci}), \eta(i) = \eta(x^{ci}). \quad (6)$$

Для векторных задач тензор $a(i)$ определяется формой ячейки $\Omega(i)$ и ее центром.

Для вычисления интегралов в (6) можно использовать приближенную формулу (5) либо более точные алгоритмы численного интегрирования. Отметим, что, поскольку узловые точки находятся в центре ячеек, точность аппроксимации интегральных операторов $\sim h^2$, где h – максимальный диаметр ячеек (диаметром ячейки называем максимальное расстояние между точками границы). Для относительно небольших значений $N_Q \leq 10\,000$ можно решать систему уравнений (6) прямыми или итерационными методами. Ниже изложим эффективные алгоритмы, которые с использованием итерационных методов позволяют решать систему (6) со значительно большей размерностью.

МЕТОД КОЛЛОКАЦИИ НА РАВНОМЕРНОЙ СЕТКЕ

В ядре интегрального уравнения (1) присутствует член, зависящий от разности декартовых координат точек x и y . Однако это обстоятельство никак не использовалось при построении СЛАУ (6). Ниже, используя равномерную сетку и алгоритмы дискретного преобразования Фурье, построим эффективный численный метод решения уравнения (1).

Сначала дадим некоторые вспомогательные формулы, использующие дискретное преобразование Фурье. Рассмотрим комплексную функцию $f(n)$ дискретного аргумента $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Будем полагать, что $f(n)$ – периодическая функция с периодом N , т.е. $f(n \pm N) = f(n)$ для любых n .

Дискретное преобразование Фурье от функции $f(n)$ определяется известной формулой

$$F[f] = f^F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(i \frac{2\pi}{N} kn\right) f(n), k = \overline{0, N-1}, \quad (7)$$

где, очевидно, Фурье-трансформанта $f^F(k)$ – также периодическая функция с периодом N .

Если мы знаем Фурье-трансформанту $f^F(k)$, то можно восстановить исходную функцию $f(n)$, используя обратное дискретное преобразование Фурье

$$F^{-1}[f^F] = f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \exp\left(-i \frac{2\pi}{N} kn\right) f^F(k), n = \overline{0, N-1}. \quad (8)$$

В общем случае число арифметических операций $T_F(N)$, которое требуется для вычисления дискретного преобразования Фурье, без затрат на вычисление функций вида $\exp\left(i \frac{2\pi}{N} kn\right)$, оценивается формулой

$$T_F(N) \sim N^2. \quad (9)$$

При использовании алгоритмов быстрого дискретного преобразования Фурье (БПФ), число требуемых арифметических операций оценивается формулой [3]

$$T_{FF}(N) \sim N \log(N), \quad (10)$$

где $\log(N)$ – целочисленный логарифм, т.е. сумма всех простых делителей числа N . Если N является степенью двойки, то $T_{FF}(N) \sim N \log_2(N)$.

Пусть $A(l)$ – периодическая функция дискретного аргумента с периодом N . Рассмотрим суммы следующего вида:

$$v(n) = \sum_{m=0}^{N-1} A(n-m)u(m), \quad n = \overline{0, N-1}. \quad (11)$$

Суммы (11) возникают при умножении циркулянтных матриц на вектор. Применим дискретное преобразование Фурье с периодом N к обеим частям (11). Несложно показать, что

$$v^F(k) = A^F(k)u^F(k), \quad k = \overline{0, N-1}. \quad (12)$$

Используя (12) и алгоритмы БПФ, можно эффективно умножать циркулянтные матрицы на вектор. Однако циркулянтные матрицы редко появляются в реальных задачах. Но во многих задачах, в частности, рассматриваемых ниже, требуется вычислять суммы вида (11), в которых функция $A(l)$, $-(N-1) \leq l \leq (N-1)$, является произвольной в указанном диапазоне. Подобные суммы возникают при умножении теплицевых матриц на вектор [14, 15]. Указанная функция $A(l)$ определена в $(2N-1)$ целочисленной точке. Доопределим функцию $A(l)$ нулем в точке $l = N$ и продолжим ее на все целочисленные значения с периодом $2N$. Далее функцию дискретного аргумента $u(m)$, $m = 0, \dots, N-1$, определим нулем в точках $m = N, \dots, 2N-1$. Теперь рассмотрим суммы следующего вида:

$$v(n) = \sum_{m=0}^{2N-1} A(n-m)u(m), \quad n = \overline{0, 2N-1}. \quad (13)$$

Из вышеизложенного следует, что при $n = 0, \dots, N-1$ функция $v(n)$ из (13) совпадает со значениями $v(n)$ из (11). Далее для быстрого вычисления сумм (13) будем использовать формулу

$$v^F(k) = A^F(k)u^F(k), \quad k = \overline{0, 2N-1}. \quad (14)$$

При этом в обратном преобразовании Фурье для нас имеют значение только компоненты $v(n)$, $n = \overline{0, N-1}$. Таким образом, из (10) следует, что число арифметических операций для вычисления (11) оценивается формулой

$$T_A \sim 2N \log(2N). \quad (15)$$

При этом в памяти компьютера необходимо хранить массив с числом элементов

$$M_A \sim 2N. \quad (16)$$

Перейдем к дискретизации интегрального уравнения (1). Сначала будем рассматривать трехмерные задачи. В прямоугольной декартовой системе координат определим параллелепипед Π , внутри которого находится область Q . Ребра параллелепипеда параллельны осям координат, а длины ребер равны $N_l h_l$, $l = 1, 2, 3$, где h_l – шаги сетки по декартовым координатам. Тогда параллелепипед Π можно представить как объединение ячеек (элементарных параллелепипедов) $\Pi(p)$, $p = (p_1, p_2, p_3)$, $p_l = 0, \dots, N_l - 1$. Определим область $\tilde{Q}$ как объединение N_Q ячеек, центры которых лежат внутри области Q . Узловые точки, в которых определяются значения функций, будем задавать в центрах ячеек и обозначать как $x(p)$, а значения функций в этих точках – как $f(p)$.

Интегральное уравнение (1) будем аппроксимировать, аналогично (6), используя СЛАУ следующего вида [5]:

$$\gamma(p)u(p) + \sum_{y(q) \in Q} A(p-q)\eta(q)u(q) = u^0(p), \quad x(p) \in Q,$$

$$A(p-q) = \int_{\Pi(q)} \frac{K(x(p)-y)}{|x(p)-y|^m} dy, \quad p \neq q, \quad A(0) = 0,$$

$$\gamma(p) = 1 + \alpha(p)\eta(p). \quad (17)$$

Поскольку узловые точки находятся в центре ячеек, точность аппроксимации интегрального оператора $\sim h^2$, $h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2}$.

Из (17) следует, что основные вычислительные затраты при умножении матрицы СЛАУ на вектор

(выполнение одной итерации) связаны с вычислением сумм вида

$$W(p) = \sum_{y(q) \in Q} A(p-q)V(q), \quad x(p) \in Q. \quad (18)$$

Для вычисления $W(p)$ в узловых точках $x(p) \in Q$ требуется выполнить $\sim N_Q^2$ арифметических операций, где N_Q – число узловых точек в области Q . Для уменьшения числа арифметических операций будем применять технику быстрого умножения теплицевых матриц на вектор, изложенную выше.

Доопределим функцию $V(q)$ нулем в точках $x(q)$ параллелепипеда Π , не принадлежащих области Q . Рассмотрим следующие суммы:

$$W(p_1, p_2, p_3) = \sum_{q_1=0}^{N_1-1} \sum_{q_2=0}^{N_2-1} \sum_{q_3=0}^{N_3-1} A(p_1-q_1, p_2-q_2, p_3-q_3)V(q_1, q_2, q_3). \quad (19)$$

Очевидно, что при $x(p) \in Q$ значения $W(p)$ из (18) и (19) совпадают. В (19) матричная функция дискретного аргумента $A(p)$ определена для значений

$$-(N_1-1) \leq p_1 \leq (N_1-1), \quad -(N_2-1) \leq p_2 \leq (N_2-1), \\ -(N_3-1) \leq p_3 \leq (N_3-1).$$

Обозначим через Π_2 параллелепипед со сторонами $2N_1 h_1$, $2N_2 h_2$ и $2N_3 h_3$. Продолжим матричную функцию дискретного аргумента $A(p_1, p_2, p_3)$ на все целочисленные значения p_1, p_2, p_3 , полагая ее периодической по каждой переменной с периодами, соответственно $2N_1, 2N_2, 2N_3$. При этом доопределим функцию $A(p_1, p_2, p_3)$ нулем в точках, где она не определена. Далее доопределим функцию дискретного аргумента $V(p_1, p_2, p_3)$ нулем во всех узловых точках Π_2 , не принадлежащих Π , и продолжим ее на все целочисленные значения p_1, p_2, p_3 , полагая ее периодической по каждой переменной с периодами, соответственно $2N_1, 2N_2, 2N_3$.

Рассмотрим выражение

$$W(p_1, p_2, p_3) = \sum_{q_1=0}^{2N_1-1} \sum_{q_2=0}^{2N_2-1} \sum_{q_3=0}^{2N_3-1} A(p_1-q_1, p_2-q_2, p_3-q_3)V(q_1, q_2, q_3). \quad (20)$$

Учитывая изложенное, ясно, что при $x(p) \in Q$ функция $W(p_1, p_2, p_3)$ из (20) совпадает со значениями $W(p_1, p_2, p_3)$ из (18). Ниже через Π и Π_2 будем обозначать целочисленные параллелепипеды с числом дискретных аргументов по каждой оси N_1, N_2, N_3 и $2N_1, 2N_2, 2N_3$, соответственно. Теперь, проводя дискретное преобразование Фурье

по каждой переменной от обеих частей (20), получим следующее равенство:

$$W^F(k_1, k_2, k_3) = A^F(k_1, k_2, k_3) V^F(k_1, k_2, k_3), \quad k \in \Pi_2. \quad (21)$$

Таким образом, для выполнения одной итерации при решении СЛАУ (17) необходимо выполнить прямое преобразование Фурье функции $V(p_1, p_2, p_3)$ по каждой переменной и обратное преобразование функции $W^F(k_1, k_2, k_3)$, т.к. преобразование функции $A(p_1, p_2, p_3)$ выполняется один раз до начала итерационной процедуры. Число арифметических операций и объем требуемой памяти для выполнения одной итерации оцениваются формулами

$$T_A \sim 10N \log(N), M_A \sim 10N, N = N_1 N_2 N_3. \quad (22)$$

Для двумерных задач в декартовой системе координат определяется прямоугольник, внутри которого находится область Q . Дальнейшие рассуждения и выкладки с очевидными изменениями повторяют рассмотренный случай. Значения M_A и T_A оцениваются формулами (22), в которых $N_3 = 1$.

При выборе шагов сетки и значений N_1, N_2, N_3 (трехмерные задачи) или N_1, N_2 (двумерные задачи) необходимо руководствоваться следующими критериями: во-первых, в пределах ячеек искомая функция мало меняется; во-вторых, область $\tilde{Q}$ состоит из ячеек, центры которых находятся внутри Q и достаточно хорошо описывают Q .

Далее, при использовании алгоритмов БПФ обычно выбираются значения N , кратные степени числа два. Однако при дискретизации интегральных уравнений это во многих случаях может привести к значительным дополнительным вычислительным затратам, поскольку скважность чисел степени 2 весьма велика. Поясним это на примере.

Пусть $N_1 = N_2 = N_3 = N_0$, т.е. Π – куб. Предположим, что для аппроксимации решения с требуемой точностью достаточно взять значение $N_0 = 150$. Ближайшие степени двойки – числа 128 и 256. Значение 128 не удовлетворяет требованию аппроксимации решения, поэтому, если мы хотим воспользоваться стандартным БПФ, то необходимо брать значение $N_0 = 256$. Пусть $T(N_0)$ – число арифметических операций, которое требуется для умножения матрицы СЛАУ на вектор, в зависимости от значений N_0 . Тогда из (22) имеем

$$\frac{T(256)}{T(150)} \approx \frac{256^3 \log_2(256)}{150^3 \log(150)} \approx 2.5.$$

Объем памяти для хранения матрицы СЛАУ при $N_0 = 256$ также в несколько раз больше, чем при $N_0 = 150$. Значит использование БПФ для значения $N_0 = 150$ значительно более эффективно, чем использование БПФ со степенью двойки.

Отметим, что для решения СЛАУ (17) с помощью рассмотренного алгоритма можно использовать только итерационные методы. Это связано с тем, что в основе итерационных алгоритмов лежит умножение матрицы СЛАУ на вектор. Число арифметических операций и объем требуемой памяти для решения СЛАУ (17) оцениваются формулами (2), (22). При этом количество итераций, требуемое для получения решения, как правило, значительно меньше размерности СЛАУ. Таким образом, возможно численное решение интегрального уравнения (1), которое сводится к СЛАУ огромной размерности $N_Q > 10^6$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложены два метода численного решения двухмерных и трехмерных интегральных уравнений, описывающих многие важные классы задач математической физики. Для дискретизации уравнений использовался метод коллокации на неравномерной и равномерной сетках, построены соответствующие СЛАУ. СЛАУ с использованием неравномерной сетки имеют преимущество, связанное с хорошим описанием областей сложной конфигурации. При этом существуют существенные ограничения на размерность СЛАУ. При использовании равномерной сетки размерность СЛАУ может быть на несколько порядков больше. Однако в этом случае могут возникать трудности с описанием сложной конфигурации области. Выбор того или иного метода зависит от конкретной задачи и имеющихся вычислительных ресурсов. На взгляд автора, для многих двухмерных задач может быть предпочтительнее СЛАУ на неравномерной сетке, а для трехмерных задач – предпочтительнее СЛАУ на равномерной сетке.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-07-00006.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 20-07-00006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Colton D., Kress R. *Inverse Acoustic and Electromagnetic Scattering Theory*. Applied Mathematical Sciences. Book series. (AMS, V. 93). 4th ed. Springer; 2019. 535 p. ISBN 978-3030-303-50-1
2. Самохин А.Б. *Интегральные уравнения и итерационные методы в электромагнитном рассеянии*. М.: Радио и связь; 1998. 160 с. ISBN 5-256-01405-6
3. Самохин А.Б. *Объемные сингулярные интегральные уравнения электродинамики*. М.: Техносфера; 2021. 218 с. ISBN 978-5-94836-618-0
4. Michlin S., Prössdorf S. *Singular Integral Operators*. Berlin-New York: Akademie-Verlag; 1986. 528 p.
5. Самохин А.Б., Самохина А.С., Шестопалов Ю.В. Методы дискретизации объемных сингулярных интегральных уравнений электромагнетизма. *Дифференциальные уравнения*. 2018;54(9):1251–1261. <https://doi.org/10.1134/S0374064118090108>
6. Васильев Е.Н. *Возбуждение тел вращения*. М.: Радио и связь; 1987. 270 с.
7. Дмитриев В.И., Захаров Е.В. *Интегральные уравнения в краевых задачах электродинамики*. М.: Изд-во МГУ; 1987. 165 с.
8. Ильинский А.С., Кравцов В.В., Свешников А.Г. *Математические модели электродинамики*. М.: Высшая школа; 1991. 222 с.
9. Самохин А.Б., Тиртышников Е.Е. Численный метод решения объемных интегральных уравнений на неравномерной сетке. *Журн. вычисл. матем. и матем. физ.* 2021;61(5):878–884. <https://doi.org/10.31857/S0044466921050161>
10. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. *Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения*. СПб.: Лань; 2021. 400 с. ISBN 978-58114-0799-6
11. Кудряшова Н.Ю., Грунина Т.В. *Граничные интегральные уравнения*. Пенза: Изд-во ПГУ; 2018. 72 с. ISBN 978-5-907-102-47-7
12. Нурутдинова И.Н., Пожарский Д.А. *Интегральное исчисление. Дифференциальные уравнения. Ряды*. Ростов-на-Дону: Донской ГТУ; 2021. 96 с.
13. Самарский А.А., Гулин А.В. *Численные методы*. М.: Наука; 1989. 432 с. ISBN 5-02-102-013996-3
14. Воеводин В.В., Тиртышников Е.Е. *Вычислительные процессы с теплицевыми матрицами*. М.: Наука; 1987. 319 с.
15. Тиртышников Е.Е. *Методы численного анализа*. М.: Академия; 2007. 317 с. ISBN 978-5-7695-3925-1

REFERENCES

1. Colton D., Kress R. *Inverse Acoustic and Electromagnetic Scattering Theory*. Applied Mathematical Sciences. book series. (AMS, V. 93). 4th ed. Springer; 2019. 535 p. ISBN 978-3030-303-50-1
2. Samokhin A.B. *Integral'nye uravneniya i iteratsionnye metody v elektromagnitnom rasseyanii (Integral Equations and Iteration Methods in Electromagnetic Scattering)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1998. 160 p. (in Russ.). ISBN 5-256-01405-6
3. Samokhin A.B. *Ob'emnye singulyarnye integral'nye uravneniya elektrodinamiki (Volume Singular Integral Equations of Electromagnetics)*. Moscow: Tekhnosfera; 2021. 218 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-618-0
4. Michlin S., Prössdorf S. *Singular Integral Operators*. Berlin-New York: Akademie-Verlag; 1986. 528 p.
5. Samokhin A.B., Samokhina A.S., Shestopalov Yu.V. Discretization methods for three-dimensional singular integral equations of electromagnetism. *Differential Equations*. 2018;54(9):1225–1235. <https://doi.org/10.1134/S0012266118090100>
6. Vasil'ev E.N. *Vozbuzhdenie tel vrashcheniya (Excitation of Bodies of Rotation)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1987. 270 p. (in Russ.).
7. Dmitriev V.I., Zakharov E.V. *Integral'nye uravneniya v kraevykh zadachakh elektrodinamiki (Integral Equations for Boundary Problems of Electromagnetics)*. Moscow: MGU; 1987. 165 p. (in Russ.).
8. Il'inskii A.S., Kravtsov V.V., Sveshnikov A.G. *Matematicheskie modeli elektrodinamiki (Mathematical Models of Electrodynamics)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1991. 222 p. (in Russ.).
9. Samokhin A.B., Tyrtshnikov E.E. Numerical method for solving volume integral equations on a nonuniform grid. *Comput. Math. Math. Phys.* 2021;61(5):847–853. <https://doi.org/10.1134/S0965542521050158> [Original Russian Text: Samokhin A.B., Tyrtshnikov E.E. Numerical method for solving volume integral equations on a nonuniform grid. *Zhurnal vychislitel'nyi matematiki i matematicheskoi fiziki*. 2021;61(5):878–884 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044466921050161>]
10. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. *Chislennyye metody analiza. Priblizhenie funktsii, differentsial'nye i integral'nye uravneniya (Numerical Methods of Analysis. Approximation, Differential and Integral Equations)*. St. Petersburg: Lan'; 2021. 400 p. (in Russ.). ISBN 978-58114-0799-6
11. Kudryashova N.Yu., Grunina T.V. *Granichnye integral'nye uravneniya (Boundary Integral Equations)*. Penza: PGU; 2018. 72 p. (in Russ.). ISBN 978-5-907-102-47-7.
12. Nurutdinova I.N., Pozharskii D.A. *Integral'noe ischislenie. Differentsial'nye uravneniya. Ryady (Integral Calculus. Differential Equations. Rows)*. Rostov-on-Don: Donskoi GTU; 2021. 96 p. (in Russ.).
13. Samarskii A.A., Gulina A.V. *Chislennyye metody (Numerical Methods)*. Moscow: Nauka; 1989. 432 p. (in Russ.). ISBN 5-02-102-013996-3
14. Voevodin V.V., Tyrtshnikov E.E. *Vychislitel'nye protsessy s teplitsevymi matritsami (Computational Processes with Toeplitz Matrices)*. Moscow: Nauka; 1987. 319 p. (in Russ.).
15. Tyrtshnikov E.E. *Metody chislennogo analiza (Methods of Numerical Analysis)*. Moscow: Akademiya; 2007. 317 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7695-3925-1

Об авторе

Самохин Александр Борисович, д.ф.-м.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Прикладная математика» Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: absamokhin@yandex.ru. Scopus Author ID 7005200099, SPIN-код РИНЦ 6302-0596, <http://orcid.org/0000-0003-1328-6725>

About the author

Alexander B. Samokhin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Applied Mathematics Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: absamokhin@yandex.ru. Scopus Author ID 7005200099, RSCI SPIN-code 6302-0596, <http://orcid.org/0000-0003-1328-6725>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 378
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-78-90>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Модель формирования цифровых компетенций при реализации программ высшего образования

О.Г. Савка[@],
М.Н. Гусарова,
С.В. Сумина,
Я.О. Князев,
Д.А. Безруков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Целью работы является анализ модели формирования и оценки цифровых компетенций обучающихся при реализации программ высшего образования, ориентированной на подготовку специалистов, не относящихся непосредственно к ИТ-сфере, но деятельность которых напрямую будет связана с применением цифровых продуктов. Под цифровыми компетенциями индивида следует понимать его способность уверенно, эффективно и безопасно выбирать и применять в различных жизненных практиках информационно-коммуникационные технологии (ИКТ), в т.ч. осуществлять поиск и критическое осмысление информации; использовать цифровые устройства, функционал социальных сетей; выполнять в онлайн-режиме финансовые и торговые операции; производить цифровой контент. Формирование цифровых компетенций у обучающихся – один из результатов освоения программ высшего образования.

Методы. Использована модель формирования цифровых компетенций, включающая четыре связанных между собой этапа: базовые цифровые компетенции, личностные компетенции (soft skills), профессиональные цифровые компетенции, цифровая культура.

Результаты. Разработана базовая (общая) модель формирования и оценки цифровых компетенций обучающихся при реализации программ высшего образования. Она состоит из четырех взаимосвязанных ступеней, каждая из которых является неотъемлемой частью процесса формирования и оценки цифровых компетенций обучающегося и не может быть исключена без риска недостижения поставленных задач.

Выводы. Разработанная авторами модель основана на обширной нормативно-правовой базе, существующих отечественных и зарубежных практиках; опирается на мнение экспертного сообщества (прежде всего, работодателей); учитывает отраслевые и региональные особенности вуза, специфику направлений подготовки; содержит перечень оптимальных организационно-методических условий формирования цифровых компетенций.

Ключевые слова: цифровая компетентность, цифровая грамотность, цифровой континуум, модель цифровых компетенций, ассесмент, профессиональные компетенции, цифровая культура, информационно-коммуникационные технологии

• Поступила: 14.03.2022 • Доработана: 21.04.2022 • Принята к опубликованию: 13.09.2022

Для цитирования: Савка О.Г., Гусарова М.Н., Сумина С.В., Князев Я.О., Безруков Д.А. Модель формирования цифровых компетенций при реализации программ высшего образования. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):78–90. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-78-90>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Model of formation of digital competences in implementing higher education programs

Olga G. Savka @,
Maria N. Gusarova,
Svetlana V. Sumina,
Yaroslav O. Knyazev,
Denis A. Bezrukov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The paper presents and analyzes a model for the formation and evaluation of digital competencies in students. The model is aimed at the implementation of higher education programs for training specialists not directly working in IT, but whose activities are directly related to using ready-made digital products. Digital competences imply an ability to confidently, effectively, and safely select and apply information and communication technologies in various life practices including researching and critically analyzing information, using digital devices and accessing social network functionality, conducting financial and trading transactions, as well as creating digital content. The formation of such digital competences is one of the results of completing higher education programs.

Methods. The study is based on a model of digital competence formation having the following four interconnected stages: basic digital competences; personal competences (soft skills); professional digital competences; digital culture.

Results. The presented general model for the formation and assessment of student digital competences in higher education programs consists of four interrelated steps, each integral to the process of formation and assessment of the student digital competences, none of which can be excluded without the risk of failing to achieving the specified goals.

Conclusions. The model developed in the paper is based on the existing extensive regulatory framework, as well as existing domestic and foreign practices. Relying on expert community opinion (employers, primarily), it accounts for sector- and region-specific features of universities along with specifics of training areas, as well as comprising a list of optimal organizational and methodological conditions for formation of digital competency.

Keywords: digital competence, digital literacy, digital continuum, model of digital competences, assessment, professional competences, digital culture, information and communication technologies

• Submitted: 14.03.2022 • Revised: 21.04.2022 • Accepted: 13.09.2022

For citation: Savka O.G., Gusarova M.N., Sumina S.V., Knyazev Ya.O., Bezrukov D.A. Model of formation of digital competences in implementing higher education programs. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):78–90. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-78-90>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ГЛОССАРИЙ

Цифровизация: процесс распространения и внедрения цифровых технологий в различные сферы жизни общества: экономику, культуру, образование и т.д.

Цифровая компетентность: основанная на непрерывном овладении компетенциями (знания, умения, мотивация, ответственность) способность индивида уверенно, эффективно, критично и безопасно выбирать и применять информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) в разных сферах жизнедеятельности (информационная среда, коммуникации, потребление, техносфера), а также его готовность к такой деятельности

Цифровой континуум: совокупность средств, методов и форм обучения, интегрирующих взаимодействие всех участников образовательного процесса как в границах реализации образовательной программы, так и за их пределами, и основанных на использовании цифровых технологий, необходимых для формирования соответствующих навыков и компетенций, востребованных современным рынком труда.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые компетенции можно представить как способность применять ИКТ в различных сферах жизнедеятельности, а именно: создавать и распространять цифровой контент, решать сложные задачи в цифровой среде (например, проектные и бизнес-задачи). Стремительное развитие цифровых технологий обуславливает потребность в постоянном обновлении и расширении цифровых компетенций граждан в целях эффективного построения цифрового общества.

Представляется правомерным определиться с дефиницией «цифровая компетенция». В исследованиях на эту тему, нами проанализированы различные подходы к определению цифровых компетенций^{1, 2} [1]. Так, например А. Феррари в аналитическом отчете 2012 г., посвященном анализу выявления и трансформации цифровых компетенций, предложил следующее определение: «*Цифровая компетентность – это набор знаний, навыков, отношений, способностей, стратегий и осведомленности, которые требуются при использовании информационно-коммуникационных технологий и цифровых*

медиа для выполнения задач, решения проблем, общения, управления информацией, сотрудничества, создания и обмена контентом, накопления знаний эффективно, действенно, надлежащим образом, критически, творчески» [2].

По мнению Я.В. Дмитриевой и И.А. Алябина [3], цифровая компетенция представляет собой совокупность нескольких цифровых навыков и полученных знаний, необходимую для постоянного применения в профессиональной деятельности. Поскольку одновременно цифровая компетентность «*охватывает управление информацией, сотрудничество, общение и совместное использование, создание содержания и знаний, этику и ответственность, оценку и решение проблем, а также технические операции*», то она будет являться суммой всех имеющихся у индивидуума цифровых компетенций.

Исследователи И.А. Волкова и В.С. Петрова [4] полагают, что цифровые компетенции являются тем ключом, который позволит развиваться цифровой экономике не только как IT-площадке, но и как цифровому продукту. По их мнению, можно условно выделить следующие этапы цифровизации: 1) цифровое включение; 2) цифровое право; 3) школы; 4) дальнейшее образование; 5) высшее образование; 6) цифровое ученичество. Соответственно в рамках каждого из перечисленных этапов выделяются пять областей, через которые должна проходить цифровая компетентность: 1) цифровая финансовая грамотность; 2) цифровая информационная грамотность; 3) цифровой захват и обмен культурными артефактами; 4) дистанционная (удаленная) работа; 5) бизнес-данные и системная интеграция.

¹ Country digital readiness: Research to determine a country's digital readiness and key interventions. <https://www.cisco.com/c/dam/assets/csr/pdf/Country-Digital-Readiness-White-Paper-US.pdf>. Дата обращения 15.11.2021. / Accessed November 15, 2021.

² Djumalieva J., Sleeman C. Which digital skills do you really need? 2018. Nesta. The Innovation Foundation. https://media.nesta.org.uk/documents/Which_digital_skills_do_you_really_need.pdf. Дата обращения 15.11.2021. / Accessed November 15, 2021.

Определение цифровой компетентности, предложенное исследователем Г.У. Солдатовой, покрывает достаточно широкий круг проблем и практик, касающихся использования ИКТ в современном обществе: «*цифровая компетентность – это основанная на непрерывном овладении компетенциями (знания, умения, мотивация, ответственность) способность индивида уверенно, эффективно, критично и безопасно выбирать и применять информационные технологии в разных сферах жизнедеятельности (информационная среда, коммуникации, потребление, техносфера), а также его готовность к такой деятельности и нацеленность на эффективный результат*» [5].

В структуру цифровой компетентности Солдатова включила знания, умения и навыки, мотивацию, ответственность. Важной составляющей последнего элемента является безопасность. Каждый из этих компонентов в той или иной степени реализуется в разных сферах деятельности в интернет-среде.

Отметим, также, что этот автор выделяет четыре вида цифровой компетентности: *медиакомпетентность*, нацеленная на поиск, понимание, критическое осмысление цифровой информации, создание информационных объектов с использованием цифровых ресурсов (текстовых, изобразительных, аудио и видео); *коммуникативная компетентность*, необходимая для различных форм коммуникации (электронная почта, чаты, блоги, форумы, социальные сети и др.); *техническая компетентность*, формирующая ответственное использование технических и программных средств для решения различных задач; *потребительская компетентность*, в основе которой – решение повседневных задач и жизненных ситуаций с помощью цифровых устройств и интернета.

А. Кальвани и соавторы [6] предложили концептуальную основу для определения цифровой компетенции на основе исследований когнитивных и метакогнитивных измерений, связанных с технологиями, и назвали ее рамками цифровых компетенций (digital competence framework). Авторы выявили, что цифровая компетентность представляет конвергенцию трех основных измерений: технологического, когнитивного и этического. Технологическое измерение демонстрирует умение создавать технологии; когнитивное – критически оценивать цифровой текст и данные; этическое – продуктивно взаимодействовать с другими людьми, осознанно используя технологии.

Нередко изучение цифровых компетенций основано на использовании концепции профессиональных компетенций. Например, концепция KSAO основана на утверждении, что специалистам для того,

чтобы эффективно выполнять свою работу, необходимы знания (K – Knowledge), навыки (S – Skills), способности (A – Abilities) и другие характеристики (O – Other characteristics). Модель технологической приемлемости (technological acceptance model) объясняет, насколько граждане верят в свои технологические способности (компетенции) и как используют государственные электронные услуги.

Исследование цифровых компетенций может быть также основано на социально-когнитивной теории и теории запланированного поведения. В этих психологических теориях наличествует понимание и применение концепции самооэффективности для оценки цифровой компетенции. Они служат примером основополагающих знаний, которые обеспечивают понимание когнитивных детерминант поведения, в т.ч. того, что убеждения в способности быть успешными и в силе контроля могут служить индикаторами, предсказывающими намерения индивида [7].

Вышесказанное позволяет утверждать, что под цифровыми компетенциями индивида следует понимать его способность уверенно, эффективно и безопасно выбирать и применять в различных жизненных практиках ИКТ, в т.ч. находить и критически осмысливать информацию; использовать цифровые устройства, функционал социальных сетей; осуществлять в режиме онлайн финансовые и торговые операции; производить цифровой контент. В основе этих способностей лежат полученные в процессе освоения различных образовательных траекторий (среднее, высшее, дополнительное профессиональное образование) соответствующие знания, умения и навыки в сфере цифрового развития. При этом формирование и оценка цифровых компетенций у студентов, обучающихся в учреждениях системы высшего образования (ВО), предусмотрено соответствующими федеральными государственными образовательными стандартами и должно быть отражено в ходе реализации программ ВО [8].

МЕТОДЫ

В разработке модели формирования цифровых компетенций авторы опирались на комплект методических материалов (разработанный ведущими образовательными организациями страны), в котором представлены различные модели цифровых компетенций. Каждая из проанализированных моделей формирует соответствующую направленность и содержательность действий по ее реализации в образовательной стратегии вуза.

Проведенный анализ отечественных моделей цифровых компетенций позволяет утверждать, что их разработчики, опираясь на солидную базу

зарубежной литературы, посвященной этому вопросу, чаще всего выделяют профессиональные и личностные компетенции, дополняя их вариациями базовых компетенций и цифровой культуры (цифровой этики). Следует отметить приверженность как зарубежных, так и российских исследователей некоторым общим методам и принципам при описании ключевых характеристик профессиональных и личностных компетенций.

Так, например, предложенная исследователями из Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации модель компетенций включает в себя четыре взаимосвязанных блока: базовые цифровые компетенции, личностные компетенции, профессиональные компетенции, цифровая культура [9].

Личностные компетенции (*soft skills*) в этой модели представлены следующими группами компетенций: 1) *нацеленность на результат* (умение моделировать разные варианты развития ситуации и тем самым достигать целей цифрового развития наиболее продуктивным способом); 2) *клиентоцентричность* (выстраивать доверительные долгосрочные отношения со всеми заинтересованными сторонами); 3) *коммуникативность* (выбор наилучшей стратегии и тактики общения); 4) *эмоциональный интеллект* (создание благоприятной психоэмоциональной атмосферы для командной работы); 5) *креативность* (умение находить выход из сложных ситуаций, используя нешаблонные подходы); 6) *критичность* (формирование различных сценариев достижения стратегических целей, способность создавать концепции и варианты стратегий на разные временные периоды). В совокупности все заявленные исследователями индикаторы при их достижении позволяют индивиду успешно участвовать в реализации стратегии цифровой трансформации и проектах цифрового развития.

Правоммерно также, на наш взгляд, уделить внимание блоку профессиональных компетенций (*hard skills*) в сфере цифрового развития, от сформированности которых зависит управление процессами, проектами, продуктами цифровой трансформации и регулярное решение сложных профессиональных задач в цифровой среде. В модели представлены шесть ключевых профессиональных компетенций. Полагаем правоммерным в характеристике каждой группы указать наиболее актуальные для нас индикаторы: 1) *управление цифровым развитием* – знания, умения и навыки применения инструментов, методов и подходов стратегического менеджмента в управлении цифровым развитием; 2) *развитие организационной культуры* – знания, умения и навыки применения инструментов и методов формирования и трансляции организационной культуры,

механизмов управления организационными изменениями; 3) *инструменты управления* – знания, умения и навыки применения методов и инструментов проектного подхода (основы проектного управления; система управления проектной деятельностью на уровне государства и организации; проекты, программы проектов и портфели проектов); процессы управления жизненным циклом проекта (инициирование, подготовка, реализация, мониторинг и контроль, завершение); 4) *управление и использование данных* – знания, умения и навыки применения технологий принятия решений, основанных на данных (культура и этика принятия решений на основе данных; встраивание процесса принятия решений на основе данных в бизнес-процессы организации; системы автоматического принятия решений, в т.ч. системы искусственного интеллекта; обеспечение безопасности данных); методов управления жизненным циклом данных (проектирование моделей данных, этапы жизненного цикла данных; 5) *применение цифровых технологий* – знания, умения и навыки применения сквозных технологий (новые производственные технологии, нейротехнологии и искусственный интеллект, технологии беспроводной связи, компоненты робототехники и сенсорики, квантовые технологии, системы распределенного реестра, технологии виртуальной и дополненной реальности); средств и методов информационной безопасности и кибербезопасности; 6) *развитие ИТ-инфраструктуры* – знания, умения и навыки в сфере технического документирования, регулирующего функционирование информационных систем и ИТ-продуктов.

Цифровая культура в данной модели представляет собой систему ценностей, установок, норм и правил поведения, поддерживаемую и транслируемую командой цифровой трансформации.

Не менее значимой для настоящего исследования является модель компетенций, предложенная многопрофильным аналитическим центром НАФИ³. В ней выделены следующие компетенции: 1) информационная грамотность (поиск информации на разных ресурсах, оценка ее полезности и вреда); 2) компьютерная грамотность (легкость использования любых цифровых устройств); 3) медиаграмотность (поиск и фильтрация новостей из разных источников); 4) коммуникативная грамотность (использование цифровой коммуникации, т.е. социальных сетей и мессенджеров); 5) отношение к технологическим

³ Цифровая грамотность россиян: исследование 2020. <https://nafi.ru/analytics/tsifrovaya-gramotnost-rossiyan-issledovanie-2020/>. Дата обращения: 03.12.2021. [Digital Literacy of Russians: A 2020 study. <https://nafi.ru/analytics/tsifrovaya-gramotnost-rossiyan-issledovanie-2020/>. Accessed December 3, 2020 (in Russ.).]

инновациям (готовность быстро адаптироваться к новым технологиям).

Правомерно остановиться на модели, предложенной Е.А. Ходыревой из АНО ВО «Университет Иннополис». В докладе «К вопросу оценки цифровых компетенций в образовательных программах» на IV Ежегодной встрече лидеров в области управления образованием, знаниями и цифровизацией в Сочи (октябрь 2021 г.) она выделила следующие основные блоки модели цифровых компетенций: *базовые цифровые компетенции* (digital skills); *профессиональные компетенции в сфере цифрового развития*, в т.ч. *отраслевые* (hard skills); *личностные компетенции в сфере цифрового развития* (soft skills). Универсальные профессиональные компетенции включают организацию проектной деятельности, бизнес-процессы, клиентоцентричность, культуру работы с данными, применение цифровых продуктов в отрасли (профессиональной деятельности), презентацию (визуализацию), донесение информации с использованием данных, прототипирование. Личностные компетенции включают нацеленность на результат, лидерство, общение, критическое мышление, саморазвитие, управление ресурсным состоянием, стратегическое мышление, креативное мышление, работу в команде. Базовыми цифровыми компетенциями в докладе названы информационная грамотность, коммуникативная грамотность, создание цифрового контента, цифровая безопасность, навыки решения проблем в цифровой среде.

Проведенный теоретико-методологический анализ моделей цифровых компетенций выявил значительный сегмент общих признаков: универсальный характер (возможность актуализации модели для организаций, подразделений и команд любого типа и сектора экономики); масштабируемость (возможность корректировать набор компетенций с учетом корпоративных особенностей и отраслевой направленности); наличие блочной структуры (внимание уделяется не только компетенциям, но и ценностям, которые лежат в основе цифровой трансформации); возможность создавать на ее основе как собственные модели, так и отдельные продукты (например, индивидуальные траектории профессионального развития в вопросах цифровой трансформации, индивидуальные цифровые профили участников цифровой трансформации и т.п.).

Целесообразно применить разработанные отечественными образовательными организациями принципы и методы, заложенные в их моделях цифровых компетенций для создания, в свою очередь, модели формирования цифровых компетенций, которая представляет собой поэтапный процесс, интегрированный в образовательные траектории вуза. На современном этапе вопрос о том, как применить модель

формирования цифровых компетенций в ходе реализации программы ВО, исследован недостаточно, поскольку соответствующие практики находятся только в процессе становления. Авторы стремились нивелировать этот пробел, предложив свою модель формирования цифровых компетенций для направлений, не относящихся к инфокоммуникационной сфере.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанная авторами базовая (общая) модель формирования и оценки цифровых компетенций обучающихся при реализации программ ВО состоит из четырех взаимосвязанных ступеней, каждая из которых является неотъемлемой частью процесса формирования и оценки цифровых компетенций обучающегося и не может быть исключена без риска недостижения поставленных задач (рис. 1). Она ориентирована на подготовку специалистов, не относящихся непосредственно к ИТ-сфере, но деятельность которых напрямую будет связана с применением готовых цифровых продуктов.

Реализация первой ступени предложенной модели – **условия для формирования цифровых компетенций** – представляет собой поэтапный процесс, который включает в себя мониторинг рынка труда, создание цифрового образовательного континуума, кадровое обеспечение применения цифровых технологий в учебном процессе.

Правомерно, на наш взгляд, привлечь к анализу рынка труда опубликованные источники, которые содержат результаты социологических опросов о требованиях работодателей не только к квалификации, но, в первую очередь, к цифровым навыкам и компетенциям специалистов. Изучение значительного массива таких публикаций⁴ [10, 11], позволило авторам сделать вывод о том, что цифровой экономике требуются кадры, которые не просто ориентируются в цифровой среде, но способны сами проектировать и создавать ее, активно применять весь ее ресурс и инструментарий в профессиональной деятельности. Первостепенное значение приобретает не количество получаемой индивидом информации, а знания и умения в области эффективного применения и управления ею, в т.ч. с использованием цифровых устройств, коммуникационных приложений и сетей. Современного работодателя, как свидетельствуют данные крупнейших отечественных

⁴ Сорокин Д. Участие субъектов РФ в реализации мероприятий федерального проекта «Кадры для цифровой экономики». <https://d-russia.ru/wp-content/uploads/2019/09/sorokin.pdf>. Дата обращения: 08.12.2021. [Sorokin D. Participation of the Russian Federation subjects in the implementation of the “Personnel for the Digital Economy” federal project. <https://d-russia.ru/wp-content/uploads/2019/09/sorokin.pdf>. Accessed December 8, 2021 (in Russ.).]

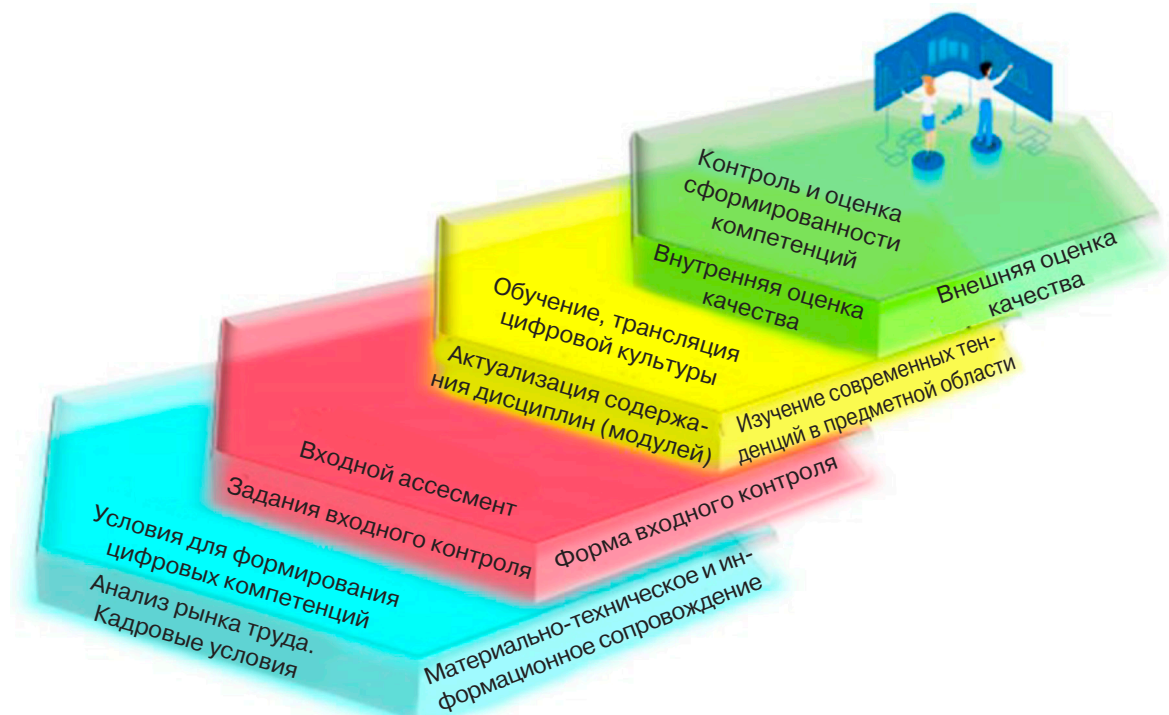


Рис. 1. Базовая общая модель формирования и оценки цифровых компетенций обучающихся при реализации программ ВО

интернет-рекрутментов HeadHunter⁵ и Superjob⁶, в большей степени интересуют надпрофессиональные навыки, благодаря которым специалист не только взаимодействует с цифровыми продуктами и решениями, но буквально ощущает себя «внутри» виртуального контента, моделируя и развивая его.

Второй этап первой ступени включает в себя разработку и формирование цифрового образовательного континуума как базовой составляющей организационно-методического сопровождения формирования цифровых компетенций при реализации программ высшего образования. Авторы определяют его как совокупность средств, методов и форм обучения, интегрирующих взаимодействие всех участников образовательного процесса как в границах реализации образовательной программы, так и за их пределами, и основанных на использовании цифровых технологий, необходимых для формирования востребованных современным рынком труда навыков и компетенций.

Цифровой континуум – понятие значительно более широкое, чем электронная информационно-образовательная среда, поскольку представляет собой эффективное и безопасное цифровое окружение обучающегося, составляющими которого являются образовательный контент, мобильные приложения вуза, каналы электронного взаимодействия. Правомерно

утверждать о создании полноценной цифровой среды, в которой обучающийся является не только потребителем, но и полноценным участником, моделируя ее, например, под свои индивидуальные образовательные траектории. Формирование цифрового континуума ускоряет «погружение» в среду современных цифровых взаимодействий, аналогичную среде, в которой окажется выпускник после завершения обучения.

Анализ требований работодателей к содержанию цифровых навыков и компетенций выпускников позволил выявить необходимый для построения цифрового континуума комплект материально-технических и программных средств⁷ [12]. В частности, из свободно распространяемого программного обеспечения для реализации программ ВО мы можем рекомендовать *1С:Предприятие 8.3*⁸, *Компас 3D LT*⁹, из лицензионного – *ЭОС*¹⁰, *T-FLEX CAD*¹¹,

⁷ Комплект материалов по цифровым навыкам. Женева, 2018: 6–7. <https://psihdocs.ru/komplekt-materialov-po-cifrovim-navikam.html>. Дата обращения 18.01.2022. [A set of materials on digital skills. Geneva, 2018: 6–7. <https://psihdocs.ru/komplekt-materialov-po-cifrovim-navikam.html>. Accessed January 18, 2022 (in Russ.).]

⁸ <https://v8.1c.ru/podderzhka-i-obucheniye/uchebnyye-versii/distributiv-1s-predpriyatie-8-3-versiya-dlya-obucheniya-programmirovaniyu/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

⁹ <https://kompas.ru/kompas-3d-lt/about/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹⁰ <https://eos.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹¹ <https://www.tflexcad.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

⁵ <https://hh.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

⁶ <https://www.superjob.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

*Astra Linux*¹², *QForm*¹³. Безусловно, данный список не является исчерпывающим. Образовательной организации предоставлено право самостоятельно определить перечень программного обеспечения с учетом требуемых цифровых навыков в профессиональной области.

Применение программных продуктов требует соответствующего аппаратного обеспечения. Многолетняя стратегия РТУ МИРЭА по наращиванию аппаратной базы учебного процесса доказывает, что компьютерные классы должны быть оснащены современным мультимедийным оборудованием, включающим проекционный экран, мультимедийный проектор, плазменную панель, видеокамеру, компьютеры, оборудование для видеоконференц-связи, звуковое оборудование.

Формирование цифрового континуума предполагает также использование актуальных для соответствующих программ ВО современных профессиональных баз данных, информационных справочных систем и электронно-библиотечных систем. Их перечень целесообразно формировать на основе консультаций с представителями организаций, которые предоставляют базу для производственной практики, а также с потенциальными работодателями из государственных организаций и коммерческих структур. Полагаем, что к числу современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем следует отнести «1С:Предприятие 8 через Интернет для учебных заведений»¹⁴, CLE International¹⁵, COMSOL Multiphysics®¹⁶ ПО для мультифизического моделирования, eLIBRARY.RU¹⁷ и др. Среди электронно-библиотечных систем следует назвать, например, Юрайт¹⁸, IPR Books¹⁹, ЭБС Znanium²⁰, Университетская библиотека онлайн²¹.

Кадровое обеспечение образовательного процесса – третий этап первой ступени – предполагает формирование преподавательского состава из числа преподавателей, способных применять в учебном процессе ИКТ и интегрировать цифровую грамотность с другими своими профессиональными компетенциями. Очевидно, что преподаватель современного вуза, также как и специалист в любой другой сфере, должен стремиться развивать свои надпрофессиональные навыки, ориентированные на погружение в цифровую среду и работу в ней. Это позволит преподавателю гибко реагировать на появление новых моделей обучения и сохранить свою конкурентоспособность на рынке труда. Образовательная организация, в свою очередь, должна разработать системный подход по обучению и переобучению преподавательского состава в области цифровой грамотности, владения цифровыми технологиями, продуктами и инструментами. Целесообразно вовлекать в учебный процесс и специалистов-практиков, обладающих цифровыми компетенциями.

Проведенное исследование позволило сформулировать следующие требования к преподавателю в области владения необходимыми цифровыми компетенциями: использование цифровой среды для организации учебного процесса, поиск и анализ информации, кибербезопасность, цифровая этика, информационный менеджмент, коммуникация в цифровой среде, непрерывное самообразование.

Реализация первой ступени в предложенной модели представляет собой проектирование перечня требуемых индикаторов для цифровых компетенций (профессиональных и личностных).

Вторая ступень предложенной модели – **входной ассесмент** – позволяет определить базовый уровень знаний обучающихся, исходя из которого, предстоит выстроить образовательный процесс по формированию цифровых компетенций. Входной контроль определяет требования к содержанию дисциплин (модулей), формирующих цифровые компетенции.

Первым этапом второй ступени предусмотрено определение наиболее полного перечня базовых цифровых компетенций и разработка заданий входного контроля, которые позволят выявить уровень их сформированности у обучающихся. Базовые цифровые компетенции – это базовый уровень знаний и умений использования ИКТ в трудовой деятельности и в обычных жизненных практиках. Полагаем, что у обучающихся он не может быть ниже уровня, определяемого федеральным государственным стандартом среднего общего образования.

Содержание входного контроля должно полностью отражать предметные области, связанные с цифровыми технологиями. Для его проведения нами рекомендованы следующие темы вопросов/заданий,

¹² <https://astralinux.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹³ <https://qform3d.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹⁴ <https://edu.1cfresh.com>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹⁵ <https://www.cle-international.com>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹⁶ <https://www.comsol.ru>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹⁷ www.elibrary.ru. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹⁸ <https://urait.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

¹⁹ <https://www.iprbookshop.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

²⁰ <https://znanium.com/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

²¹ <https://biblioclub.ru/>. Дата обращения 06.04.2022. / Accessed April 6, 2022 (in Russ.).

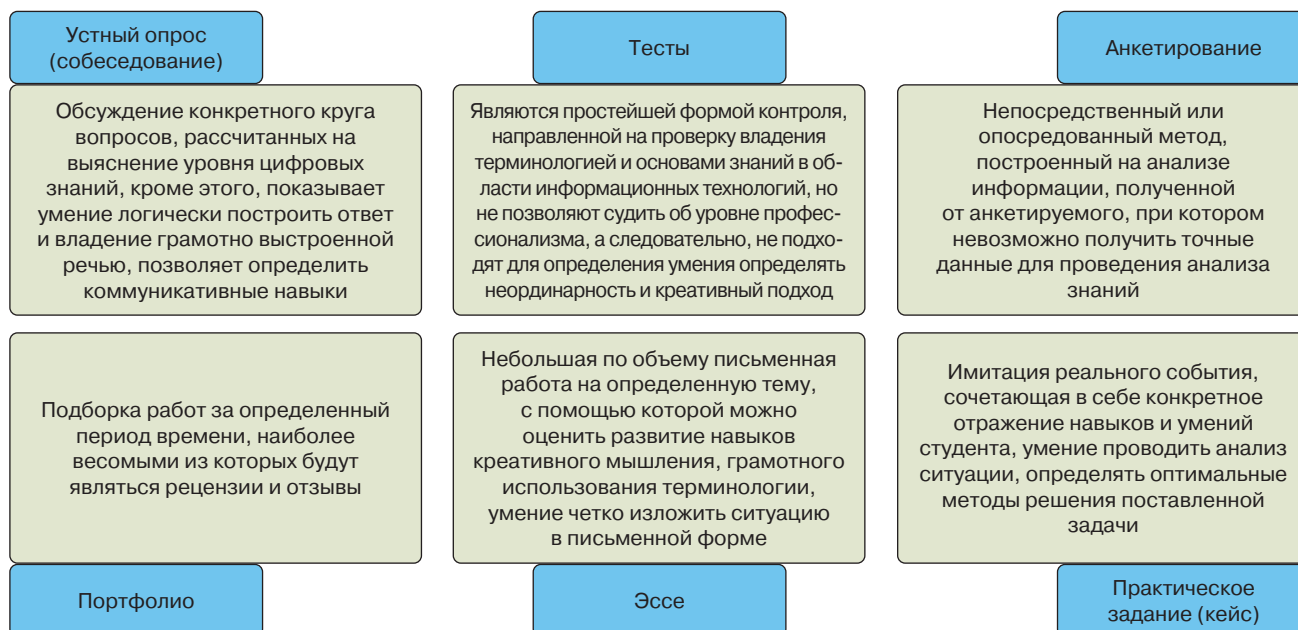


Рис. 2. Формы проведения входного контроля и использование полученных результатов

которые позволяют определить уровень базовых цифровых компетенций у обучающихся:

- становление и эволюция информационного общества и информационных технологий;
- основные термины и понятия цифровизации и цифровой экономики;
- роль информации в современном мире;
- информационные и цифровые технологии в медиа-сегменте и творческой деятельности;
- цифровые технологии в коммуникации;
- техника безопасности при работе с оргтехникой;
- информационная безопасность;
- этика поведения в цифровой среде;
- выбор цифровых инструментов, прикладных программ, необходимых для решения поставленной задачи;
- поиск информации в сети интернет;
- анализ и обработка цифровой информации;
- алгоритмы и алгоритмические модели для решения профессиональных задач;
- хранение и обработка данных;
- текстовые редакторы;
- электронные таблицы;
- базы данных.

На втором этапе входного ассесмента (второй ступени) следует определиться с форматом входного контроля и его реализацией (тест, устный опрос, анкетирование, портфолио, эссе, кейс). На рис. 2 представлены формы проведения входного контроля и использование полученных результатов.

Ввиду того, что у каждого формата есть свои преимущества и недостатки, представляется правомерным использовать сочетание различных форматов.

Например, тестирование позволяет выявить владение терминологией и основами цифровых знаний, а решение кейса или собеседование – их глубину.

Третья ступень модели формирования цифровых компетенций ориентирована на **обучение и трансляцию цифровой культуры**. На этой ступени формируются цифровые компетенции, необходимые для успешной профессиональной деятельности специалиста в условиях цифровой экономики. В основе ее реализации – достижения первой и второй ступеней. Полученные результаты позволяют определиться с актуализацией учебных дисциплин (модулей) в части формирования цифровых компетенций.

Проведенное исследование позволяет утверждать, что при актуализации рабочих программ дисциплин (модулей) следует опираться на показатели требуемого уровня сформированности цифровых компетенций с учетом особенностей предметной области, доступный инструментарий оценки их сформированности и современные тренды цифровой экономики. Обеспечение единства педагогических требований для каждой из цифровых компетенций достигается разработкой единого оценочного инструментария, применяемого для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по всем учебным дисциплинам.

Цифровые компетенции формируются на протяжении всего периода обучения. Это достигается благодаря совокупности различных факторов. В их числе необходимо отметить наличие в образовательной программе междисциплинарных связей и сохранение преемственности дисциплин. Очевидно, что требуемого уровня цифровых компетенций возможно

достичь лишь путем их поэтапного формирования на уровне индикаторов по каждой отдельной дисциплине при наличии междисциплинарных связей в образовательной программе. Значительный массив работы в этом направлении (в первую очередь речь идет о методической поддержке) осуществляет учебно-методический совет вуза, который может вовлекать в эту деятельность представителей потенциальных работодателей.

Процесс обучения по актуализированным программам дисциплин (курсов) сопровождается трансляцией цифровой культуры со стороны цифрового образовательного континуума, обеспечивая гармоничное встраивание цифровых компетенций в ряд личностных компетенций обучающегося. При этом в ходе освоения образовательной программы профессиональные цифровые компетенции переходят в разряд повседневных жизненных практик, образуя цифровую личность нового поколения.

Полагаем, что среди ключевых ценностей цифровой культуры следует выделить цифровую компетентность обучающегося. На наш взгляд, именно готовность к инновационным технологическим вызовам является основой успешного цифрового развития и неотъемлемой частью цифровой культуры будущего специалиста, который, обладая необходимыми званиями и умениями, понимает, как использовать ИКТ и цифровые технологии в жизни и трудовой деятельности, соблюдает цифровую этику и безопасность. Достижение заявленных индикаторов является результатом третьей ступени, направленной на формирование и трансляцию цифровой культуры.

Четвертая ступень предложенной модели – **контроль и оценка сформированности цифровых компетенций** – состоит из двух этапов. На первом этапе происходит оценка достижений результатов обучения (сформированности индикаторов цифровых компетенций), запланированных по дисциплинам (модулям) и практикам в рамках текущей и промежуточной аттестации; диагностика уровня сформированности цифровых компетенций; проведение государственной итоговой аттестации.

Проведенное исследование позволяет утверждать, что для оценки достижений результатов обучения целесообразно создать реестр индикаторов, отражающих все показатели сформированности цифровых компетенций у обучающихся. Так как уровни освоения обучающимися цифровых компетенций устанавливаются с помощью соответствующих оценочных средств, то в составе образовательной программы должен быть комплект оценочных материалов по проверке теоретических и практических знаний в области применения цифровых технологий. Важной составляющей фонда

оценочных материалов, на наш взгляд, являются кейсы (проблемно-ситуативный вид практических задач, требующих комплексного подхода к их решению), т.к. их применение представляется наиболее эффективным для решения практических задач профессиональной деятельности, требующих реализации цифровых компетенций.

Второй этап четвертой ступени предусматривает проведение независимой внешней оценки сформированности цифровых компетенций обучающегося (будущего специалиста)²² [12]. Ее проведение включает в себя различные форматы реализации, а именно:

- привлечение потенциальных работодателей к формированию оценочных материалов; предоставление ими базы для прохождения практической подготовки; участие представителей работодателей из государственных и негосударственных структур в промежуточной и итоговой аттестации, рецензировании образовательной программы в части формирования цифровых компетенций в профессиональной области;
- систематическое анкетирование, организованное образовательной организацией (не реже 1 раза в год), работодателей о степени удовлетворенности уровнем сформированности цифровых компетенций выпускников. На основе анализа результатов анкетирования работодателей образовательная организация корректирует образовательную программу;
- анкетирование выпускников (например, путем рассылки опросных материалов на электронную почту) о степени их профессиональной реализованности на рынке труда, конкурентоспособности и востребованности со стороны работодателей цифровых навыков и компетенций, приобретенных в период обучения.

Таким образом, образовательная организация на основании результатов проведения государственной итоговой аттестации и полученных показателей независимой оценки сформированности цифровых компетенций (профессиональных и личностных) выпускников осуществляет актуализацию образовательной программы. Процесс

²² Методические рекомендации по использованию цифровых инструментов подтверждения результатов оценки компетенций цифровой экономики. https://old.digitalskills.center/upload/iblock/e0d/e0dd8b36038dee3fc37eceddb9bec13e.pdf?_ga=2.111898692.1115568595.1639414150-1681117855.1639414150. Дата обращения 02.12.2021. [Methodological recommendations on the use of digital tools for confirming the results of the assessment of the digital economy competencies. https://old.digitalskills.center/upload/iblock/e0d/e0dd8b36038dee3fc37eceddb9bec13e.pdf?_ga=2.111898692.1115568595.1639414150-1681117855.1639414150. Accessed December 2, 2021 (in Russ.).]

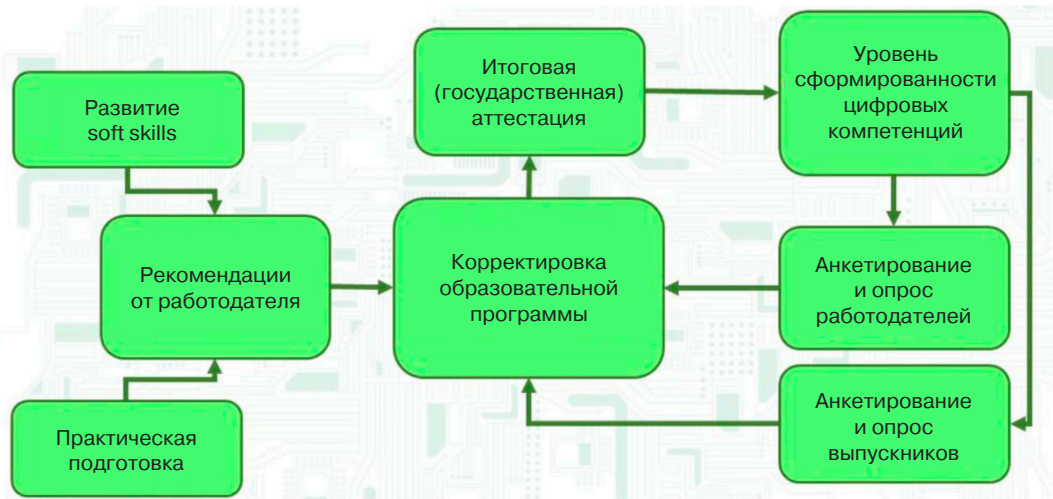


Рис. 3. Корректировка образовательной программы

корректировки образовательной программы (рис. 3.) является непрерывным мультиитерационным процессом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что базовая (общая) модель формирования и оценки цифровых компетенций обучающихся при реализации программ высшего образования ориентирована на формирование у них личностных и профессиональных цифровых компетенций принципиально нового типа. Эволюция подходов к их формированию обусловлена новыми трендами в развитии экономики и общества под влиянием стремительного распространения цифровых платформ, экосистем, сквозных технологий и цифровых инструментов. Выпускники должны получить навыки, знания и умения для того, чтобы гибко адаптироваться к запросам рынка и работодателей в сфере применения цифровых компетенций; легко социализироваться в цифровом обществе; реализовывать цифровые проекты; использовать цифровые инструменты для идентификации, доступа, управления,

анализа, оценки и синтеза цифровых ресурсов; продуктивно, критично и безопасно выбирать и применять ИКТ в повседневных жизненных практиках и профессиональной деятельности.

Предложенная модель основана на обширной нормативно-правовой базе, моделях цифровых компетенций от ведущих отечественных образовательных организаций, широком массиве литературы, раскрывающей понятие цифровой компетенции и составляющих ее блоков; дополняет и расширяет уже существующие практики создания, внедрения и оценки моделей формирования цифровых компетенций в программах высшего образования. Ее достоинствами являются опора на мнение экспертного сообщества (прежде всего, работодателей); учет отраслевых и региональных особенностей вуза, специфики направлений подготовки, наличия оптимальных организационно-методических условий формирования цифровых компетенций.

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. Sicilia M.-A., García Barriocanal E., Sánchez-Alonso S., et al. Digital skills training in higher education: Insights about the perceptions of different stakeholders. In: *Proceedings 6th International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM)*. 2018. P. 781–787. <https://doi.org/10.1145/3284179.3284312>
2. Ferrari A. *DIGCOMP: A Framework for Developing and Understanding Digital Competence in Europe*. JRC Publications Repository. 2013, October 9. <https://doi.org/10.2788/52966>

REFERENCES

1. Sicilia M.-A., García Barriocanal E., Sánchez-Alonso S., et al. Digital skills training in higher education: Insights about the perceptions of different stakeholders. In: *Proceedings 6th International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM)*. 2018. P. 781–787. <https://doi.org/10.1145/3284179.3284312>
2. Ferrari A. *DIGCOMP: A Framework for Developing and Understanding Digital Competence in Europe*. JRC Publications Repository. 2013, October 9. <https://doi.org/10.2788/52966>

3. Дмитриева Я.В., Алябин И.А., Бровко Е.И., Двинина С.Ю., Демьянова О.В. Развитие цифровых навыков у студентов вузов: де-юре vs де-факто. *Университетское управление: практика и анализ = University Management: Practice and Analysis*. 2021;25(2):59–79. <https://doi.org/10.15826/umpa.2021.02.015>
4. Волкова И.А., Петрова В.С. Формирование цифровых компетенций в профессиональном образовании. *Вестник Нижневартовского государственного университета*. 2019;1:17–24. URL: <https://vestnik.nvsu.ru/2311-1402/article/view/49621>
5. Солдатова Г.У., Рассказова Е.И. Модели цифровой компетентности и деятельность российских подростков онлайн. *Национальный психологический журнал*. 2016;2(22):50–60. <https://doi.org/10.11621/npj.2016.0205>
6. Calvani A., Cartelli A., Fini A., Ranieri M. Models and instruments for assessing digital competence at school. *Journal of e-learning and knowledge society*. 2008;4(3):183–193.
7. Дмитриева Н.Е., Жулин А.Б., Артамонов Р.Е., Титов Э.А. Оценка уровня цифровой готовности. В кн.: *Оценка цифровой готовности населения России. Доклад НИУ ВШЭ*. М.: Издательский дом Высшей школы экономики; 2021. С. 67–73. ISBN 978-5-7598-2518-0. <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/464963752.pdf>. Дата обращения: 21.01.2022.
8. Кузьмина М.В. и др. (авт.-сост.). *Формирование цифровой грамотности обучающихся: Методические рекомендации для работников образования в рамках реализации Федерального проекта «Цифровая образовательная среда»*. Киров: ИРО Кировской области; 2019. 47 с. URL: <https://kirovipk.ru/wp-content/uploads/2019/12/formirovanie-czifrovoj-gramotnosti-obuchayushhihsya-metodicheskie-rekomendaczii-dlya-rabotnikov-obrazovaniya.pdf>. Дата обращения 21.01.2022.
9. Шклярчук М.С., Гаркуша Н.С. (ред.). *Модель компетенций команды цифровой трансформации в системе государственного управления*. М.: РАНХиГС; 2020. 84 с. https://frpm.ru/wp-content/uploads/2021/09/Competency_Model_CDTO_RANEPa.pdf. Дата обращения 21.01.2022.
10. Гусев А.А. Цифровизация трудовых отношений и ее влияние на производительность труда и стоимость компаний. *Экономика. Налоги. Право*. 2019;12(6):39–47. URL: <http://www.fa.ru/org/div/edition/enp/journals/2019%20%E2%84%966.pdf>
11. Каткало В.С., Волков Д.Л., Баранов И.Н., Зубцов Д.А., Соболев Е.В., Юрченков В.И., Старовойтов А.А., Сафронов П.А. *Обучение цифровым навыкам: глобальные вызовы и передовые практики. Аналитический отчет к III Международной конференции «Больше чем обучение: как развивать цифровые навыки»*. М.: АНО ДПО «Корпоративный университет Сбербанка»; 2018. Р. 10–11. URL: https://sberuniversity.ru/upload/iblock/2f8/Analytical_report_digital_skills_web_demo.pdf. Дата обращения 21.01.2022.
3. Dmitrieva Ya.V., Alyabin I.A., Brovko E.I., Dvinina S.Yu., Dem'yanova O.V. University students' digital skills: De Jure vs De Facto. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University Management: Practice and Analysis*. 2021;25(2):59–79 (in Russ.). <https://doi.org/10.15826/umpa.2021.02.015>
4. Volkova I.A., Petrova V.S. Formation of digital competencies in vocational education. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2019;1:17–24 (in Russ.). Available from URL: <https://vestnik.nvsu.ru/2311-1402/article/view/49621>
5. Soldatova G.U., Rasskazova E.I. Models of digital competence and online activities of Russian adolescents. *Natsional'nyi psikhologicheskii zhurnal = National Psychological Journal*. 2016;2(22):50–60 (in Russ.). <https://doi.org/10.11621/npj.2016.0205>
6. Calvani A., Cartelli A., Fini A., Ranieri M. Models and instruments for assessing digital competence at school. *Journal of e-learning and knowledge society*. 2008;4(3):183–193.
7. Dmitrieva N.E., Zhulin A.B., Artamonov R.E., Titov E.A. Assessment of digital readiness level. In: *Assessment of Digital Readiness of the Population of Russia. Report of the HSE University*. Moscow: Izdatel'skii dom Vysshei shkoly ekonomiki; 2021. P. 67–73 (in Russ.). ISBN 978-5-7598-2518-0. Available from URL: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/464963752.pdf>. Accessed 21.01.2022.
8. Kuzmina M.V., et al. (Eds.). *Formation of digital literacy of students: Methodological recommendations for educators in the framework of the implementation of the Federal project "Digital Educational Environment."* Kirov: IRO Kirov. Oblast; 2019. 47 p. (in Russ.). Available from URL: <https://kirovipk.ru/wp-content/uploads/2019/12/formirovanie-czifrovoj-gramotnosti-obuchayushhihsya-metodicheskie-rekomendaczii-dlya-rabotnikov-obrazovaniya.pdf>. Accessed 21.01.2022.
9. Shklyaruk M.S., Garkusha N.S. (Eds.). *The Competence model of the digital transformation team in the public administration system*. Moscow: RANKhiGS; 2020. 84 p. (in Russ.). Available from URL: https://frpm.ru/wp-content/uploads/2021/09/Competency_Model_CDTO_RANEPa.pdf. Accessed 21.01.2022.
10. Gusev A.A. Labor relations digitalization and its impact on labor productivity and value of companies. *Ekonomika. Nalogi. Pravo = Economics, Taxes & Law*. 2019;12(6):39–47 (in Russ.). Available from URL: <http://www.fa.ru/org/div/edition/enp/journals/2019%20%E2%84%966.pdf>
11. Kat'kalo V.S., Volkov D.L., Baranov I.N., Zubtsov D.A., Sobolev E.V., Yurchenkov V.I., Starovoitov A.A., Safronov P.A. *Digital Skills Education: Global Challenges and Best Practices. Analytical report for the 3rd International Conference "More than Learning: How to Develop Digital Skills."* Moscow: Korporativnyi universitet Sberbanka; 2018. P. 10–11 (in Russ.). Available from URL: https://sberuniversity.ru/upload/iblock/2f8/Analytical_report_digital_skills_web_demo.pdf. Accessed 21.01.2022.

12. Суханова Е.А., Фрумин И.Д. (науч. ред.). *Качество образования в российских университетах: что мы поняли в пандемию*: Аналитический доклад. Томск: Издательство Томского государственного университета; 2021. 46 с. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:000892778>. Дата обращения 21.01.2022.
12. Sukhanova E.A., Frumin I.D. (Eds.). *The quality of education in Russian universities: what we understood during the pandemic*: Analytical report. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo universiteta; 2021 (in Russ.). Available from URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:000892778>. Accessed 21.01.2022.

Об авторах

Савка Ольга Геннадьевна, к.и.н., доцент, заведующий кафедрой документоведения, истории государства и права Института технологий управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: savka@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5570-0959, <https://orcid.org/0000-0002-0808-1760>

Гусарова Мария Николаевна, д.и.н., доцент, профессор кафедры документоведения, истории государства и права Института технологий управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: gusarova@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5254-2382, <https://orcid.org/0000-0002-4333-7514>

Сумина Светлана Валерьевна, старший преподаватель кафедры КБ-1 «Защита информации» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sumina@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6024-0637>

Князев Ярослав Олегович, к.т.н., доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: knyazev_ya@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 7282-7748, <https://orcid.org/0000-0001-9185-6194>

Безруков Денис Алексеевич, к.х.н., доцент кафедры биотехнологии и промышленной фармации Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: bezrukov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3201-3266>

About the authors

Olga G. Savka, Cand. Sci. (Hist.), Head of the Department of Documentary Studies, History of State and Law, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: savka@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5570-0959, <https://orcid.org/0000-0002-0808-1760>

Maria N. Gusarova, Dr. Sci. (Hist.), Professor, Department of Documentary Studies, History of State and Law, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: gusarova@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5254-2382, <https://orcid.org/0000-0002-4333-7514>

Svetlana V. Sumina, Senior Lecturer, Information Protection Department, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sumina@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6024-0637>

Yaroslav O. Knyazev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Digital and Additive Technologies, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: knyazev_ya@mirea.ru. RSCI SPIN-code 7282-7748, <https://orcid.org/0000-0001-9185-6194>

Denis A. Bezrukov, Cand. Sci. (Chem.), Assistant Professor, Department of Biotechnology and Industrial Pharmacy, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia). E-mail: bezrukov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3201-3266>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 30.11.2022 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 11.25.

Тираж 100 экз. Заказ № 925.

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 November 30, 2022.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 11.25.

100 copies. Order No. 925.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

