

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**



*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и наноэлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

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

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества



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

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Russian Technological Journal
2023, том 11, № 1

Russian Technological Journal
2023, Vol. 11, No. 1

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



Russian Technological Journal 2023, том 11, № 1

Дата опубликования 31 января 2023 г.

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

Периодичность: один раз в два месяца.

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

Учредитель и издатель:

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

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук, 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 (РТУ МИРЭА), Москва, Россия.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Редакция:

| | |
|----------------------|----------------------------|
| Зав. редакцией | к.т.н. Г.Д. Середина |
| Научный редактор | д.т.н., проф. Г.В. Куликов |
| Выпускающий редактор | А.С. Алексеенко |
| 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 2023, Vol. 11, No. 1

Publication date January 31, 2023.

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

Periodicity: bimonthly.

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

Founder and Publisher:

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial staff:

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

86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(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.banys@ff.vu.lt
- Бетелин
Владимир Борисович** академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Боков
Алексей Алексеевич** д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Вахрушев
Сергей Борисович** д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Гуляев
Юрий Васильевич** академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Жуков
Дмитрий Олегович** д.т.н., профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Кимель
Алексей Вольдемарович** к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Крамаров
Сергей Олегович** д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Новиков
Дмитрий Александрович** академик РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>, novikov@ipu.ru
- Перно Филипп** Dr. Sci. (Electronics), профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Романов
Михаил Петрович** д.т.н., профессор, директор Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Савиных
Виктор Петрович** академик РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Соболевский
Андрей Николаевич** д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, <http://orcid.org/0000-0002-3082-5113>, sobolevski@iitp.ru
- Сюй
Ли Да** академик Европейской академии наук, Российской инженерной академии и Инженерной академии Армении, Dr. Sci. (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, <https://orcid.org/0000-0002-5954-5115>, lxu@odu.edu
- Харин
Юрий Семенович** академик Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Чаплыгин
Юрий Александрович** академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
- Шпак
Василий Викторович** к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

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

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

Ю.В. Старичкова, И.Е. Рогов, В.С. Томашевская

- 7** Разработка компонента управления данными программы учебной дисциплины для информационной системы управления образовательной средой

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

А.Д. Воронков, С.А.К. Диане

- 18** Непрерывный генетический алгоритм в задаче захвата манипуляционным роботом объекта априорно неизвестной формы

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

31 *В.Е. Денисов*

Пропускная способность гидроакустического канала связи

41 *Г.В. Куликов, Ч.Т. До, А.А. Лелюх, В.З. Нгуен*

Оптимальный прием многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи

51 *Т.Э. Гельфман, А.П. Пирхавка, В.О. Скрипачев*

Анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутника связи

Математическое моделирование

60 *М.А. Анфёров*

Алгоритм поиска подкритических путей на сетевых графиках

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

А.В. Речкалов, А.В. Артюхов, Г.Г. Куликов

- 70** Логико-семантическое определение цифрового двойника производственного процесса

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- Julia V. Starichkova, Igor E. Rogov, Valeriya S. Tomashevskaya*
7 Developing the data management component of an academic discipline program for an educational management information system

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

- Andrey D. Voronkov, Sekou A.K. Diane*
18 Continuous genetic algorithm for grasping an object of a priori unknown shape by a robotic manipulator

Modern radio engineering and telecommunication systems

- Valery E. Denisov*
31 Hydroacoustic communication channel capacity
- Gennady V. Kulikov, Trung T. Do, Andrey A. Lelyukh, Van D. Nguyen*
41 Optimal reception of multiple phase shift keying and quadrature amplitude modulation signals with non-coherent processing of harmonic interference
- Tatyana E. Gelfman, Alexey P. Pirkhavka, Vladimir O. Skripachev*
51 Analysis of the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder

Mathematical modeling

- Mikhail A. Anfyorov*
60 Algorithm for finding subcritical paths on network diagrams

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

- Alexander V. Rechkalov, Alexander V. Artyukhov, Gennady G. Kulikov*
70 Logical-semantic definition of a production process digital twin

УДК 004.5
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-7-17>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разработка компонента управления данными программы учебной дисциплины для информационной системы управления образовательной средой

Ю.В. Старичкова [®], И.Е. Рогов, В.С. Томашевская

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Потребность в применении методов и моделей поддержки учебного процесса в образовательных организациях высшего образования, в т.ч. формирования и управления программами учебных дисциплин (ПУД), определяется растущей необходимостью активного внедрения средств автоматизации, включая комплексные информационные системы. Это вызвано наличием нормативно-правовых и социальных факторов, приводящих, с одной стороны, к существенному увеличению объемов и категорий информации, циркулирующей в рамках бизнес-процессов образовательной организации, а с другой стороны, к расширению требований, предъявляемых к обеспечению защиты информации, ее хранению и передаче. В 2018–2019 гг. Правительством Российской Федерации утверждены национальные проекты «Цифровая экономика» и «Образование» (в т.ч. федеральный проект «Цифровая образовательная среда»), подчеркивающие растущую роль процессов информатизации и цифровизации в образовании. Следует отметить очевидное несоответствие между характеристиками существующих в образовательных организациях информационных потоков и способами их сбора, обработки, хранения, анализа и применения на практике. Одной из важнейших составляющих образовательного процесса в организациях высшего образования является ПУД, позволяющая организовать взаимосвязи между различными составляющими учебного процесса: учебным планом, компетенциями, направлениями подготовки, технологиями обучения и способами осуществления контрольной проверки знаний обучающихся. Разработка и реализация ПУД является трудоемким и вариативным процессом, который требует внедрения информационных технологий. Цель работы – анализ объема и структуры образовательных программ учреждения для выявления требований к необходимому программному обеспечению.

Методы. Рассмотрена классификация систем управления обучением по различным признакам, ключевые требования к учебным дисциплинам и структура ПУД.

Результаты. Проведен анализ связей ПУД и ключевых сущностей учебного процесса. Рассмотрены функциональные возможности модуля собственной разработки ПУД для внедрения в РТУ МИРЭА, направленные на обеспечение взаимосвязи, прозрачности и доступности связей между параметрами учебной дисциплины и ее разделами.

Выводы. Введение модуля ПУД позволит уменьшить временные затраты на разработку программы путем предоставления универсальных шаблонов учебных дисциплин, возможности автозаполнения их параметров, отслеживания текущего статуса ПУД, и повысит уровень информированности участников образовательного процесса.

Ключевые слова: образовательный процесс, управление данными, образовательная среда, информационные системы поддержки учебного процесса, образовательные программы и стандарты, программы учебных дисциплин

• Поступила: 31.05.2022 • Доработана: 13.07.2022 • Принята к опубликованию: 28.11.2022

Для цитирования: Старичкова Ю.В., Рогов И.Е., Томашевская В.С. Разработка компонента управления данными программы учебной дисциплины для информационной системы управления образовательной средой. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):7–17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-7-17>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Developing the data management component of an academic discipline program for an educational management information system

Julia V. Starichkova[@], Igor E. Rogov, Valeriya S. Tomashevskaya

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The need to apply methods and models to support the educational process at universities including the formation and management of academic discipline programs (ADPs) is determined by the growing need for the active implementation of various automation tools including integrated information systems, which arise in response to a number of regulatory and legal factors. Such social factors result in the significant increase in the volume and categories of information circulating within business processes of an educational organization, as well as the expansion of the requirements for ensuring the protection, storage, and transmission of information. In recent years, the Government of the Russian Federation has approved the national “Digital Economy” and “Education” projects (including the Federal Project “Digital Educational Environment”) emphasizing the growing role of informatization and digitalization processes in education. In this connection, an obvious discrepancy arises between the theoretical characteristics of information flows existing in educational organizations and the methods of its collection, processing, storage, analysis, and application used in practice. One of the most important conceptual components of the educational process in higher education institutions is the ADP, which organizes the relationship between various components of the educational process: curriculum, competencies, training areas, learning technologies, and methods for conducting the control check of students’ knowledge. The labor-intensive and variable nature of ADP development and implementation requires the introduction of information technologies. Thus, the aim of the present work is to analyze the volume and structure of institutional educational programs in order to identify the necessary software requirements.

Methods. The classification of learning management systems according to various criteria, key requirements for academic disciplines, and ADP structure is considered.

Results. An analysis of links between the ADP and key entities of the educational process is presented. The functionality of the self-developed ADP module for implementing at RTU MIREA is aimed at providing interconnection, transparency, and availability of links between academic discipline parameters and its sections.

Conclusions. Introducing the ADP module allows reducing the time spent on developing the program by providing universal templates of academic disciplines, along with the possibility of autofilling the academic discipline parameters and tracking the current status of ADPs, as well as increasing the level of awareness of participants in the educational process.

Keywords: educational process, data management, digitalization, educational environment, information systems to support the educational process, educational programs and standards, academic discipline program

• Submitted: 31.05.2022 • Revised: 13.07.2022 • Accepted: 28.11.2022

For citation: Starichkova Ju.V., Rogov I.E., Tomashevskaya V.S. Developing the data management component of an academic discipline program for an educational management information system. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):7–17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-7-17>

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

Информационные технологии нашли широкое применение во всех сферах человеческой деятельности, в т.ч. в сфере образования. Внедрение в учебный процесс информационных систем (ИС) способствует его рациональной организации и созданию единого информационного пространства для образовательного учреждения и непосредственных участников процесса обучения.

Информационная образовательная среда представляет собой системно организованную совокупность информационных технологий и средств аппаратного, программного и методического обеспечения и электронных образовательных ресурсов для организации образовательного процесса, где человеку отводится роль субъекта [1, 2]. Для функционирования информационной образовательной среды в высшем учебном заведении необходима цифровизация следующих направлений:

- информационно-методическая деятельность,
- планирование процесса обучения и ресурсного обеспечения,
- размещение и хранение учебных материалов,
- мониторинг,
- дистанционное образование [3].

Потребность в цифровизации этих направлений деятельности послужила причиной возникновения особого типа ИС – систем управления обучением – Learning Management System (LMS). Под этим термином подразумеваются ИС для обеспечения поддержки процесса электронного обучения и обладающие возможностями администрирования, мониторинга, документирования, предоставления учебного контента и контроля [4]. Поддержку можно разделить на методическую, административную и технологическую. Сами ИС представляют собой программное обеспечение или платформы, направленные на предоставление преподавателям и студентам необходимых инструментов для организации и ведения учебного процесса, включая распространение справочных и лекционных материалов и формирование отчетности.

Функциональные возможности современных LMS могут быть дополнены такими программными продуктами как система управления обучением (Training Management System) для осуществления учебного процесса под контролем преподавателя

и хранилище учебных записей (Learning Record Store) для отслеживания и фиксирования действий пользователя. LMS находят применение для решения различных задач: от ИС, предоставляющих средства по проведению онлайн-курсов, до систем уровня корпорации, функциональные возможности которых регламентированы ГОСТ Р 52653-2006¹ и ГОСТ Р 52655-2006².

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ИС В ОБРАЗОВАТЕЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

К началу 80-х гг. XX в. персональные компьютеры стали значительно доступнее для пользователей, что привело к расширению возможностей использования программного обеспечения в образовательном процессе. Первые ИС поддержки учебного процесса и его компонентов появились в 1980 г. Среди наиболее популярных ИС следует выделить авторские системы ToolBook и TenCORE, которые использовались для создания интерактивного контента в обучении. Одними из первых ИС автоматизации компонентов образовательного процесса стали Computer Managed Instruction System, FirstClass и TrainingPartner³. В Computer Managed Instruction System была реализована возможность использования формального языка и спецификации для создания обучающих курсов и интегрирования их в систему дистанционного обучения. В FirstClass и TrainingPartner были представлены инструменты работы с электронной почтой, формами и электронными досками.

¹ ГОСТ Р 52653-2006. *Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Термины и определения.* М.: Стандартинформ; 2007. [GOST R 52653-2006. *Information and communication technologies in education. Terms and definitions.* Moscow: Standartinform; 2007 (in Russ.).]

² ГОСТ Р 52655-2006. *Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Интегрированная автоматизированная система управления учреждением высшего профессионального образования. Общие требования.* М.: Стандартинформ; 2007. [GOST R 52655-2006. *Information and communication technologies in education. The integrated automated control system of the high professional educational system. General requirements.* Moscow: Standartinform; 2007 (in Russ.).]

³ LMS-Timeline. <https://www.rockymountainalchemy.com/cudenver/INTE6750/Emergence/LMS-Timeline.html>. Дата обращения 15.04.2022. / Accessed April 15, 2022.

В России в это время был разработан комплекс автоматизированных систем управления высшими учебными заведениями «АСУ ВУЗ», ставший первой ИС поддержки учебного процесса. Этот программный комплекс охватывал весь процесс обучения – от поступления в вуз и до завершения обучения. Разработчиком являлся Научно-исследовательский институт проблем высшей школы СССР [5]. Система проходила процесс централизованного внедрения, по итогам которого была интегрирована более чем в 50 различных учебных заведениях, обладавших наибольшим техническим и интеллектуальным потенциалом.

Вместе с развитием и ростом числа ИС поддержки компонентов образовательного процесса стали создаваться и активно развиваться стандарты, регламентирующие процессы их разработки и внедрения. Одним из примеров стандартов данного типа является Sharable Content Object Reference Model (SCORM)⁴, в котором сосредоточены требования к формированию учебной литературы для систем дистанционного обучения. Ключевой идеей является составление электронных образовательных ресурсов из совместно используемых объектов содержания [6]. SCORM направлен на осуществление функциональной совместимости всех элементов обучающих программ со всеми LMS и средами виртуального обучения [7]. В соответствии с этим стандартом учебные материалы представлены в виде блоков, что позволяет включать их в состав разных курсов и дисциплин. За счет этого реализуется возможность независимого использования системы дистанционного обучения. По своей сути SCORM представляет собой набор технических правил, ориентированных на предоставление читателю знаний о создании учебного курса, структурированности занятия и описание принципов взаимодействия с системой, что делает его актуальным для программ учебных дисциплин (ПУД). Данный стандарт выдвигает три ключевых требования к компонентам учебных программ:

- наличие файла-манифеста, который включает в себя полное описание учебного курса и всех его составляющих;
- метаданные о курсе, представленные изображением, видеофайлом или HTML-страницей, должны ассоциироваться с конкретным файлом метаданных;
- наличие языка взаимодействия программ; на этом языке реализуется процесс коммуникации между системой организации обучения и обучающей программой.

⁴ <https://scorm.com/>. Дата обращения 17.04.2022. / Accessed April 17, 2022.

С использованием данного стандарта реализованы такие системы поддержки образовательного процесса как Moodle⁵, Sakai⁶, ATutor⁷, ILIAS⁸ и другие.

На сегодняшний день наиболее предпочтительными для учебных заведений являются не готовые решения, а системы, предоставляющие гибкие инструментальные возможности, направленные на оказание поддержки учебного процесса, которые в дальнейшем можно усовершенствовать [8, 9].

КОМПОНЕНТ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В ИС ПОДДЕРЖКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Несмотря на наличие у многих LMS схожих функциональных возможностей, сами системы могут значительно различаться между собой по ряду ключевых параметров, что, несомненно, усложняет процесс принятия решения об использовании той или иной системы в учебном заведении. Для выявления различных типов LMS можно в качестве классификаторов использовать следующие признаки:

- тип лицензии,
- функциональные возможности,
- модульность,
- требования, предъявляемые заказчиком к системе,
- особенности физического расположения системы [8].

Тип лицензии позволяет классифицировать LMS на три типа: бесплатные, частично платные и платные. Для бесплатных систем характерно свободное распространение. Частично платные системы характеризуются наличием определенного, часто небольшого, бесплатного функционала, который может быть расширен за дополнительную плату.

Примером одной из самых популярных на сегодняшний день бесплатных LMS является Moodle. Система предоставляет пользователям инструментарий как для создания курсов, так и для мониторинга учебного процесса. В качестве ключевых достоинств можно выделить простоту и удобство использования, широкие возможности по организации образовательного процесса и контроля знаний обучающихся и относительную дружелюбность к сторонним разработкам и процессу их внедрения в систему [10].

⁵ <https://moodle.org/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

⁶ <https://www.sakailms.org/>. Дата обращения 11.05.2022. / Accessed May 11, 2022.

⁷ <https://atutor.github.io/>. Дата обращения 13.05.2022. / Accessed May 13, 2022.

⁸ <https://www.ilias.de/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

В качестве примера частично платной системы можно привести систему Efront⁹, обладающую широким стартовым набором инструментальных возможностей: глоссарий, тестирование, форум, чат, календарь и т.д.

Среди платных систем можно выделить Дневник.ру¹⁰, Мой Универ¹¹, ЯКласс¹², SharePointLMS¹³, BlackBoard¹⁴, Desire2Learn¹⁵ и другие.

Классифицируя ИС по функциональным возможностям, выделим два типа LMS:

- 1) направленные на поддержание учебного процесса в целом;
- 2) направленные только на предоставление учебного материала и проведение мероприятий по тестированию знаний у обучающихся.

Примеры первого типа – это Moodle, Sakai, e-University¹⁶, Education Elements¹⁷, Pias, Odijoo¹⁸, ScormCloud¹⁹, Дневник.ру, Мой Универ, ЯКласс, Efront.

Примеры систем, относящихся ко второму типу: Claroline²⁰, Dokeos²¹, LAMS²², Learn eXact²³, Coursera²⁴.

Используя для классификации LMS критерий модульности, можно выделить автономные и модульные типы систем. Для автономных LMS свойственна реализация всего инструментария для

осуществления деятельности в одном приложении. Модульные LMS представляют собой независимые подсистемы.

С точки зрения предъявляемых требований можно выделить LMS, реализованные в виде готового продукта или сделанные на заказ в соответствии с нуждами организации-заказчика.

По физическому расположению – локальные, серверные и облачные.

В качестве примера локальных и серверных LMS можно назвать Moodle, Tandem University²⁵, Pias, ATutor, WebTutor²⁶. К облачным можно отнести Coursera, iSpring²⁷, Ed-modo²⁸, Odijoo, Scorm Cloud, TalentLMS²⁹, Docebo³⁰.

Кроме основных требований, предъявляемых к современным LMS, таких как надежность, удобство и низкая стоимость для участников образовательного процесса, на основании классификационных признаков, рассмотренных выше, можно сформулировать дополнительные:

- наличие гибкого инструментария, позволяющего учебному учреждению реализовывать необходимые функции в рамках образовательного процесса;
- поддержка стандарта SCORM или Tin Can API³¹ для миграции контента из одной ИС в другую;
- адаптивность.

Главной тенденцией в развитии LMS является трансформация в «Цифровую образовательную среду следующего поколения» (Next Generation Digital Learning Environment, NGDLE), представляющую из себя экосистему, состоящую из инструментов обучения и компонентов, разработанных по общим стандартам [11]. Для корректного функционирования NGDLE необходима реализация следующих функциональных особенностей:

- возможность проводить аналитику и оценку учебного процесса;
- наличие совместимости и возможность персональной настройки учебной окружающей среды;

⁹ <https://www.efrontlearning.com/>. Дата обращения 12.05.2022. / Accessed May 12, 2022.

¹⁰ <https://dnevnik.ru/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022 (in Russ.).

¹¹ <https://moi-univer.ru/>. Дата обращения 21.05.2022. / Accessed May 21, 2022 (in Russ.).

¹² <https://www.yaklass.ru/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022 (in Russ.).

¹³ <https://www.sharepointlms.com/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

¹⁴ <https://www.blackboard.com/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

¹⁵ <https://www.d2l.com/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

¹⁶ <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1428198>. Дата обращения 26.05.2022. / Accessed May 26, 2022 (in Russ.).

¹⁷ <https://www.edelements.com/>. Дата обращения 26.05.2022. / Accessed May 26, 2022.

¹⁸ <https://rusticissoftware.com/blog/taking-scorm-to-odijoo/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

¹⁹ https://rusticissoftware.com/products/scorm-cloud/?utm_source=google&utm_medium=natural_search. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

²⁰ <https://www.claroline.com/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

²¹ <https://www.dokeos.com/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

²² <https://www.lamsfoundation.org/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

²³ <https://www.exactls.com/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

²⁴ <https://www.coursera.org/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

²⁵ <https://tandemservice.ru/products/tandem-university>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022 (in Russ.).

²⁶ https://webtutor.ru/_wt/main_web. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022 (in Russ.).

²⁷ <https://www.ispring.ru/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022 (in Russ.).

²⁸ <https://soware.ru/products/edmodo>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022 (in Russ.).

²⁹ <https://www.talentlms.com/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

³⁰ <https://www.docebo.com/>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022.

³¹ Tin Can API – спецификация программ в сфере дистанционного обучения, позволяющая обучающим системам общаться между собой путем отслеживания и записи учебных занятий всех видов. [Tin Can API is a specification of programs in distance learning, which allows training systems to communicate with each other by tracking and recording training classes of all types.]

- простота и удобство в использовании инструментария, как для студентов, так и для профессорско-преподавательского состава (ППС);
- обеспечение взаимодействия и интеграции между различными учебными программами.

Указанные функциональные особенности позволяют выделить для NGDLE четыре ключевых изменения:

- должна быть реализована возможность обмена между всеми компонентами системы учебным содержанием, представленным в общем формате;
- процесс интеграции должен быть легким и удобным для уменьшения временных затрат и упрощения процесса наращивания инструментальных возможностей пользователями системы;
- в качестве основного источника получения данных по учебному процессу будет выступать учебная среда;
- NGDLE должна позволять создавать новые стандарты совместимости способами, совместимыми со своими другими стандартами, чтобы поддерживать общую согласованность.

Персонализация NGDLE охватывает два аспекта:

- оснащение и конфигурация учебной среды, которая затем используется для построения путей для выполнения учебных задач и достижения учебных целей;
- адаптивное обучение, при котором автоматизированная система предоставляет учащимся коучинг и предложения в соответствии с потребностями каждого ученика.

В последнее время наблюдается значительный импульс развития в области адаптивного обучения, и это должно быть особенностью ландшафта NGDLE. Как и в случае с другими функциональными областями NGDLE, интеграция адаптивных обучающих инструментов со способностью предоставлять данные о студенте для поддержки аналитики будет иметь ключевое значение.

В контексте NGDLE для аналитики можно выделить две основные составляющие:

- изучение аналитики, характеризуемое как изменение, сбор, анализ и отчетность данных об учащемся с целью понимания и оптимизации самого учебного процесса и условий в котором он происходит;
- интегрированные системы планирования и консультирования, определяемые как институциональный потенциал для достижения прогресса в области образования путем создания единого пространства для всех участников образовательного процесса. Это пространство должно содержать информацию и набор услуг, необходимых для получения определенного уровня образования.

Следует отметить, что большая часть основных платформ LMS обладает встроенными функциональными возможностями для осуществления аналитики учебного процесса, опираясь на данные из ИС и LMS. На основе этого подобные модули можно рассматривать как попытки первого поколения. Будущие аналитические модули могут размещаться за пределами LMS, в то время как их панели могут быть доступны для просмотра в LMS или других приложениях при использовании спецификации Interoperability (протокола, описывающего взаимодействие учебных платформ – Learning Tools Interoperability, LTI)³². Результатами перехода на NGDLE станут: увеличение объема хранимых данных; интеграция соответствующего инструментария, нацеленного на улучшение качества работ; возможность использования аналитических функций для оценки учебного процесса.

ВЫБОР МОДЕЛИ ИС ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В РТУ МИРЭА

При выборе модели ИС был проведен анализ количества и объема образовательных программ РТУ МИРЭА (рис. 1) [12]. Выделено несколько ключевых факторов:

- территориальный, обусловленный расположением учебных аудиторий и базовых кафедр;
- количественный, отображающий численность обучающихся, включая тех, кто только будет поступать в университет, с учетом динамики их приема (рис. 2);
- уровень внедрения текущих ИС в деятельность учреждения, а также уровень их взаимозависимости [13, 14].

Результатом стало принятие решения о выделении специализированного компонента LMS – подсистемы управления ПУД.

Процесс обучения в вузе проводится в соответствии с основными образовательными программами, отражающими ключевые составляющие данного процесса [14, 15]. Рабочая ПУД определяет сам учебный процесс и отражает следующие ключевые составляющие:

- тематическую направленность дисциплины;
- компетенции, которые должны быть получены обучающимся по результатам ее освоения;
- количество часов и порядок проведения лекционных, практических, лабораторных занятий, включая самостоятельную работу учащегося;

³² Learning Tools Interoperability – протокол, описывающий взаимодействие учебных платформ. [Learning Tools Interoperability is the protocol describing interaction of learning platforms.]

- техническое и программное обеспечение аудитории;
- формат и методики осуществления проверки и контроля знаний обучающихся;
- рекомендованную литературу;
- вопросы к зачету или экзамену и т.д. [14, 15].

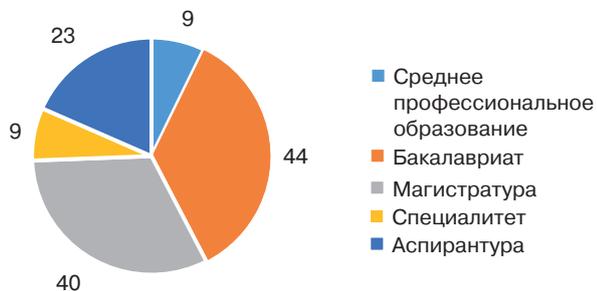


Рис. 1. Количество образовательных программ РТУ МИРЭА

Процесс разработки ПУД формируется в соответствии с нуждами рынка труда и регламентируется Федеральным законом № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012³³. При создании ПУД в первую очередь необходимо ориентироваться на ее назначение. Учебный процесс направлен на то, чтобы обучающийся овладел набором ключевых навыков и компетенций, предусмотренных направлением подготовки или специальностью. Для предоставления будущему специалисту полной картины выбранной им специальности между всеми типами компетенций должна присутствовать взаимосвязь, получаемая в результате определения места учебной дисциплины в учебном процессе.

³³ <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102162745>. Дата обращения 15.05.2022. / Accessed May 15, 2022 (in Russ.).

При разработке и реализации ПУД необходимо руководствоваться тремя ключевыми принципами: взаимосвязь, прозрачность, доступность процесса.

Первое требование является атрибутом любого процесса обучения, отражая взаимосвязь между различными элементами процесса обучения: учебный план, карта компетенций, образовательный стандарт и т.д. Второе требование относится к процессам согласования и утверждения учебной программы. Третье требование: программа должна быть доступна для всех участников процесса обучения, как преподавателей, так и студентов.

На сегодняшний день LMS используются практически в каждом вузе. При этом главным минусом является отсутствие «коробочного» решения, которые бы уменьшило нагрузку на преподавателей, взяв на себя большую часть задач, связанных с созданием рабочей ПУД. Подобное решение должно:

- компенсировать увеличение нагрузки преподавателей по составлению документов, обеспечивающих учебный процесс;
- сократить документооборот;
- ускорить процесс создания ПУД;
- формировать матрицу соответствия компетенций учебных дисциплин;
- обеспечить составление рабочих программ с учетом последовательности изучаемых дисциплин и формирования компетенций;
- осуществлять анализ взаимосвязей дисциплин, участвующих в процессе подготовки будущих специалистов;
- синхронизировать список рекомендованной литературы для освоения дисциплины с перечнем литературы библиотеки вуза;
- обеспечить возможность индивидуализации рабочей ПУД;

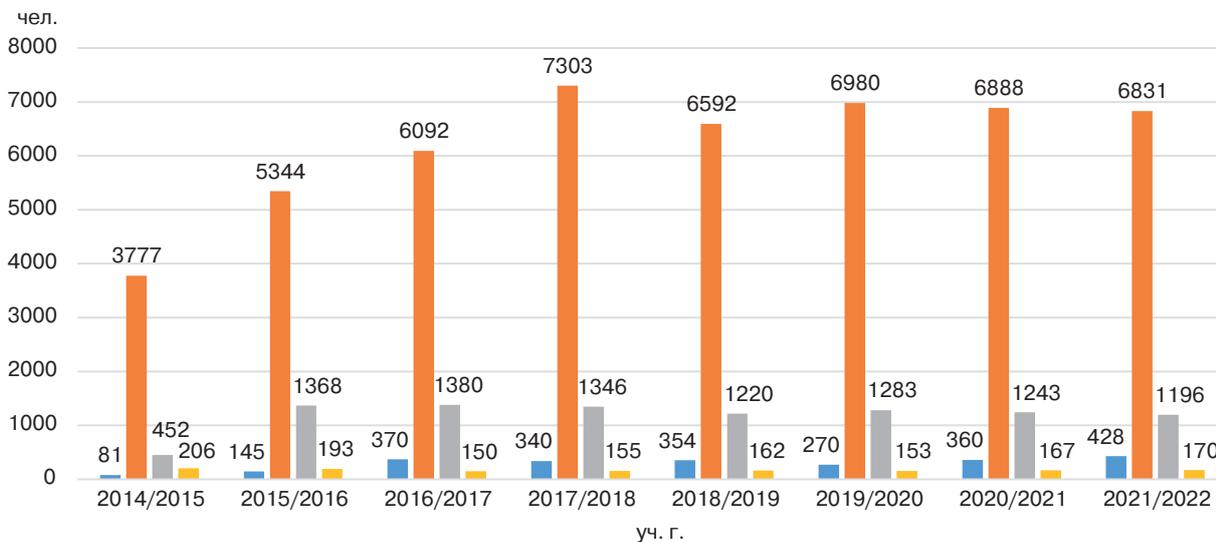


Рис. 2. Динамика количества студентов, принятых на обучение в РТУ МИРЭА

- снизить ошибочные действия преподавателей;
- автоматически выявлять расхожести и противоречия;
- отслеживать требования по материально-техническому обеспечению процесса обучения;
- обеспечить гибкость к изменениям регламентирующих процесс разработки документов;
- обеспечить соответствие рабочих программ требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования;
- формировать рабочие программы в виде отдельных изданий;
- для формальной и содержательной частей ПУД обеспечить прозрачность процессов их утверждения и согласования;
- обеспечить хранение, версионирование и доступность всех версий рабочей ПУД;
- обеспечить высокий уровень менеджмента качества при разработке рабочей ПУД;
- обеспечить доступность рабочей ПУД всем участникам учебного процесса;
- обеспечить сбор статистических данных о текущих статусах рабочей ПУД.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИС И ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ

Решая задачу автоматизации процесса разработки ПУД, необходимо реализовать функционал, который позволит осуществлять деятельность как по созданию, так и по редактированию рабочей ПУД и ее ключевых элементов:

- создание, редактирование, поиск, использование готовых программ (при условии их наличия в базе данных);
- создание и редактирование шаблонов рабочей ПУД;
- заполнение разделов рабочей ПУД на основе нормативных требований;
- добавление новой документации;



Рис. 3. Основные функциональные возможности модуля ПУД для части формирования шаблонов утверждения ПУД

- возможность интеграции с электронными библиотечными каталогами;
- работа с компетенциями (по отдельности и путем создания общего списка) – создание, редактирование, автоматическое формирование;
- формирование учебной нагрузки, вручную или автоматизированно.

С учетом всего вышесказанного было принято решение о разработке собственного модуля для работы с ПУД для последующего внедрения в РТУ МИРЭА. Формализованное описание функциональных требований к модулю ПУД может быть представлено следующим образом (рис. 3).

Область «Инструменты» предоставляет пользователю различные функциональные возможности, включая навигацию между шаблонами и печать. «Список подразделений» отображает иерархическую структуру подразделений от уровня факультета до кафедры. Область шаблона подразделений содержит информацию касательно текущего шаблона. В области «Роли пользователей» расположены ссылки на справочную информацию о разработчиках ПУД и ответственных от кафедры и методического управления. Общие шаблоны содержат ссылки на кафедральные программы.

Модуль ПУД нацелен на решение следующего набора задач:

1. Хранение создаваемых и внедряемых учебных программ с указанием их версий.
2. Доступ ППС к информации об учебных дисциплинах и их ключевых характеристиках.
3. Определение места ПУД в учебном плане.
4. Возможность установки значений, отводимых под зачетные единицы, необходимые для направлений подготовки обучающихся и соответствующей специализации, для каждой дисциплины.
5. Формирование набора компетенций обучающегося, которые он сможет приобрести по завершении изучения учебной дисциплины.
6. Выявление взаимосвязей различных дисциплин в учебном плане.
7. Статус ПУД, позволяющий определить ее наличие или отсутствие.
8. Определение случаев пересечения разделов ПУД с учетом выбранных направлений подготовки и специальностей.

Решение описанных задач приводит к выполнению трех ключевых требований, предъявляемых к процессу разработки и внедрения ПУД: доступности, взаимосвязи и прозрачности [14–16].

Доступ к ПУД, созданной с помощью модуля, предоставляется все лицам, участвующим в образовательном процессе, благодаря чему повышается степень открытости и прозрачности организации процесса обучения.

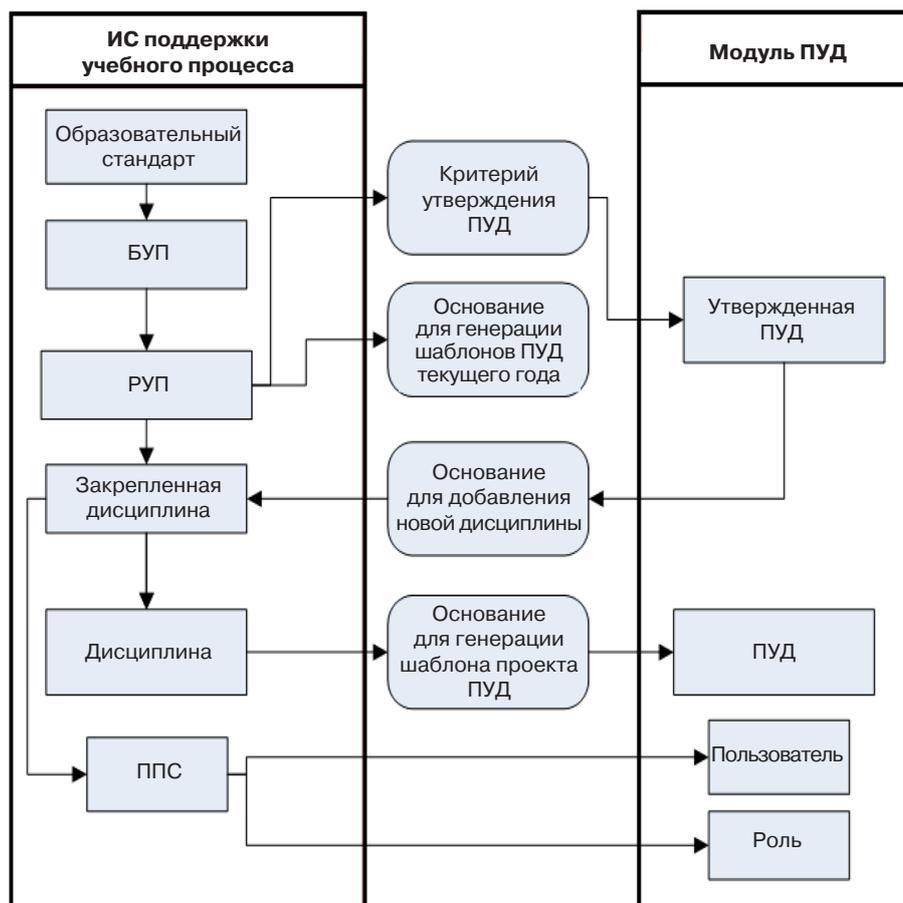


Рис. 4. Взаимосвязь атрибутов ПУД и сущностей, присущих процессу обучения. РУП – рабочий учебный план. БУП – базовый учебный план

В распоряжении модуля ПУД находятся универсальные шаблоны для формирования типовых форм ПУД, которые можно разделить на две основные группы. Первая группа – шаблоны, включенные в рабочий план и закрепленные за определенным структурным подразделением и ППС. Главный отличительный признак – это указание наличия общеуниверситетского факультатива. Вторая группа предназначена для шаблонов, которые только планируются к введению в учебный план. Обе типизированные группы шаблонов были созданы в РТУ МИРЭА в соответствии с классификацией учебных дисциплин и доступны ППС.

Структурное содержание шаблона включает две области: область сотрудника, состоящая из фотографии и раздела «Функциональные возможности», и область ПУД. Первая предоставляет сотруднику доступ к его курсам, базе материалов, ПУД, групповому чату и дополнительным инструментальным возможностям. Вторая область включает пять вкладок с информацией, между которыми пользователь может переключаться: карточка ПУД, содержание дисциплины, рецензия, журнал состояний.

Посредством интеграции модуля с ИС будут реализованы две главные возможности:

- формирование параметров учебных дисциплин с обеспечением связи между параметрами, обусловленными учебным планом и разделами выбранной дисциплины;
- наличие выбора между различными компетенциями соответствующей учебной дисциплины для получения необходимой информации, формируемой на основании данных, которые хранятся в карте компетенций и направлении специальности (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение модуля ПУД как части ИС поддержки учебного процесса в РТУ МИРЭА позволит уменьшить временные затраты ППС на разработку ПУД путем предоставления в распоряжение пользователей различных шаблонов и возможности их автозаполнения в соответствии с учебным планом дисциплины. Функционал модуля ПУД обеспечит сбор статистических данных касательно текущего статуса программы и доступность всех версий ПУД, повысит уровень информированности студентов.

Вклад авторов

Ю.В. Старичкова разработала функциональные возможности модуля собственной разработки «Программы учебных дисциплин».

И.Е. Рогов провел анализ связей ПУД и ключевых сущностей учебного процесса.

В.С. Томашевская проработала классификацию систем управления обучением по различным признакам, ключевые требования к учебным дисциплинам и структуру ПУД.

Authors' contributions

Ju.V. Starichkova has developed the functionality of the self-developed module "Academic Discipline Programs."

I.E. Rogov has conducted an analysis of the links between the ADP and the key entities of the educational process.

V.S. Tomashevskaya made a classification of learning management systems according to various criteria, key requirements for academic disciplines and the structure of ADPs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимова В.Е., Кириллова О.А. Информационная образовательная среда вуза. *Вестник Курганского государственного университета*. 2020;(1–55):81–84.
2. Ежова Ю.М. Особенности организации образовательного процесса в условиях информационно-образовательной среды. *Азимут научных исследований: педагогика и психология*. 2021;10(1–34):96–100. <https://doi.org/10.26140/anip-2021-1001-0023>
3. Иванова О.Ю., Кутузова З.Ю., Кутузов А.В. Информационно-образовательная среда вуза: сущность и структура. *Концепт*. 2020;8:20–29. URL: <https://e-koncept.ru/2020/201054.htm>
4. Поняева Т.А. Организация дистанционного обучения в высших учебных заведениях на основе LMS системы. *Проблемы современного педагогического образования*. 2020;(67–4):330–332.
5. Власенко А.В., Каширина Е.И. Актуальные вопросы управления данными в условиях цифровой трансформации. *Вестник АГУ*. 2020;3(266):74–79. URL: <http://vestnik.adygnet.ru/files/2020.3/6412/74-79.pdf>
6. Соловов А.В. Математическое моделирование содержания электронных образовательных ресурсов. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва*. 2009;4:245–253.
7. Стафеев С.К., Сухорукова М.В., Пашковский М.А. и др. Внедрение открытого образовательного стандарта SCORM в учебный процесс. *Научно-технический Вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики*. 2007;44:10–15.
8. Попова Ю.Б. Классификация автоматизированных систем управления обучением. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2016;3:51–58.
9. Гиря И.А. Интеграция моделей знаний ученика в адаптивной среде дистанционного обучения. *Образовательные технологии и общество*. 2010;13(4):240–245.
10. Белько Е.С. Опыт проектирования электронного обучающего курса по математическому анализу в системе Moodle. *Вестник Нижневартковского государственного университета*. 2020;3:4–10. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/20-3/01>
11. Клюев А. Как меняется управление университетами в период пандемии. *Университетское управление: практика и анализ*. 2020;24(3):7–12. URL: <https://www.umj.ru/jour/article/view/1242/1060>

REFERENCES

1. Evdokimova V.E., Kirillova O.A. Information educational environment of the university. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Kurgan State University*. 2020;(1–55):81–84 (in Russ.).
2. Ezhova Yu.M. Features of the organization of the educational process in the information and educational environment. *Azimuth nauchnykh issledovaniy: pedagogika i psikhologiya = Azimuth Scientific Research: Pedagogy and Psychology*. 2021;10(1–34):96–100 (in Russ.). <https://doi.org/10.26140/anip-2021-1001-0023>
3. Ivanova O.Yu., Kutuzova Z.Yu., Kutuzov A.V. Information and educational environment of higher school: essence and structure. *Kontsept = Concept*. 2020;8:20–29 (in Russ.). Available from URL: <https://e-koncept.ru/2020/201054.htm>
4. Ponyaeva T.A. Organization of distance learning in higher educational institutions based on LMS systems. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya = Problems of Modern Pedagogical Education*. 2020;(67–4):330–332 (in Russ.).
5. Vlasenko A.V., Kashirina E.I. Current issues of data management in the context of digital transformation. *Vestnik AGU = The Bulletin of the Adyge State University*. 2020;3(266):74–79 (in Russ.). Available from URL: <http://vestnik.adygnet.ru/files/2020.3/6412/74-79.pdf>
6. Solovov A.V. Mathematical modeling of the content of electronic educational resources. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva = Vestnik SGAU*. 2009;4:245–253 (in Russ.).
7. Stafeyev S.K., Sukhorukova M.V., Pashkovskii M.A., et al. Implementation of the open educational standard SCORM in the educational process. *Nauchno-tehnicheskii Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2007;44:10–15 (in Russ.).
8. Popova Yu.B. Classification of learning management systems. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Applied Information Science*. 2016;3:51–58 (in Russ.).
9. Giryay I.A. Integration of student knowledge models in the adaptive distance learning environment. *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo = Educational Technology & Society*. 2010;13(4):240–245 (in Russ.).
10. Belko E.S. Experience in designing an electronic training course on mathematical analysis in the Moodle system. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2020;3:4–10 (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/20-3/01>

12. Прокопов Н.И., Иванов С.Ю., Томашевская В.С., Антонюк С.Н., Иванова Д.В. Научный потенциал современного вуза: перспективы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре. *Общество: социология, психология, педагогика*. 2020;1(69):14–23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42444059>
13. Томашевская В.С., Рогов И.Е., Старичкова Ю.В., Карачунский А.И., Румянцев С.А. Опыт и тенденции развития подготовки специалистов по направлениям математических методов и информационных технологий в области здравоохранения. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования*. 2015;2:40–48.
14. Рогов И.Е., Адоньев А.А., Старичкова Ю.В. Опыт разработки, тенденции развития и внедрения информационных систем поддержки основного образовательного процесса. *Современные технологии и ИТ-образование*. 2017;13(4):82–90. <https://doi.org/10.25559/SITITO.2017.4.628>
15. Шаламков С.А., Старичкова Ю.В. Опыт разработки и внедрения модуля автоматизации процесса создания и утверждения программ учебных дисциплин в рамках информационной образовательной среды поддержки основного образовательного процесса. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования*. 2015;4:67–76.
16. Карпенко А.П., Добряков А.А. Модельное обеспечение автоматизированных обучающих систем. *Обзор. Наука и образование*. 2011;7. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/193116.html>
11. Kluev A. Changes in university management during the pandemic. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University Management: Practice and Analysis*. 2020;24(3):7–12 (in Russ.). Available from URL: <https://www.umj.ru/jour/article/view/1242/1060>
12. Prokopov N.I., Ivanov S.Yu., Tomashevskaya V.S., Antonyuk S.N., Ivanova D.V. Scientific potential of a modern university: prospects for preparation of scientific and pedagogical personnel via postgraduate education. *Obshchestvo: sotsiologiya, psikhologiya, pedagogika = Society: Sociology, Psychology, Pedagogics*. 2020;1(69):14–23 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42444059>
13. Tomashevskaya V.S., Rogov I.E., Starichkova Yu.V., Karachunskii A.I., Rummyantsev S.A. Experience and trends in the development of training specialists in the areas of mathematical methods and information technologies in the field of healthcare. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Informatizatsiya obrazovaniya = RUDN Journal of Informatization in Education*. 2015;2:40–48 (in Russ.).
14. Rogov I.E., Adon'ev A.A., Starichkova Yu.V. Experience in development, trends in the development and implementation of information systems supporting the main educational process. *Sovremennye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT Education*. 2017;13(4):82–90 (in Russ.). <https://doi.org/10.25559/SITITO.2017.4.628>
15. Shalamkov S.A., Starichkova Yu.V. Experience in the development and implementation of the module automate the process of creating and approving programs of study within the information educational environment of support of the basic educational process. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Informatizatsiya obrazovaniya = RUDN Journal of Informatization in Education*. 2015;4:67–76 (in Russ.).
16. Karpenko A.P., Dobryakov A.A. Modeling support for automated learning systems. Review. *Nauka i obrazovanie = Science & Education*. 2011;7 (in Russ.). Available from URL: <http://technomag.edu.ru/doc/193116.html>

Об авторах

Старичкова Юлия Викторовна, к.т.н., заведующий кафедрой технологий искусственного интеллекта Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: starichkova@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3001-6791, <https://orcid.org/0000-0003-1804-9761>

Рогов Игорь Евгеньевич, директор Дирекции программы развития ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: 2030@mirea.ru. Scopus Author ID 57220747598, SPIN-код РИНЦ 5036-3472, <https://orcid.org/0000-0001-6095-9502>

Томашевская Валерия Сергеевна, к.т.н., доцент кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tomashevskaya@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 9099-0294, <https://orcid.org/0000-0002-6460-2866>

About the authors

Julia V. Starichkova, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Artificial Intelligence Technologies, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: starichkova@mirea.ru. RSCI SPIN-code 3001-6791, <https://orcid.org/0000-0003-1804-9761>

Igor E. Rogov, Director of the Development Program Directorate, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: 2030@mirea.ru. Scopus Author ID 57220747598, RSCI SPIN-code 5036-3472, <https://orcid.org/0000-0001-6095-9502>

Valeriya S. Tomashevskaya, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tomashevskaya@mirea.ru. RSCI SPIN-code 9099-0294, <https://orcid.org/0000-0002-6460-2866>

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования
и неразрушающего контроля

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

УДК 004.023

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-18-30>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Непрерывный генетический алгоритм в задаче захвата манипуляционным роботом объекта априорно неизвестной формы

А.Д. Воронков[@],
С.А.К. Диане

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: a.voronkov.rtu@yandex.ru

Резюме

Цели. Задача взаимодействия манипуляционного робота с априорно неизвестными объектами рабочей области представляет большой интерес для научного сообщества и множества отраслей. Решение этой задачи позволит сократить время адаптации робота к новым средам и объектам в них. Один из главных этапов взаимодействия манипуляционного робота с объектами сцены – поиск целевого положения захватного устройства на основе бортовой сенсорной подсистемы – может быть осуществлен рядом методов. Методы, связанные с технологиями машинного обучения и самообучения, могут быть неподходящими для некоторых областей применения (например, во время аварийно-спасательных работ), когда требуется быстро осуществить поиск целевого положения захватного устройства для априорно неизвестного объекта, информации о котором нет в базе данных робота. Поэтому для этой задачи представляются применимыми эвристические подходы, например, генетический алгоритм. Целями работы являются реализация поиска целевого положения захватного устройства с избеганием столкновений на основе непрерывного генетического алгоритма и исследование его работоспособности в условиях виртуального моделирования.

Методы. Использован эвристический алгоритм поиска – непрерывный генетический алгоритм. В комплексном алгоритме анализа сцены использованы классические методы обработки изображения. Использовано виртуальное моделирование для оценки эффективности алгоритма.

Результаты. В работе рассмотрена возможность применения непрерывного генетического алгоритма в задаче захвата объекта априорно неизвестной формы с избеганием столкновений с другими объектами статической сцены. Представлен комплексный алгоритм анализа сцены и реализация непрерывного генетического алгоритма для решения задачи поиска целевого положения захватного устройства робота избыточной кинематики Kuka LBR iiwa 7 R800. Проведены эксперименты и приведены результаты виртуального моделирования полученного алгоритма.

Выводы. Проведенное исследование позволяет утверждать, что непрерывный генетический алгоритм достаточно эффективен в задачах поиска целевого положения захватного устройства манипуляционного робота при условиях, когда статическая сцена представляет собой хаотично расположенные объекты разной формы.

Ключевые слова: непрерывный генетический алгоритм, захват объектов неизвестной формы, позиционирование захватного устройства, избегание столкновений, манипуляционный робот

• Поступила: 17.03.2022 • Доработана: 12.04.2022 • Принята к опубликованию: 26.10.2022

Для цитирования: Воронков А.Д., Диане С.А.К. Непрерывный генетический алгоритм в задаче захвата манипуляционным роботом объекта априорно неизвестной формы. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):18–30. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-18-30>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Continuous genetic algorithm for grasping an object of a priori unknown shape by a robotic manipulator

Andrey D. Voronkov[®],
Sekou A.K. Diane

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: a.voronkov.rtu@yandex.ru

Abstract

Objectives. The problem of providing the interaction of a robotic manipulator with a priori unknown objects in a given workspace is of great interest both to the research community and many industries. By developing a solution to this problem, it will be possible to reduce the time taken for robots to adapt to new environments and objects therein. One of the primary stages of providing the interaction of the robotic manipulator with objects is the search for the target position of the robot gripper based on the onboard sensor subsystem, which can be carried out by a number of methods. Methods associated with machine learning and self-learning technologies may not be suitable for some applications (for example, during rescue operations) when it is necessary to quickly search for the target position of the gripper for an a priori unknown object, about which there is no relevant information in the robot database. Therefore, for this problem, heuristic approaches – for example, genetic algorithms – seem to be applicable. The objectives of this work are to implement a search based on a continuous genetic algorithm for the target position of the robot gripper including collision avoidance and study its performance under virtual simulation.

Methods. A heuristic search algorithm (continuous genetic algorithm) is used. The complex scene analysis algorithm uses classical image processing methods. In order to evaluate the effectiveness of the algorithm, virtual simulation is used.

Results. The possibility of using a continuous genetic algorithm is analyzed in the problem of grasping an object of an a priori unknown shape avoiding collisions with other objects of a static scene. A complex scene analysis algorithm and implementation of a continuous genetic algorithm are presented for finding the target position of the gripper of a Kuka LBR iiwa 7 R800 robotic control system with redundant kinematics. The results of an experimental virtual simulation of the obtained algorithm are presented.

Conclusions. The conducted research demonstrates the effectiveness of the continuous genetic algorithm in obtaining the target position of the gripper of the robotic manipulator under conditions when the static scene represents randomly located objects of various shapes.

Keywords: continuous genetic algorithm, grasping of objects of unknown shape, positioning of gripper, collision avoidance, robotic manipulator

• Submitted: 17.03.2022 • Revised: 12.04.2022 • Accepted: 26.10.2022

For citation: Voronkov A.D., Diane S.A.K. Continuous genetic algorithm for grasping an object of a priori unknown shape by a robotic manipulator. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):18–30. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-18-30>

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

Зачастую актуальные задачи современной манипуляционной робототехники подразумевают функционирование робота внутри помещения. В этих условиях робот может столкнуться с большим количеством объектов априорно неизвестной формы, цвета, текстуры. Источником значительного объема исходных данных для задач робототехники являются изображения, полученные с помощью RGBD-камер¹. Среди задач манипуляционной робототехники, для решения которых достаточно наличия одной RGBD-камеры, наиболее актуальными являются: уборка помещения, аварийно-спасательные работы, работа с продукцией на конвейерной ленте. Все эти задачи не требуют от управляющей системы верхнего уровня определять принадлежность объектов к какому-либо классу. Таким образом, в настоящий момент актуальна задача взаимодействия манипуляционных роботов с объектами рабочей области, форма, класс и текстура которых неизвестны заранее. Решение этой задачи позволило бы манипуляционным роботам эффективнее взаимодействовать с десятками различных объектов, которые встречаются в окружающем мире. Задача корректного позиционирования рабочего органа манипуляционного робота играет ключевую роль во взаимодействии робота со сценой.

Можно утверждать, что модели, методы и алгоритмы для захвата и переноса априорно неизвестных объектов, работающие на основе RGBD-изображения, открывают широкие возможности для таких сфер, как сервисная робототехника и специальная робототехника для выполнения аварийно-спасательных работ. Эти возможности могут быть использованы, когда робот работает в неподготовленных и неконтролируемых условиях реального мира.

¹ RGBD-камера – сенсор, широко используемый в робототехнике, обеспечивающий помимо цветного изображения окружающего пространства информацию о глубине, т.е. информацию о расстоянии от камеры до препятствия для каждого пикселя. [An RGBD camera is a sensor widely used in robotics that provides, in addition to a color image of the environment, depth information, i.e., information about the distance from the camera to the obstacle for each pixel.]

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАССМАТРИВАЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

Рассматриваемая проблема осуществления захвата априорно неизвестного объекта манипуляционным роботом комплексна, т.к. она включает в себя необходимость обработки данных с сенсоров, процесс анализа сцены, оценку планируемого захвата в соответствии с некоторыми критериями, необходимость минимизации временных затрат на поиск вариантов положений захватного устройства. Множество исследовательских работ посвящено решению задачи захвата априорно неизвестных объектов с избеганием столкновений [1–4]. Ее полноценное решение включает в себя выполнение ряда подзадач, среди которых могут быть: сегментация априорно неизвестных объектов на RGBD-изображении, реконструкция формы объектов, определение положения и ориентации выделенных априорно неизвестных объектов, синтез гипотез об оптимальном расположении захватного устройства с избеганием столкновений.

В исследованиях [1, 5] авторы прибегают к аппроксимации формы захватного устройства с помощью математической модели смещенного и ориентированного цилиндра, что впоследствии используется для синтеза возможных положений захватного устройства и отборе оптимального. В работах отмечается, что большинство существующих подходов, анализирующих RGBD-изображение, выделяют плоскую поверхность стола или пола, на котором расположены предметы, с помощью RANSAC². Это позволяет избежать этапа сегментации всей сцены с помощью нейронной сети и получить набор кластеров точек, которые отражают предметы на поверхности. Помимо этого, авторы делят подходы к анализу сцены при захвате неизвестных объектов на глобальные – такие, где подбор положения схвата совершается на основе реконструированной 3D-модели объекта, и локальные – которые полагаются на границы, сегменты объектов на изображении. В данном

² RANSAC (random sample consensus) – итерационный алгоритм оценки параметров математической модели с использованием случайных выборок из исходных данных. [Random sample consensus (RANSAC) is an iterative algorithm for estimating the parameters of a mathematical model using random samples from initial data.]

контексте предлагаемый в настоящей работе подход является по большей части глобальным, т.к. поиск целевого положения захватного устройства осуществляется на основе выделенного подмножества облака точек. Работа с трехмерными данными (облако точек), увеличивает время поиска решения, но позволяет проводить проверку наличия столкновений схвата с предметами сцены.

Основой для синтеза захватных конфигураций робота может стать информация о сегментах всех видимых отдельных объектов статической сцены. Для этого в работе [6] исследована сегментация объектов без априорного знания их классов. Используется иерархическая структура нейронной сети. При таком подходе нейронная сеть способна сегментировать видимые части объектов, выделять прогнозируемые полные сегменты объектов, включающие их скрытые части, и сегментировать «загороженные» области объектов на RGBD-изображении. Иерархичность заключается в том, что каждая новая единица информации получается на основе предыдущих, что составляет новизну подхода. Манипуляционный робот, использующий подобную нейронную сеть, способен достать целевой предмет из кучи предметов. Для этого он один за другим убирает предметы, загромождающие целевой предмет, получая целевое положение манипулятора с помощью нейронной сети Contact-GraspNet [2], генерирующей положение и ориентацию параллельного захватного устройства, до тех пор, пока у целевого предмета имеются «загороженные» области. Таким образом, достигается последовательный захват и перенос предметов, препятствующих доступу к целевому предмету, а затем и захват самого целевого предмета.

Реконструкция выделенных объектов также является предметом большого количества исследований. Реконструированная модель объекта позволяет синтезировать множество вариантов расположения захватного устройства относительно нее, после чего выбирается оптимальный вариант. Так, задача может быть решена с помощью аппроксимации найденного подмножества облака точек моделью суперквадрика или моделью тела-примитива, реконструкции с помощью алгоритма машинного обучения, анализирующего часть поверхности.

В работе [7] используется подход, основанный на замене выделенного и обработанного подмножества облака точек, отражающего отдельный объект, на тело-суперквадрик. Все возможные конфигурации членов семейства суперквадриков описываются одиннадцатью параметрами. В ходе работы алгоритма выделяются плоскость стола и кластеры точек, принадлежащих отдельным предметам. Для обеспечения надежного захвата используются 2 критерия: размещение захватного устройства как можно ближе

к центру суперквадрика и размещение точек касания в местах с наименьшей кривизной поверхности. Захват предмета осуществляется путем синтеза набора возможных захватов и выбора первого достижимого захвата.

Исследование [8] предлагает подход к захвату предметов любой формы путем их представления в виде набора тел-примитивов, таких как сферы, цилиндры, прямоугольные параллелепипеды и конусы. Подход основывается на логике поведения человека при попытке взять предмет. Также в работе рассмотрен набор правил, которые описывают стартовые положения захватного устройства относительно тела-примитива. Таким образом, обобщающая информация о требуемом расположении захватного устройства может быть заложена в управляющую систему верхнего уровня заранее.

В работе [9] исследуется возможность реконструкции сцены, полученной на основе изображения глубины с одной позиции камеры. Для полученного неполного представления сцены алгоритм «случайного леса» сопоставляет каждой 3D-точке, полученной из Depth-изображения, предсказание значений TSDF-функции³ для ее окрестности. Массив таких предсказаний формирует результирующую поверхность. Обучающая выборка формируется из 3D-модели сцены. Данная работа интересна тем, что в ней не используется информация о классах объектов, которые содержит сцена. Это дает большое преимущество, поскольку в этом случае решение может быть применено для реконструкции формы отдельного объекта.

Непрерывный генетический алгоритм представляет собой классическую версию генетического алгоритма за тем исключением, что гены особей являются вещественными числами [10]. Таким образом, сама особь популяции – это вектор вещественных чисел, который содержит решение задачи. Такой подход позволяет осуществлять поиск решения в непрерывном пространстве решений, что предпочтительнее для ряда задач. Непрерывный генетический алгоритм пригоден для решения задачи поиска положения и ориентации в пространстве, удовлетворяющих некоторому критерию.

В работе [11] авторами предлагается метод определения положения и ориентации объекта с недеформируемой структурой по черно-белому снимку объекта и известной заранее 3D-модели объекта.

³ TSDF (truncated signed distance function) – функция для представления трехмерной поверхности в виде воксельной сетки, каждый воксель которой помечается расстоянием до ближайшей поверхности. [Truncated signed distance function (TSDF) is a function for representing a three-dimensional surface as a voxel grid, each voxel being marked by the distance to the nearest surface.]

Исходными данными являются набор ключевых точек, найденных на черно-белом снимке объекта алгоритмом для детектирования SUSAN⁴, и 3D-модель объекта с множеством отмеченных на ней ключевых точек. В качестве генов хромосомы особи авторы использовали три угла Эйлера α , β , γ и три проекции вектора переноса T_x , T_y , T_z . Функция приспособленности вычислялась как среднее значение расстояния между каждой ключевой точкой, распознанной алгоритмом SUSAN, и ближайшей к ней ключевой точкой модели, спроецированной на плоскость изображения. В результате генетическим алгоритмом были подобраны такие решения, при которых ключевые точки смоделированного объекта совпадали с исходными. Критерий окончания работы алгоритма – пороговое значение среднего расстояния, при котором визуально положение и ориентация были найдены правильно, определялся экспериментальным путем. В схеме алгоритма использовалось одноточечное скрещивание, отбор методом вращения рулеточного колеса, элитная поколенческая репродукция – переход наиболее приспособленной особи текущего поколения в следующее поколение⁵.

Пример локального подхода в терминологии [5] представлен в работе [12]. Здесь авторы используют в качестве исходных данных 2D-изображение глубины. На основе поиска граней объектов определяется положение и ориентация захватного устройства робота. Недостатком подхода является отсутствие избегания столкновений с другими препятствиями, достоинством – высокая скорость работы.

Работы [3] и [13] также используют подходы, основанные на применении нейронных сетей. В [3] на основе TSDF-представления сцены сверточная нейронная сеть за один проход осуществляет вычисление предполагаемого качественного показателя захвата, ориентации и ширины открытия захватного устройства для каждого вокселя сцены. Для этого нейронная сеть была обучена на достоверных данных, полученных в симуляторе. В работе [13] для сегментации априорно неизвестных объектов

⁴ SUSAN – алгоритм для детектирования признаков на изображении, анализирующий яркостные изменения в локальной окрестности рассматриваемой точки. [SUSAN is an algorithm for detecting features in an image that analyses brightness changes in the local neighborhood of the considered point.]

⁵ Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. *Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации*. Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Информационные технологии и компьютерное моделирование в прикладной математике». Нижний Новгород: ННГУ; 2007. 85 с. [Batishchev D.I., Neimark E.A., Starostin N.V. *Application of genetic algorithms to solving discrete optimization problems*. Teaching and methodological materials for the advanced training program “Information technology and computer modeling in applied mathematics.” Nizhny Novgorod: UNN; 2007. 85 p. (in Russ.).]

нейронная сеть выдает карту признаков, которая отражает, где на изображении сосредоточены области с одинаковыми свойствами. Затем на основе этой карты алгоритм кластеризации определяет количество кластеров на изображении и выдает информацию о результирующих сегментах. Данные о сегментах априорно неизвестных объектов могут быть основой для дальнейшего анализа сцены с целью поиска целевого положения захватного устройства.

В рамках решения задачи анализа сложной сцены для взаимодействия манипуляционного робота с априорно неизвестными объектами сцены также разработаны несколько обучающих наборов данных, таких как The Object Segmentation Database. Датасет предназначен для обучения нейронных сетей в задаче сегментации хаотично расположенных неизвестных объектов разной формы и содержит 111 единиц данных, которые представляют собой RGB-изображение сцены, Depth-изображение и информацию о сегментации. Сегментированные объекты отнесены только к одному классу – «объект», а на тренировочных изображениях выделены все экземпляры данного класса по отдельности. Каждый элемент данного датасета состоит из RGB-изображения, изображения глубины и проаннотированного изображения с сегментами объектов. Сцены, представленные в датасете, состоят из нескольких хаотично расположенных предметов разной формы и текстуры.

Таким образом, задача, рассматриваемая в статье, является актуальной, т.к. позволяет с помощью эвристического подхода найти требуемое положение захватного устройства за несколько эпох генетического алгоритма.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ПОИСКА ЦЕЛЕВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА В СЛОЖНОЙ СЦЕНЕ

В данной работе для поиска целевого положения захватного устройства в сложной сцене с хаотично расположенными объектами неизвестной формы использовался непрерывный генетический алгоритм. Общий алгоритм состоит из нескольких этапов, отраженных на рис. 1. Как видно, в начале работы алгоритма производится генерация случайной сцены, состоящей из различных хаотично расположенных объектов. Затем манипуляционный робот Kuka LBR iiwa 7 R800 (производитель – компания KUKA, Германия) перемещается в такую predeterminedную конфигурацию, чтобы оптическая ось RGBD-камеры, закрепленной на захватном устройстве, была направлена перпендикулярно плоскости сцены. В этом положении RGBD-камера делает RGB- и Depth-снимки сцены. Полученные изображения обрабатываются

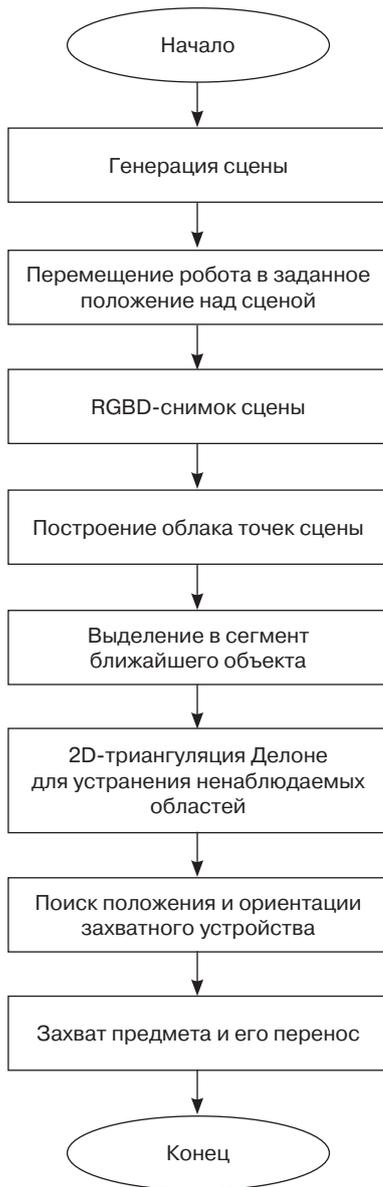
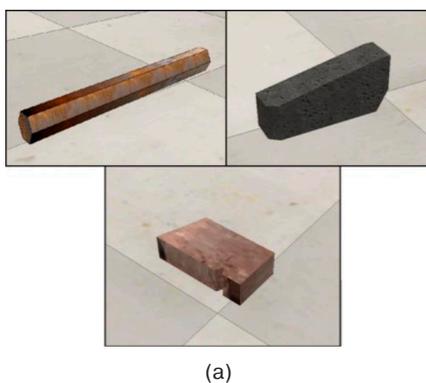


Рис. 1. Общая схема алгоритма

для формирования RGBD-изображения, подаваемого на вход нейронной сети с архитектурой U-Net, выходные данные которой также обрабатываются и представляют собой сегмент ближайшего к камере объекта, который далее рассматривается как целевой. На основе Depth-изображения строится облако точек сцены, которое делится на 2 подмножества на основе информации о сегменте целевого объекта. В подмножестве облака точек объекта и препятствия с помощью 2D-триангуляции Делоне устраняются ненаблюдаемые области. Затем с помощью непрерывного генетического алгоритма осуществляется поиск положения захватного устройства для захвата целевого объекта. Для достижения целевой точки робот перемещается вначале в предзахватное положение, затем итеративно смещает захватное устройство по направлению к объекту до достижения целевого положения. Захваченный объект переносится в целевую область для объектов. Описанные этапы более подробно рассматриваются далее.

Исходными данными является RGBD-изображение с камеры, закрепленной на схвате робота. Результатом работы алгоритма является вектор обобщенных координат, описывающий углы приводов робота, при которых возможен захват целевого объекта.

Для создания хаотичной сцены были смоделированы 20 объектов, таких как кирпичи, камни, балки и др. Объекты имеют однородную текстуру, разную форму, в т.ч. несимметричную, и соответствующие параметры массы. В процессе генерации сцены алгоритмом случайно выбирался объект, добавлялся на сцену, к нему применялось вращение и смещение, после чего алгоритм ожидал 10 с, чтобы в симуляторе предмет упал и перестал двигаться. Таким образом, достигалось наличие в нужной области сцены заданного количества случайно выбранных и хаотично расположенных объектов. На рис. 2. представлены объекты и сгенерированная случайная сцена.



(а)



(б)

Рис. 2. Создание хаотичной сцены:

(а) модели отдельных объектов сцены; (б) сгенерированная случайная сцена

После формирования случайной сцены манипуляционный робот перемещался в начальное положение, которое было задано предопределенным вектором обобщенных координат. На основе RGB- и Depth-снимков сцены производилось построение облака точек и формировались данные, подаваемые на вход нейронной сети с архитектурой U-Net [14]. Нейронная сеть была предварительно обучена сегментации ближайшего объекта на RGBD-изображении по собранной с помощью симулятора и проаннотированной обучающей выборке. Необходимо было обработать как данные перед подачей на вход нейронной сети, так и полученные данные с выхода нейронной сети. Этапы обработки представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, предварительная обработка заключалась в поиске точки Depth-изображения с минимальным значением расстояния, кадрировании участка изображения с этой точкой в центре, формировании 4-канального RGBD-изображения из RGB- и Depth-изображений, масштабировании до размера входного слоя нейронной сети 256×256 и нормализации. Окончательная обработка требовалась для устранения ложных сегментов, обнаруженных нейронной сетью. Для этого выход нейронной сети с порогом $t = 0.5$ преобразовывался в бинарную маску, морфологические операторы дилатации и эрозии удаляли малые ошибочно сегментированные области,

за истинный сегмент принимался наибольший по площади сегмент.

Для увеличения скорости работы алгоритма строилась только часть облака точек вблизи выделенного сегмента. Ввиду того, что изображение глубины, полученное с одного положения камеры, являлось единственным источником данных для построения облака точек, в построенном облаке существовали ненаблюдаемые области. Это могло бы помешать генетическому алгоритму верно оценивать приспособленность особи и осуществлять поиск корректного положения захватного устройства. Для решения этой проблемы облако точек на основе выделенного сегмента разделялось на 2 подмножества: подмножество точек, принадлежащих препятствию, и подмножество точек, принадлежащих целевому объекту. Далее с помощью двумерной триангуляции Делоне достраивались полигоны между точками. Полученные модели с полигонами затем подавались на вход алгоритма, преобразуя 3D-модель в облако точек. Полученные 2 облака точек не содержали ненаблюдаемых областей и были пригодны для работы непрерывного генетического алгоритма (рис. 4).

Положение и ориентация рабочего инструмента манипуляционного робота относительно базовой системы координат однозначно описываются вектором из 6 параметров: 3 проекции вектора переноса

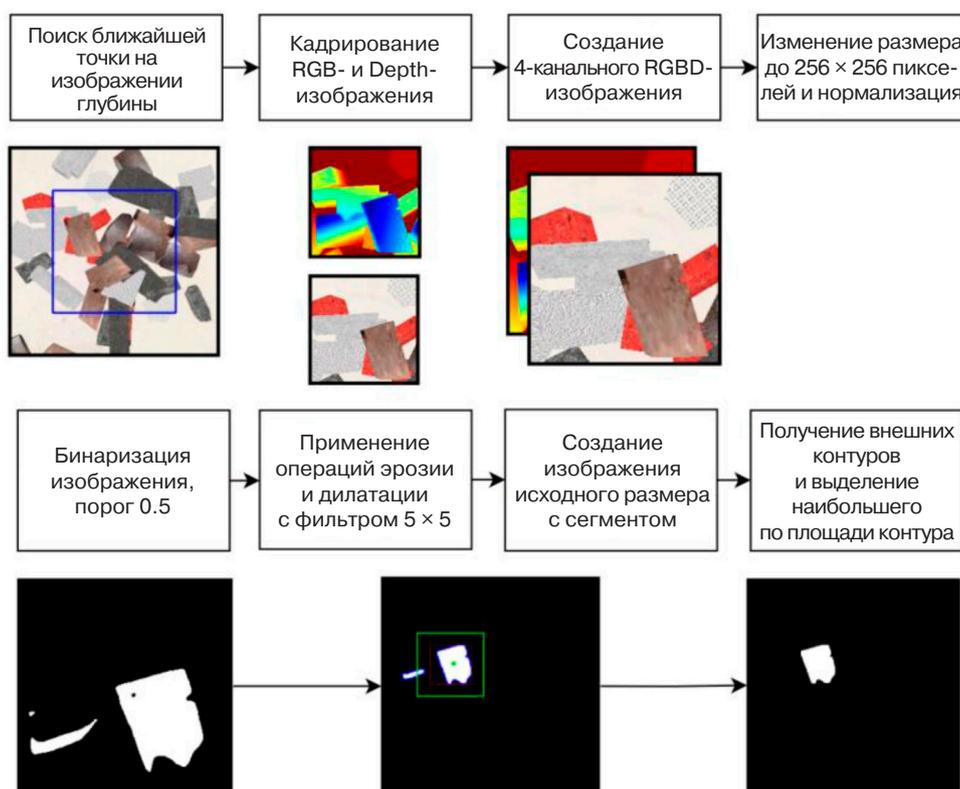


Рис. 3. Предварительная и окончательная обработка данных для сегментирующей нейронной сети с архитектурой U-Net

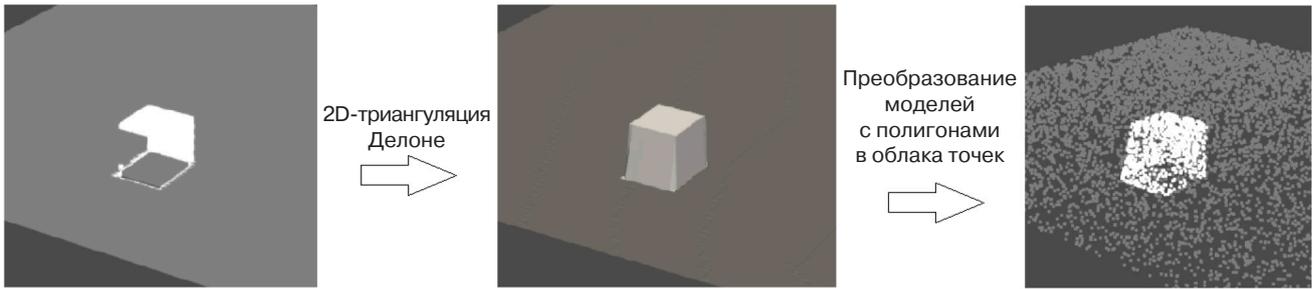


Рис. 4. Преобразование облака точек с целью устранения ненаблюдаемых областей

и 3 угла Тейта – Брайана, описывающих последовательные повороты объекта в порядке ZYX – эти 6 вещественных чисел составляют хромосому особи. Для работы генетического алгоритма использовалась 3D-модель захватного устройства. Была задана область детекции, внутри которой должен располагаться целевой объект для захвата. Для уменьшения временных затрат на работу с 3D-моделью захватного устройства она была аппроксимирована низкополигональной моделью, повторяющей геометрию исходной модели (рис. 5).

Для вычисления приспособленности особи используется вычисление количества точек целевого объекта и препятствия, находящихся внутри модели схвата и области детекции захвата. Для этого использовался алгоритм на основе метода бросания лучей, определяющего факт расположения точки внутри замкнутой трехмерной поверхности. Для того чтобы полученное положение рабочего органа было ориентировано вертикально, были заданы желаемые интервалы для углов поворота относительно осей X и Y : $-20^\circ < \alpha_g < 20^\circ$, $-20^\circ < \beta_g < 20^\circ$. При вычислении функции приспособленности учитывался выход за границы этих интервалов. Приспособленность особи вычислялась по формуле:

$$F(p) = \begin{cases} 1000 + x, & \text{если } O_{\text{inside gr}} > 0 \text{ или } I_{\text{inside gr}} > 0, \\ 500 + x, & \text{если } O_{\text{inside gr}} = 0 \text{ и } I_{\text{inside gr}} = 0 \text{ и } I_{\text{inside vol}} = 0, \\ \frac{1}{I_{\text{inside vol}}} + x, & \text{если } I_{\text{inside vol}} > 0 \text{ и } O_{\text{inside gr}} = 0 \text{ и } I_{\text{inside gr}} = 0, \end{cases}$$

где x – сумма абсолютных величин превышения подобранных углов α и β над заданными интервалами; $O_{\text{inside gr}}$ – количество точек облака точек препятствия внутри модели схвата; $I_{\text{inside vol}}$ – количество точек объекта внутри области детекции; $I_{\text{inside gr}}$ – количество точек объекта внутри модели схвата.

Использованные генетические операторы скрещивания и мутации представлены на рис. 6. Как

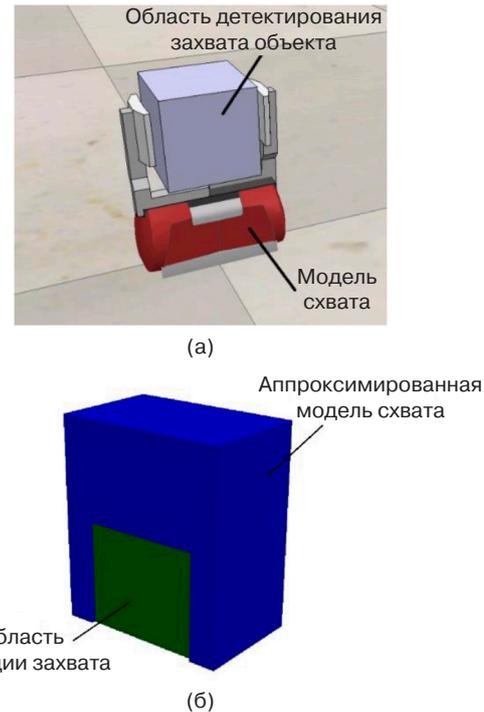


Рис. 5. Модели захватного устройства: (а) исходная модель, (б) аппроксимированная модель

видно из рисунка, оператор скрещивания представляет собой поэлементную взвешенную сумму генов двух исходных родительских хромосом, причем весовой коэффициент является случайным числом. Оператор мутации, предназначенный для внесения случайных изменений в хромосому особи, представлен в 3 вариациях: внесение случайного изменения каждого гена исходной хромосомы с вероятностью 50%, внесение изменения случайно выбранного гена каждой логической подгруппы генов и внесение изменения одного случайно выбранного гена. Выбор оператора мутации производится с равной вероятностью.

В реализованном непрерывном генетическом алгоритме была использована следующая схема:

- построение начальной популяции вблизи центральной точки сегментированного объекта;
- размер популяции: 34 особи;
- для скрещивания отбираются 16 особей: 10 лучших и 6 случайных;

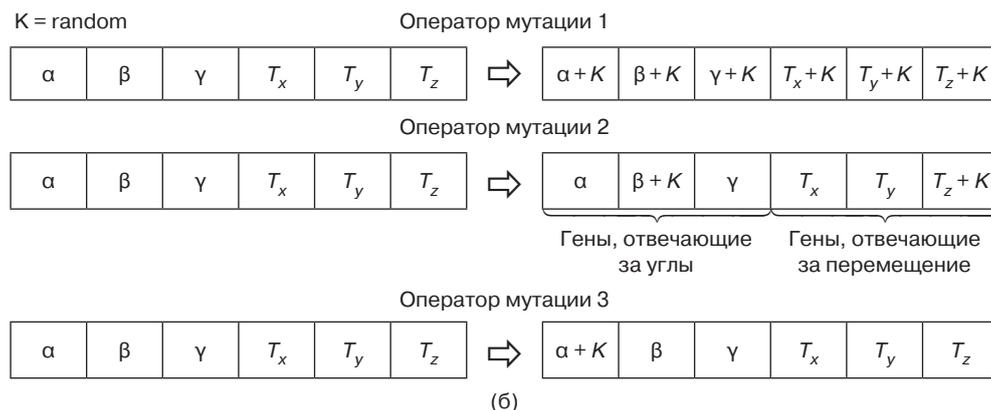
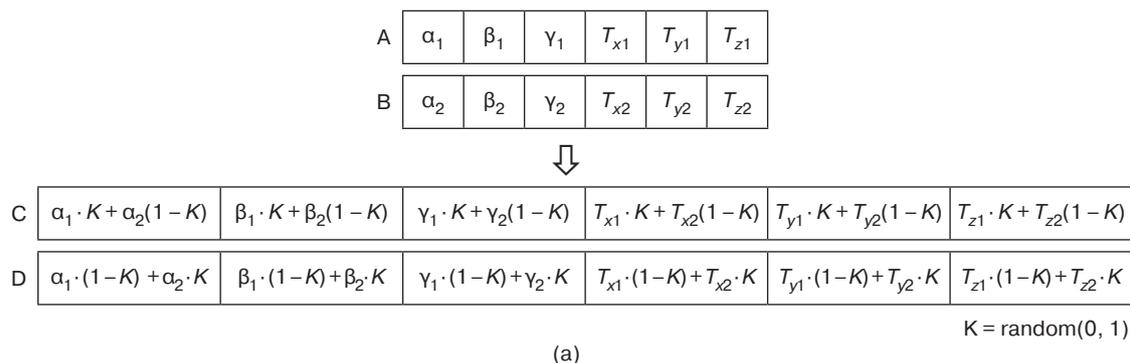


Рис. 6. Генетические операторы: (а) оператор скрещивания, (б) набор операторов мутации

- пары для скрещивания составляются случайным образом. Каждая пара особей скрещивается дважды, давая 4 потомка;
- потомки подвергаются мутации с вероятностью 30%, при этом тип мутации выбирается с равной вероятностью;
- элитная поколенческая репродукция: 2 наиболее приспособленные особи предыдущего поколения копируются в следующее поколение и не подвергаются мутации;
- критерий окончания работы алгоритма – достижение заданного количества эпох или достижение определенного значения функции приспособленности.

В качестве критериев остановки поиска решения генетическим алгоритмом были выбраны следующие условия:

- количество точек объекта, находящихся внутри области детектирования захвата, составляет более 40% от их общего количества;
- прошло более 50 эпох.

Критерии остановки поиска были выбраны, исходя из анализа результатов моделирования манипуляционного робота. В ходе ряда запусков алгоритма с разными целевыми объектами было замечено, что пороговое значение доли точек объекта, находящихся в области детектирования захвата, от общего числа точек, равное 40%, в большинстве случаев обеспечивает успешный захват объекта.

В то же время выбранное предельное количество эпох алгоритма, равное 50, обеспечивает баланс между скоростью работы и вероятностью нахождения решения, при том, что в большинстве случаев поиск положения захватного устройства для успешного захвата объекта занимал значительно меньше 50 эпох.

Целевое положение и целевая ориентация захватного устройства определяются особью с наибольшей степенью приспособленности в конце работы генетического алгоритма. На основе этих данных вычисляется предзахватное положение путем смещения полученного положения по оси *OZ* на -0.1 м. Затем с помощью решения обратной задачи кинематики вычисляются углы приводов для десяти промежуточных положений захватного устройства между предзахватным положением и целевым. Для захвата объекта робот приближает схват путем последовательной уставки на приводы углов для каждого промежуточного положения. Таким образом достигается приближение вдоль вектора для избежания столкновений с другими объектами сцены. Робот с захваченным объектом перемещается в положение над целевой областью с помощью заранее определенного вектора обобщенных координат, и схват открывается. Для решения обратной задачи кинематики была использована процедура *least_squares* Python-библиотеки *SciPy*, реализующая нелинейный метод наименьших квадратов, при котором

осуществляется поиск минимума целевой функции нескольких переменных:

$$F(\mathbf{Q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \left(A_{ij}^{08}(\mathbf{Q}) - A_{ij}^{08_goal} \right)^2,$$

где $A^{08}(\mathbf{Q})$ – однородная матрица преобразования, описывающая переход от мировой системы координат к системе координат, закрепленной на схвате, вычисленная на основе вектора обобщенных координат \mathbf{Q} , найденного численным методом и представляющего собой матрицу из 1 столбца и 7 строк, элементами которой являются углы сочленений манипуляционного робота; A^{08_goal} – целевая однородная матрица преобразования, вычисленная с помощью заданного положения и ориентации.

Таким образом, можно определить допущения, сделанные в процессе разработки алгоритма: предполагается, что объекты сцены имеют однородную текстуру и не деформируемы; одно из измерений каждого объекта сцены меньше, чем максимальная ширина открытия захватного устройств; все объекты находятся в рабочей области робота; аппроксимированная модель захватного устройства имеет максимальную ширину открытия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДА

Для моделирования взаимодействия манипуляционного робота с объектами сложной визуальной сцены была разработана виртуальная сцена в симуляторе CoppeliaSim. Ее исходный вид представлен на рис. 7. Сцена представляет собой модель

манипуляционного робота Kuka LBR iiwa 7 R800 с закрепленной на захватном устройстве RGBD-камерой разрешением 512×512 пикселей и модулем рассеянного освещения, предназначенным для придания RGB-изображению однородности путем устранения теней. Присутствует исходная зона для генерации сцены и целевая зона.

Для исследования работоспособности непрерывного генетического алгоритма при поиске целевого положения захватного устройства было проведено 5 экспериментальных запусков алгоритма на сгенерированной сцене. Процесс захвата одного объекта представлен на рис. 8. Графики сходимости непрерывного генетического алгоритма представлены на рис. 9. Как видно из графиков, во всех экспериментальных запусках алгоритм сошелся к удовлетворительному решению менее, чем за 31 эпоху. Начальная приспособленность лучшей особи в большинстве случаев была высокой, т.к. особи начальной популяции создавались в окрестности центральной точки сегментированного объекта, и ширина открытия захватного устройства у аппроксимированной модели была максимальной. Это увеличивало вероятность того, что часть облака точек объекта у созданной особи находилась в области детекции захвата, и захватное устройство не сталкивалось с объектом. Увеличение времени сходимости алгоритма связано с увеличением размеров целевого объекта, т.к. в этом случае генетическому алгоритму требуется большее количество итераций чтобы найти положение захватного устройства без столкновений с облаком точек объекта. Среднее время сходимости составило 1.9 секунды на компьютере, оснащенный процессором AMD Ryzen 5 3500U, графический процессор не задействовался.

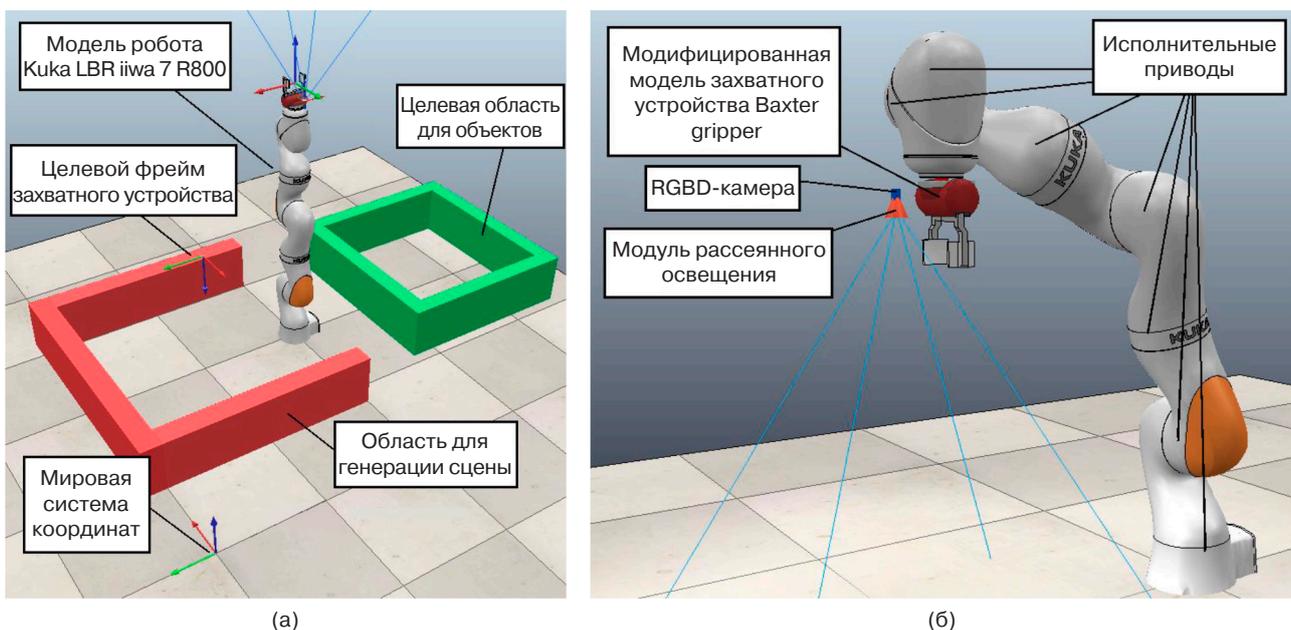


Рис. 7. Сцена для проведения моделирования: (а) состав сцены, (б) модель робота

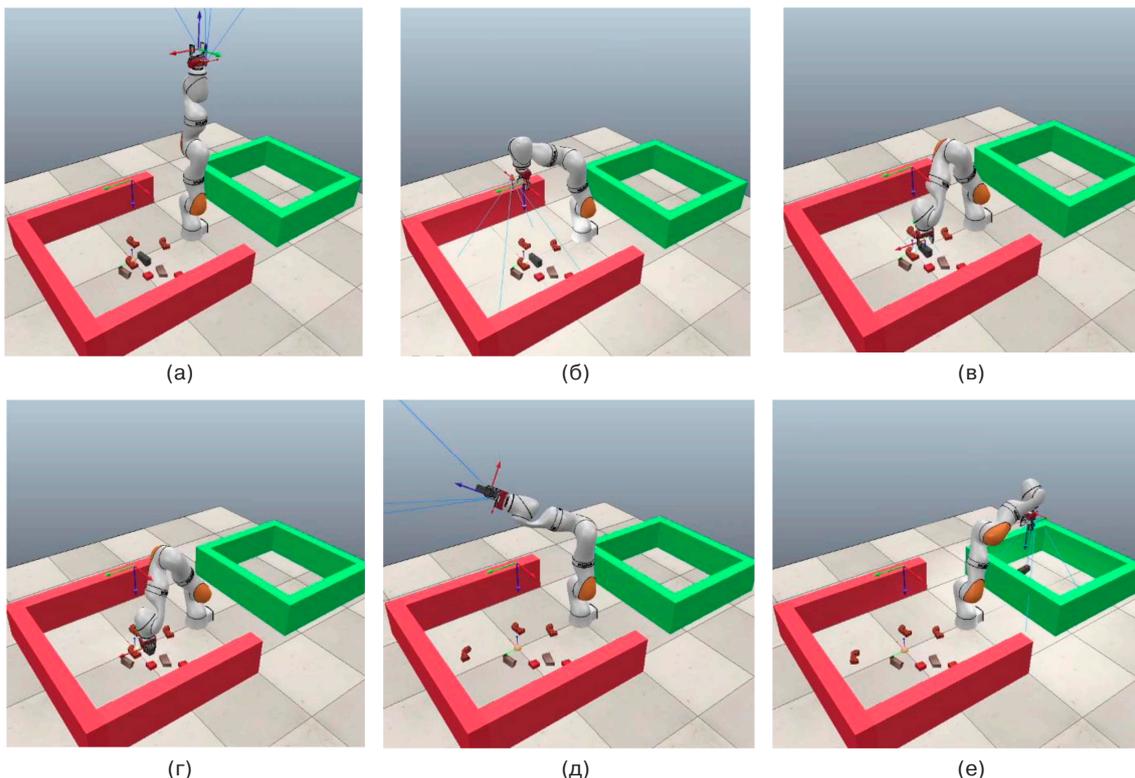


Рис. 8. Процесс захвата одного объекта: (а) конфигурация робота на старте программы, (б) конфигурация робота для получения RGB- и Depth-изображений сцены, (в) предзахватная конфигурация, (г) последняя промежуточная конфигурация, (д) перемещение в конечное положения, (е) конфигурация для сброса объекта в целевую область

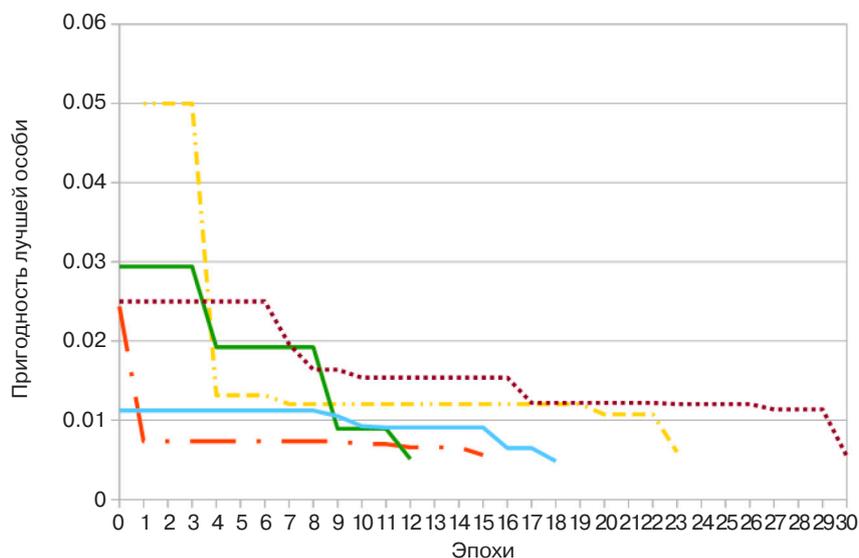


Рис. 9. Графики сходимости

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное программное обеспечение, реализующее анализ RGBD-изображения сцены, позволяет утверждать, что генетический алгоритм может быть применим в задаче поиска целевого положения захватного устройства. Достоинствами разработанного решения являются возможность

работы на основе облака точек, полученного с одного положения камеры, и функционал для устранения ненаблюдаемых областей. Большую роль играют генетические операторы и реализация функции приспособленности, т.к. время их вычисления напрямую влияет на среднюю скорость поиска решения и должно быть минимальным. Поэтому были приняты меры для повышения скорости работы алгоритма:

использование подмножества исходного облака точек и аппроксимация захватного устройства примитивной низкополигональной моделью.

Существуют возможности усовершенствования полученного решения. В частности, исследование [5] явно указывает, что камера, закрепленная на конечном звене робота, является преимуществом по сравнению с камерой, закрепленной над сценой, т.к. появляется возможность построения более детального облака точек сцены с нескольких позиций по заранее заданной траектории сканирования. Построение облака точек на основе RGBD-снимков с нескольких позиций камеры позволит строить его более информативно и по большей части не использовать триангуляцию Делоне для достраивания облака. Также в ряде работ [4, 15] используется параллельность действий, когда во время движения робота в некоторое промежуточное положение над сценой выполняются вычисления с целью поиска целевого положения захватного устройства. Наконец, представляет интерес исследование оптимальной схемы генетического алгоритма в терминах количества особей популяции, наиболее эффективного оператора скрещивания и мутации.

Новизна полученных результатов заключается в исследовании применимости непрерывного генетического алгоритма в задаче позиционирования рабочего органа манипуляционного робота. Результаты исследования могут быть использованы для решения задач позиционирования манипуляционного робота в среде с априорно неизвестными объектами. Примерами таких задач может служить уборка помещения, работа на складе, разбор завалов.

Вклад авторов

А.Д. Воронков – участвовал в разработке концепции применения непрерывного генетического алгоритма в задаче позиционирования захватного устройства манипулятора; разработал алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее непрерывный генетический алгоритм и комплексный алгоритм анализа сцены; участвовал в составлении текста и внесении правок в статью.

С.А.К. Диане – участвовал в разработке концепции применения непрерывного генетического алгоритма; предложил сценарий финального эксперимента; осуществлял научное руководство; участвовал в составлении текста и внесении правок в статью.

Authors' contributions

A.D. Voronkov participated in the development of the concept of using a continuous genetic algorithm in the task of positioning the gripper of the manipulator; developed algorithmic and software implementing a continuous genetic algorithm and a complex algorithm for scene analysis; participated in the drafting of the text and making edits to the article.

S.A.K. Diane participated in the development of the concept of the application of the continuous genetic algorithm; proposed the scenario of the final experiment; provided scientific guidance; participated in the drafting of the text and making edits to the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Lei Q., Wisse M. Fast grasping of unknown objects using cylinder searching on a single point cloud. In: *Ninth International Conference on Machine Vision (ICMV 2016)*. 2016. V. 10341. <https://doi.org/10.1117/12.2268422>
2. Sundermeyer M., Mousavian A., Triebel R., Fox D. *Contact-GraspNet: efficient 6-DoF grasp generation in cluttered scenes*. arXiv [Preprint]. 2021. 7 p. Available from URL: <https://arxiv.org/abs/2103.14127>
3. Breyer M., Chung J., Ott L., Siegwart R., Nieto J. Volumetric grasping network: Real-time 6 DOF grasp detection in clutter. In: *4th Conference on Robot Learning (CoRL 2020)*. P. 1602–1611. Available from URL: <https://proceedings.mlr.press/v155/breyer21a/breyer21a.pdf>
4. Lippiello V., Ruggiero F., Siciliano B., Luigi V. Visual grasp planning for unknown objects using a multifingered robotic hand. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2013;18(3):1050–1059. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2195500>
5. Lei Q., Meijer J., Wisse M. A survey of unknown object grasping and our fast grasping algorithm-C shape grasping. In: *2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. P. 150–157. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2017.7942677>
6. Back S., Lee J., Kim T., Noh S., Kang R., Bak S., Lee K. *Unseen object amodal instance segmentation via hierarchical occlusion modeling*. arXiv [Preprint]. 2021. 8 p. Available from URL: <https://arxiv.org/abs/2109.11103>
7. Abhijit M., Federico T., Perez-Gracia A. Grasping unknown objects in clutter by superquadric representation. In: *2018 Second IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*. P. 292–299. <https://doi.org/10.1109/IRC.2018.00062>
8. Miller A., Knoop S., Christensen H., Allen P. Automatic grasp planning using shape primitives. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. P. 1824–1829. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241860>
9. Firman M., Aodha O., Julier S., Gabriel J. Structured prediction of unobserved voxels from a single depth image. In: *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. P. 5431–5440. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.586>
10. Гридин В.Н., Солодовников В.И. Непрерывный генетический алгоритм предобработки данных осуществляющий поиск коэффициентов аппроксимирующей функции. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2018;21:302–306. [Gridin V.N., Solodovnikov V.I. A continuous genetic data preprocessing algorithm searching coefficients of the approximating function. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New Information Technologies in Automated Systems*. 2018;21:302–306 (in Russ.).]
11. Rossi C., Abderrahim M., Diaz J. EvoPose: A model-based pose estimation algorithm with correspondences determination. *2005 IEEE International Conference Mechatronics and Automation*. V. 3. P. 1551–1556. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2005.1626786>

12. Jabalameli A., Behal A. From single 2D depth image to gripper 6D pose estimation: A fast and robust algorithm for grabbing objects in cluttered scenes. *Robotics*. 2019;8(3):63. <https://doi.org/10.3390/robotics8030063>
13. Xiang Y., Xie C., Mousavian A., Fox D. Learning RGB-D feature embeddings for unseen object instance segmentation. In: *4th Conference on Robot Learning (CoRL 2020)*. P. 461–470. Available from URL: <https://proceedings.mlr.press/v155/xiang21a/xiang21a.pdf>
14. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. 2015. P. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
15. Dune C., Marchand E., Collewet C., Leroux C. Active rough shape estimation of unknown objects. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. P. 3622–3627. <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4651005>

Об авторах

Воронков Андрей Дадашевич, аспирант кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: a.voronkov.rtu@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4688-9346>

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). Scopus Author ID 57188548666, ResearcherID T-5560-2017, <https://orcid.org/0000-0002-8690-6422>

About the authors

Andrey D. Voronkov, Postgraduate Student, Department of Control Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: a.voronkov.rtu@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4688-9346>

Sekou A.K. Diane, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Control Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Scopus Author ID 57188548666, ResearcherID T-5560-2017, <https://orcid.org/0000-0002-8690-6422>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 681.883.45
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-31-40>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Пропускная способность гидроакустического канала связи

В.Е. Денисов [®]

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

Резюме

Цели. Пропускная способность является важной характеристикой любого канала связи, так как определяет предельную скорость передачи информации в нем. Основная цель работы – определение пропускной способности гидроакустического канала связи при ограничении на среднюю интенсивность передаваемого сигнала. Дополнительной задачей являлось определение оптимального спектра передаваемого сигнала и расчет граничных частот этого спектра. Была рассмотрена модель однолучевого канала, характерная для глубокого моря, когда приемник или передатчик расположены на достаточной глубине.

Методы. Используются положения прикладной гидроакустики, теории случайных процессов и теории информации.

Результаты. Получено выражение для коэффициента передачи гидроакустического канала связи и новое выражение для спектрального уровня шумов моря, обусловленных волнением поверхности моря. На основе кусочно-линейной аппроксимации кривых спектральных уровней шумов турбулентности, судоходства, волнения моря и теплового шума моря определена спектральная плотность интенсивности шума моря. Получены зависимости пропускной способности гидроакустического канала от дальности связи, интенсивности передаваемого сигнала и состояния поверхности моря. Определены нижняя и верхняя частоты оптимального спектра передаваемого сигнала и оптимальный спектр. Исследована зависимость коэффициента использования полосы частот от интенсивности входного сигнала для разных значений дальности связи.

Выводы. Использование коэффициента затухания Франсуа – Гаррисона позволило связать пропускную способность канала с параметрами морской среды: температурой, соленостью, значением водородного показателя в исследуемом районе. При заданной интенсивности входного сигнала пропускная способность существенно уменьшается с ростом дальности и усилением волнения моря. Показано, что с ростом расстояния ширина оптимального спектра уменьшается. Отмечается значительное влияние шума от волнения моря на форму оптимального спектра и значения его граничных частот. Было установлено, что возможны случаи увеличения коэффициента использования полосы частот ростом дальности при заданной интенсивности входного сигнала.

Ключевые слова: гидроакустический канал связи, шумы моря, спектральная интенсивность шумов моря, интенсивность сигнала, пропускная способность, оптимальный спектр, коэффициент использования полосы частот канала

• Поступила: 28.04.2022 • Доработана: 21.06.2022 • Принята к опубликованию: 10.11.2022

Для цитирования: Денисов В.Е. Пропускная способность гидроакустического канала связи. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):31–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-31-40>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Hydroacoustic communication channel capacity

Valery E. Denisov [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Capacity, describing the maximum rate of information transmission, is an important characteristic of any communication channel. The main purpose of this work is to determine the capacity of a hydroacoustic communication channel with constrained average intensity of the transmitted signal. An additional aim consists in finding the optimal spectrum of a transmitted signal and calculate its boundary frequencies. A model of a single-path channel was considered, which is characteristic of the deep sea with the receiver or transmitter placed at a sufficient depth.

Methods. Concepts of applied hydroacoustics, the theory of random processes, and information theory were used.

Results. An expression for gain in a hydroacoustic communication channel has been obtained. A novel expression derived for the spectral level of sea noise caused by sea surface waves is based on piecewise linear approximation of the curves of the spectral levels of noise obtained from four sources: turbulence, shipping, sea waves, and the thermal noise of the sea. Dependencies of the hydroacoustic channel capacity on communication distance, intensity of the transmitted signal, and sea state, are characterized. The definition of the optimal spectrum itself is determined along with the lower and upper boundary frequencies of the optimal spectrum of the transmitted signal. The dependence of the bandwidth usage on the intensity of the input signal at various communication distances has been investigated.

Conclusions. On the basis of the Francois–Garrison attenuation coefficient, channel capacity was correlated with the parameters of the marine environment: temperature, salinity, and pH in the study area. At a given intensity of the input signal, channel capacity was shown to decrease significantly with increasing distance and sea wave intensity. It is also shown that the width of the optimal spectrum decreases with increasing distance. Sea wave noise was noted to affect significantly the shape of the optimal spectrum and its boundary frequencies. The possibility of cases where bandwidth usage increases with increasing distance at a given input signal intensity cannot be ruled out.

Keywords: hydroacoustic communication channel, sea noise, spectral intensity of sea noise, signal intensity, bandwidth, optimal spectrum, channel bandwidth utilization

• Submitted: 28.04.2022 • Revised: 21.06.2022 • Accepted: 10.11.2022

For citation: Denisov V.E. Hydroacoustic communication channel capacity. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):31–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-31-40>

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

При разработке цифровых гидроакустических систем связи особый интерес представляет пропускная способность гидроакустического канала связи (ГАКС), которая определяет максимальную скорость передачи информации при заданных шумах моря и ограничениях на передаваемый сигнал. Зная пропускную способность ГАКС, всегда можно оценить, насколько эффективна разрабатываемая система связи. Оценке пропускной способности ГАКС для различных условий посвящены труды как отечественных, так и зарубежных авторов.

Следует отметить работы [1–4], в которых среди прочих рассматриваются и вопросы определения пропускной способности. Наиболее близка к настоящей статье работа [1]. В ней определена пропускная способность однолучевого ГАКС с учетом частотной зависимости коэффициента затухания и шумов моря, использован коэффициент затухания Урика [5], который не зависит от параметров морской среды, и применен не сферический закон расширения фронта волны, как должно быть в случае точечного источника. Использован так называемый закон практического распространения, когда интенсивность звука обратно пропорциональна

расстоянию в степени 1.5. Однако, как отмечается в [5], при малой осведомленности о свойствах морской среды рекомендуется применять сферический закон. При расчете пропускной способности ГАКС в [1] использовалась специальная аппроксимирующая формула для спектральной плотности шумов из работы [6], которая дает несколько завышенные значения по сравнению с кривыми Урика [5]. В [1] рассматривался только случай спокойного моря. В настоящей статье пропускная способность рассчитывается для однолучевого ГАКС с учетом частотной зависимости коэффициента затухания, который описывается формулой Франсуа – Гаррисона. Данная формула считается наиболее точной на настоящее время и содержит параметры морской среды. Кроме того, используется простая и наглядная кусочно-линейная аппроксимация спектральных уровней шумов моря. Дополнительно исследуется зависимость пропускной способности от степени волнения поверхности моря. Из работ последних лет следует отметить работы [7–9], посвященные анализу различных гидроакустических систем связи и оценке скорости передачи информации.

1. КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА

Согласно работам [10–12], при излучении гармонического сигнала мгновенное значение давления $p(t, R)$ в безграничной однородной морской среде с поглощением на расстоянии R от точечного источника может быть представлено в виде:

$$p(t, R) = \sqrt{2}P(R) \cos \left[\omega \left(t - \frac{R}{c} \right) \right], \quad (1)$$

где

$$P(R) = P_0 \frac{R_0}{R} \exp \left[-\alpha_e (R - R_0) \right] \quad (2)$$

– среднеквадратическое значение давления, Па; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота колебаний источника, рад/с; $c = 1500$ м/с – скорость звука в морской воде; R – расстояние, м; α_e – коэффициент затухания морской среды, Нп/м; P_0 – среднеквадратическое значение давления на опорном расстоянии R_0 (обычно $R_0 = 1$ м).

Из (1), (2) можно найти комплексный коэффициент передачи ГАКС:

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{R_0}{R} \exp \left[-\alpha_e (R - R_0) - j\omega \frac{R}{c} \right] = \\ &= H(\omega) \exp [j\vartheta(\omega)], \end{aligned}$$

где $H(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и $\vartheta(\omega)$ – фазо-частотная характеристика (ФЧХ), которые определяются по формулам:

$$H(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{R_0}{R} \exp \left[-\alpha_e (R - R_0) \right],$$

$$\vartheta(\omega) = -\omega R/c.$$

На практике обычно коэффициент затухания α выражают в дБ/км, а расстояние R – в километрах. В этом случае и при $R_0 = 1$ м АЧХ примет вид:

$$H(f) = \frac{1}{R_{\text{км}} \cdot 10^3} \exp(-0.115 \alpha R). \quad (3)$$

Как следует из выражения (3), при заданной дальности связи R свойства АЧХ полностью определяются частотной характеристикой коэффициента затухания. Поэтому остановимся подробнее на коэффициенте затухания морской воды. Для расчета величины α приходится использовать различные полуэмпирические формулы, полученные на основе теоретических и экспериментальных данных. Одной из таких формул для расчета величины α является формула Франсуа – Гаррисона [13, 14], полученная на основе анализа и обобщения известных измерений в океане, включая и измерения в Арктике. Согласно работам [13, 14], коэффициент затухания звука α в диапазоне частот от 200 Гц до 1 МГц и до глубины 5 км можно представить в виде:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3, \text{ дБ/км},$$

где α_1 – коэффициент поглощения, обусловленный ионной релаксацией соединений бора (боратов); α_2 – коэффициент поглощения, обусловленный ионной релаксацией сульфата магния (MgSO_4); α_3 – коэффициент поглощения, обусловленный вязкостью пресной воды и структурной релаксацией молекул пресной воды. Эти величины определяются по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{A_1 P_1 f_1^2}{f_1^2 + f^2}, \quad \alpha_2 = \frac{A_2 P_2 f_2^2}{f_2^2 + f^2}, \quad \alpha_3 = A_3 P_3 f^2.$$

В приведенных выше выражениях частота f берется в кГц; а величины $A_i, P_i; i = 1, 2, 3; f_1, f_2$ имеют вид

$$A_1 = \frac{8.86}{c} \cdot 10^{0.78\text{pH} - 5}, \text{ (дБ/км)} \cdot \text{кГц}^{-1};$$

$$P_1 = 1, f_1 = 2.8(S/35)^{0.5} \cdot 10^{4 - 1245/\theta}, \text{ кГц};$$

$$A_2 = 21.44 \frac{S}{c} (1 + 0.025T), \text{ (дБ/км)} \cdot \text{кГц}^{-1};$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \cdot 10^{-4}z + 6.2 \cdot 10^{-9}z^2;$$

$$f_2 = \frac{8.17 \cdot 10^8 - 1990/\theta}{1 + 0.0018(S - 35)}, \text{ кГц};$$

$$P_3 = 1 - 3.83 \cdot 10^{-5}z + 4.9 \cdot 10^{-10}z^2;$$

$$A_3 = \begin{cases} 4.937 \cdot 10^{-4} - 2.59 \cdot 10^{-5}T + \\ + 9.11 \cdot 10^{-7}T^2 - 1.50 \cdot 10^{-8}T^3, \\ T \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}, \\ 3.964 \cdot 10^{-4} - 1.146 \cdot 10^{-5}T + \\ + 1.45 \cdot 10^{-7}T^2 - 6.50 \cdot 10^{-10}T^3, \\ T > 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (\text{дБ/км}) \cdot \text{кГц}^{-2},$$

где c – скорость звука в морской воде (м/с), примерно равная

$$c \approx 1412 + 3.21T + 1.19S + 0.0167z,$$

T – температура воды, $^\circ\text{C}$; $\Theta = 273 + T$ – температура воды в градусах Кельвина, K ; S – соленость, $\%$; z – глубина, м ; pH – значение водородного показателя в районе измерения α . Диапазон изменений pH в Мировом океане (7.5–8.4) и для заданных районов указывается в работе¹.

На частотах ниже 200 Гц уравнение Франсуа – Гаррисона может оказаться несправедливым. Результаты измерений затухания на частотах ниже 200 Гц были проанализированы в работе [15]. В данной работе утверждается, что причиной затухания звука на этих частотах является рассеяние звука на неоднородностях морской среды. Коэффициент затухания α_4 в этом диапазоне частот не зависит от частоты, но изменяется в зависимости от широты от 0.004 дБ/км в полярных водах до 0.0002 дБ/км в тропиках. В работе [1] использовалась величина $\alpha_4 = 0.003$ дБ/км. Уравнение Франсуа – Гаррисона применимо ко всем условиям океана в диапазоне частот от 200 Гц до 1 МГц. Это уравнение позволяет рассчитать коэффициент затухания с точностью до 10%. Для получения выражения коэффициента затухания звука в диапазоне частот от 10 Гц до 1 МГц необходимо к коэффициенту затухания Франсуа – Гаррисона прибавить коэффициент затухания α_4 . Далее будем полагать, что $\alpha_4 = 0.003$ дБ/км. Следовательно, коэффициент затухания звука на частоте f будет иметь вид: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$.

Для расчета коэффициента затухания по формуле Франсуа – Гаррисона необходимо знать температуру

воды T , соленость S , величину pH , глубину z вдоль всей траектории распространения звука.

В работе Р.Дж. Урика [5] приведена более простая формула для коэффициента затухания звука при температуре воды $T = 4$ $^\circ\text{C}$, которая характерна для больших глубин в глубоком море:

$$\alpha_y = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3 \cdot 10^{-4}f^2,$$

где α_y – коэффициент затухания, дБ/км; f – частота, кГц.

Формула Урика также основана на результатах экспериментальных исследований и ее составляющие подобны составляющим формулы Франсуа – Гаррисона. Однако в работе [5] не представлены сведения о точности аппроксимации этой формулой известных выражений для коэффициента затухания. И, кроме того, не указан частотный диапазон, для которого эта формула справедлива. Интересно сравнить значения коэффициентов затухания Франсуа – Гаррисона и Урика. На рис. 1а приведена зависимость коэффициента затухания от частоты, рассчитанная по формуле Франсуа – Гаррисона. Так как в логарифмическом масштабе кривая Урика мало отличается от кривой Франсуа – Гаррисона, то были построены графики коэффициентов затухания Франсуа – Гаррисона и Урика и их разности в линейном масштабе, приведенные на рис. 1б.

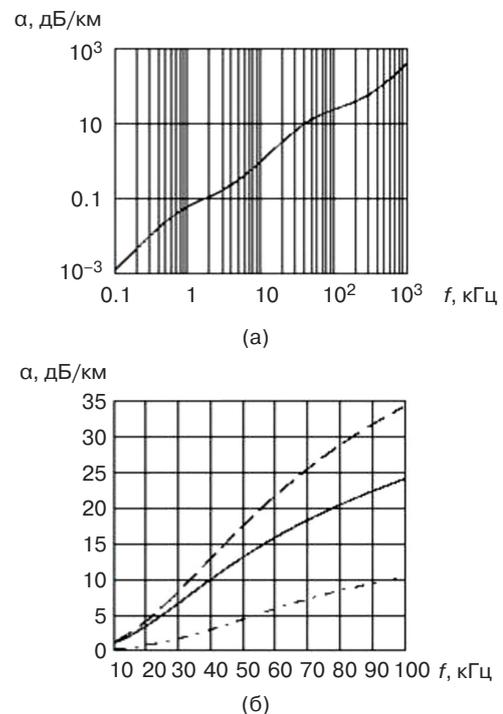


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания от частоты $\alpha(f)$: (а) для диапазона частот 0.1–10³ кГц (формула Франсуа – Гаррисона); (б) для диапазона частот 10–100 кГц: сплошная кривая – формула Франсуа – Гаррисона, штриховая кривая – формула Урика, штрих-пунктирная кривая – разность $\alpha_y(f) - \alpha(f)$

¹ Атлас океанов: в 3 т. Т. 1. Тихий океан. 323 с. Т. 2. Атлантический и Индийский океаны. 334 с. Т. 3. Северный Ледовитый океан. 188 с. Л.: Гл. упр. МО СССР; 1974–1980. [Atlas oceanov (Atlas of the Oceans): in 3 v. V. 1. Tikhii okean (Pacific Ocean). 323 p. V. 2. Atlanticheskii i Indiiiskii okeany (Atlantic and Indian Oceans). 334 p. V. 3. Severnyi Ledovityi okean (Arctic Ocean). Leningrad: MO USSR; 1974–1980. 188 p. (in Russ.)]

Как видно из рис. 1б, расхождения коэффициентов затухания на высоких частотах могут быть существенными. Относительная погрешность аппроксимации $\delta_\alpha = (\alpha - \alpha_y)/\alpha$ формулы Франсуа – Гаррисона формулой Урика в диапазоне частот от 0.1 кГц до 1 МГц для температуры $T = 4^\circ\text{C}$ и солености морской воды $S = 35\%$ равна $\delta_\alpha = -0.26$ при $z = 100$ м и $\delta_\alpha = -0.42$ при $z = 1000$ м. При $S = 30\%$ величина $|\delta_\alpha|$ увеличивается в 1.5 раза. Такие значения погрешности вряд ли можно считать допустимыми для данных условий. Поэтому для расчета пропускной способности ГАКС необходимо использовать формулу Франсуа – Гаррисона.

Далее будем измерять частоту f в герцах. Для этого следует в формулы для коэффициентов A_1 и A_2 добавить множитель 10^{-3} , для A_3 – множитель 10^{-6} , а в формулы для частот f_1 и f_2 – множитель 10^3 .

2. ШУМЫ МОРСКОЙ СРЕДЫ

В работе в качестве помех рассматриваются шумы, характерные для глубокого моря. Основными их источниками в данном случае являются океаническая турбулентность, дальнейшее судоходство, волнение поверхности моря и тепловой шум, генерируемый при тепловом движении молекул воды [5]. На коротких интервалах времени и умеренных глубинах окружающий шум моря можно описать стационарным гауссовским процессом и характеризовать спектральной плотностью интенсивности. Вследствие изменчивости источников окружающий шум характеризуют усредненной спектральной плотностью интенсивности. Графики усредненных спектральных уровней интенсивности шума турбулентности, шума судоходства, шума от волнения поверхности моря и теплового шума приведены в [5] на рис. 7.5 для диапазона частот от 1 до 10^5 Гц. С помощью кусочно-линейной аппроксимации этих кривых были получены следующие аналитические выражения для спектральных уровней шумов.

Спектральный уровень шума турбулентности $N_{TU}(f)$, дБ относительно 1 мкПа:

$$N_{TU}(f) = (107 - 30\lg f)[1(f-1) - 1(f-50)].$$

Спектральный уровень шума судоходства $N_C(f)$, дБ относительно 1 мкПа:

$$N_C(f, k) = (44 + 9k + 20\lg f)[1(f-1) - 1(f-10)] + \\ + (64 + 9k)[1(f-10) - 1(f-100)] + \\ + (144 + 9k - 40\lg f)1(f-100),$$

где f – частота, Гц; $1(f)$ – единичная ступенчатая функция; $k = 0, 1, 2$ соответственно для случаев редкого, умеренного и интенсивного судоходства.

Спектральный уровень шума от волнения моря $N_B(f)$, дБ относительно 1 мкПа:

$$N_B(f, b) = (N_1 + 20\lg f - 46)[1(f-1) - 1(f-200)] + \\ + N_1[1(f-200) - 1(f-1000)] + \\ + (N_1 + 60 - 20\lg f)1(f-1000), \quad (4) \\ N_1 = N_1(b) = N_B(f, b)|_{f=1000 \text{ Гц}} = \\ = 44.9 + 13.4\ln(1 + b).$$

В последних формулах b – это величина, характеризующая состояние поверхности моря, измеряемая в баллах. Значения b заключены в интервале $[0; 6]$. Формула (4) получена нами с помощью аппроксимации по методу наименьших квадратов последовательности значений $N_B(1000, b)$, $b = 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6$ семейства кривых $N_B(f, b)$, представленных в крупном масштабе в работе [16]. Относительная ошибка аппроксимации не превосходит 4%.

Спектральный уровень теплового шума $N_{TE}(f)$, дБ относительно 1 мкПа:

$$N_{TE}(f) = (-75 + 20\lg f)1(f-10000). \quad (5)$$

После определения спектральных уровней шумов можно определить их спектральные плотности интенсивности.

Шум турбулентности:

$$J_{TU}(f) = J_0 10^{0.1 N_{TU}(f)} = \\ = J_0 10^{10.7} f^{-3} [1(f-1) - 1(f-50)], \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц}),$$

где $J_0 = 0.667 \cdot 10^{-22}$ Вт/(см²·Гц) – опорное значение спектральной интенсивности, соответствующее среднеквадратическому значению давления 1 мкПа.

Шум судоходства:

$$J_C(f, k) = J_0 10^{0.1 N_C(f)} = \\ = J_0 10^{4.4 + 0.9k} f^2 [1(f-1) - 1(f-10)] + \\ + J_0 10^{6.4 + 0.9k} [1(f-10) - 1(f-100)] + \\ + J_0 10^{14.4 + 0.9k} f^{-4} 1(f-100), \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц}).$$

Шум от волнения поверхности моря:

$$J_B(f, b) = J_0 10^{0.1 N_B(f, b)} = \\ = J_0 10^{0.1 N_1 - 4.6} f^2 [1(f-1) - 1(f-200)] + \\ + J_0 10^{0.1 N_1} [1(f-200) - 1(f-1000)] + \\ + J_0 10^{0.1 N_1 + 6} f^{-2} 1(f-1000), \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц}).$$

Тепловой шум:

$$J_{TE}(f) = J_0 10^{0.1 N_{TE}(f)} = J_0 10^{-7.5} f^2 1(f - 10000), \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц}). \tag{6}$$

Выражения (5), (6) справедливы для температуры воды $T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$. Для других температур воды спектральная плотность теплового шума рассчитывается по формуле

$$J_{TE}(f) = 4\pi k_B \Theta c^{-2} f^2 1(f - 10000), \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц}),$$

где $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$ – постоянная Больцмана; $c = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ см}/\text{с}$ – средняя скорость звука в морской воде.

Графики спектральной плотности интенсивности суммарного шума морской среды

$$J_{\Sigma}(f) = J_{TU}(f) + J_C(f) + J_B(f) + J_{TE}(f)$$

представлены на рис. 2 для случая умеренного судорохода при разных состояниях поверхности моря. Сплошная линия соответствует случаю спокойного моря, когда $b = 0$ баллов; пунктирная линия: $b = 1$; штриховая линия: $b = 3$; штрих-пунктирная линия: $b = 6$.

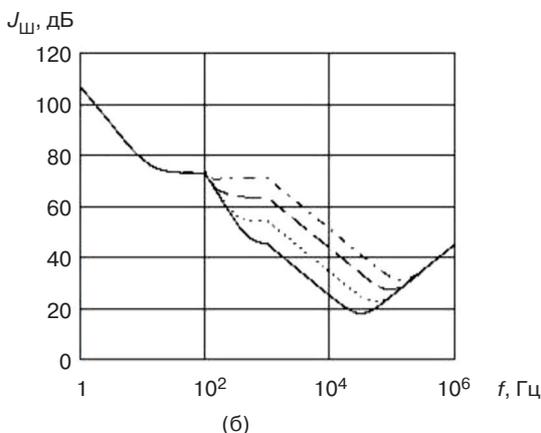
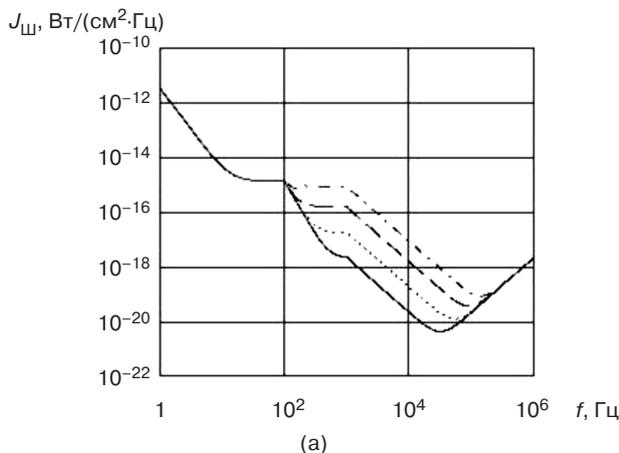


Рис. 2. Спектральная плотность интенсивности суммарного шума морской среды: (а) в физических единицах; (б) в децибелах относительно $J_0 = 0.667 \cdot 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{Гц})$

3. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Анализируемый ГАКС можно представить в виде фильтра нижних частот с комплексной частотной характеристикой $H(j\omega)$, на входе которого действует сигнал (давление) $p_1(t)$. Под его воздействием на выходе появляется сигнал $p_2(t)$, который суммируется с небелым гауссовским шумом моря $p_{\Sigma}(t)$. Таким образом, процесс на выходе ГАКС будет иметь вид: $p(t) = p_2(t) + p_{\Sigma}(t)$. Будем считать сигнал $p_1(t)$ реализацией некоторого стационарного эргодического случайного процесса с ограниченной интенсивностью. Пусть интенсивность входного сигнала на расстоянии 1 м от источника равна I_S . Определим пропускную способность ГАКС при ограничении на полосу частот (за счет фильтра) и на интенсивность сигнала. Для канала, подобного ГАКС, при ограничениях по частоте и средней мощности в теории информации определена его пропускная способность [17]. В этой работе показано, что пропускная способность достигается при входном сигнале в виде стационарного гауссовского процесса. В наших терминах формула для пропускной способности ГАКС примет вид:

$$C = \int_{f_H(B)}^{f_B(B)} \log \left[\frac{H^2(f) B}{J_{\Sigma}(f)} \right] df, \tag{7}$$

где $f_H(B), f_B(B)$ – нижняя и верхняя частоты полосы частот, для которой

$$\frac{J_{\Sigma}(f)}{H^2(f)} \leq B \tag{8}$$

и B является решением уравнения:

$$\int_{f_H(B)}^{f_B(B)} \left[B - \frac{J_{\Sigma}(f)}{H^2(f)} \right] df = I_S, \tag{9}$$

$H(f) = |H(j2\pi f)|$ – АЧХ ГАКС.

Спектральная плотность интенсивности $J_S(f)$ случайного входного сигнала, при которой достигается пропускная способность канала, определяется по формуле

$$J_S(f) = \begin{cases} B - J_{\Sigma}(f)/H^2(f), & f \in [f_H(B), f_B(B)], \\ 0, & f \notin [f_H(B), f_B(B)]. \end{cases} \tag{10}$$

Таким образом, пропускная способность ГАКС определяется двумя параметрическими равенствами (7) и (9). Параметром является величина B , которая должна удовлетворять неравенству (8). В результате

совместного решения уравнений (7) и (9) при ограничении (8) можно определить величины C и B , а затем по формуле (10) найти спектр оптимального входного сигнала. Решение данной задачи возможно только численными методами с использованием компьютера.

Результаты расчета зависимости пропускной способности $C(R)$ от дальности связи при трех значениях интенсивности входного сигнала приведены на рис. 3а для случая спокойного моря ($b = 0$) и умеренного судоходства ($k = 1$).

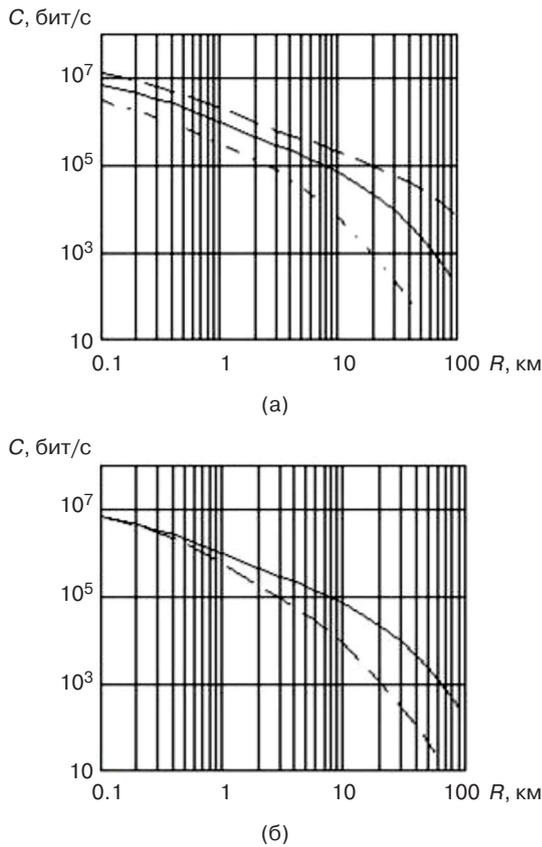


Рис. 3. Зависимость пропускной способности ГАКС от дальности связи ($k = 1$):
 (а) $b = 0$ (штрих-пунктирная линия: $I_S = 10^{-7}$ Вт/см², сплошная линия: $I_S = 10^{-5}$ Вт/см², штриховая линия: $I_S = 10^{-3}$ Вт/см²);
 (б) $I_S = 10^{-5}$ Вт/см² (штриховая линия: $b = 3$, сплошная линия: $b = 0$)

Как видно из рисунка, пропускная способность уменьшается с ростом дальности связи и тем быстрее, чем меньше интенсивность входного сигнала. По рис. 3а можно оценить порядок величины пропускной способности для указанных условий связи.

На рис. 3б представлены зависимости $C(R)$ для $I_S = 10^{-5}$ Вт/см² при разных b . Видно, что шум, вызванный волнением поверхности моря, может существенно уменьшить пропускную способность. Например, при спокойном море ($b = 0$)

и $R = 10$ км величина $C = 7 \cdot 10^4$ бит/с, а если $b = 3$, то $C = 8 \cdot 10^3$ бит/с.

Как показывают расчеты, при фиксированной интенсивности входного сигнала с ростом дальности R ширина спектра оптимального сигнала уменьшается за счет увеличения нижней граничной частоты спектра f_H и уменьшения верхней f_B . Зависимости этих частот от дальности при $k = 1$, $b = 0$ приведены на рис. 4.

На рис. 5 для примера приведены два спектра оптимального сигнала при фиксированной интенсивности входного сигнала, $k = 1$, $b = 0$, $I_S = 10^{-5}$ Вт/см² и двух значениях дальности R .

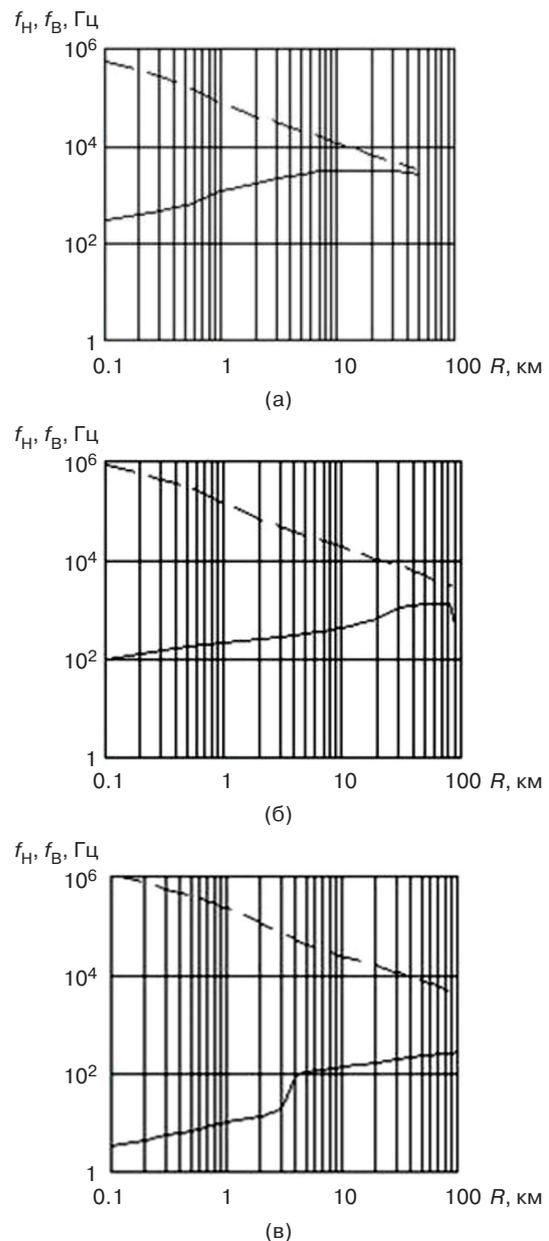


Рис. 4. Зависимость граничных частот оптимального спектра излучаемого сигнала от дальности связи: (а) $I_S = 10^{-7}$ Вт/см²; (б) $I_S = 10^{-5}$ Вт/см²; (в) $I_S = 10^{-3}$. Сплошная линия – f_H , штриховая линия – f_B

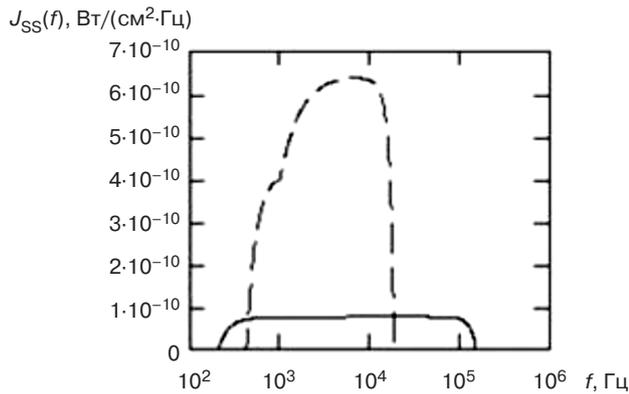


Рис. 5. Оптимальные спектры излучаемого сигнала для разной дальности связи. Сплошная линия: $R = 1$ км, штриховая линия: $R = 10$ км

Как видно из рис. 5, при увеличении дальности связи и постоянной интенсивности входного сигнала оптимальный спектр сужается, но его значения увеличиваются. Спектр оптимального входного сигнала всегда ограничен по частоте.

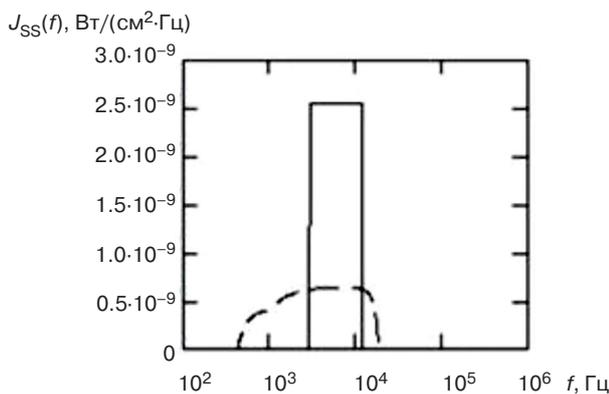


Рис. 6. Оптимальные спектры излучаемого сигнала при разном волнении моря. Сплошная линия: $b = 3$, штриховая линия: $b = 0$

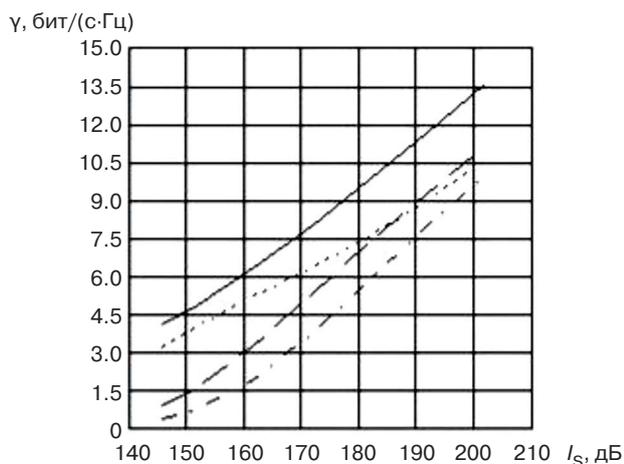


Рис. 7. Зависимость коэффициента использования полосы частот от интенсивности передаваемого сигнала при разных значениях дальности. Сплошная линия: $R = 0.2$ км; пунктирная линия: $R = 1$ км; штриховая линия: $R = 5$ км; штрих-пунктирная линия: $R = 10$ км

На рис. 6 представлены оптимальные спектры для $k = 1$, $I_S = 10^{-5}$ Вт/см², $R = 10$ км при отсутствии волнения моря ($b = 0$) и при волнении моря $b = 3$. Как следует из рисунка, шум от волнения моря приводит к уменьшению ширины оптимального спектра, изменению формы и росту его интенсивности.

Как следует из анализа, ГАКС представляет собой канал с ограниченной полосой частот. Поэтому с практической точки зрения большой интерес представляет собой оценка эффективности использования полосы частот ГАКС. На рис. 7 приведены результаты расчетов коэффициента использования полосы частот $\gamma = C/(f_B - f_H)$ в зависимости от интенсивности входного сигнала (в децибелах относительно значения 1 мкПа) для четырех значений дальности связи. Из рисунка видно, что независимо от дальности величина γ растет с увеличением интенсивности входного сигнала. Интересной особенностью этих зависимостей является то, что в данном случае кривые, соответствующие $R = 1$ км и $R = 5$ км, пересекаются при некотором значении интенсивности (в окрестности 190 дБ). Следовательно, возможны случаи, когда при большей дальности коэффициент использования полосы частот будет больше, чем при меньшей дальности при одинаковой интенсивности входного сигнала. По данным рис. 7 можно оценить порядок величины коэффициента γ для указанных условий связи. Например, максимальное значение γ равно приблизительно 13 бит/(с·Гц) и имеет место при $I_S = 200$ дБ и $R = 0.2$ км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью работы являлось определение пропускной способности гидроакустического канала связи при ограничении на среднюю интенсивность передаваемого сигнала. Рассматривалась модель одностороннего канала, характерная для глубокого моря, когда приемник или передатчик расположены на достаточной глубине. В этом случае распространение звука на средние дальности происходит по «устойчивым» траекториям, которые не подвержены влиянию поверхности моря и влиянию дна. Такие траектории имеют место для вертикальных и мало отличающихся ($10^\circ - 15^\circ$) от них каналов.

Сравнение численных значений коэффициентов затухания Франсуа – Гаррисона и Урика показало, что коэффициент затухания Урика может заметно отличаться от коэффициента затухания Франсуа – Гаррисона. Кроме того, коэффициент затухания Франсуа – Гаррисона учитывает зависимость затухания звука от параметров морской воды. Поэтому в работе был использован коэффициент затухания Франсуа – Гаррисона. На этой основе был получен комплексный коэффициент передачи ГАКС, АЧХ и ФЧХ.

Получено новое выражение для спектрального уровня шумов моря, обусловленных волнением поверхности моря. Осуществлена кусочно-линейная аппроксимация кривых спектральных уровней шумов турбулентности, судоходства и теплового шума моря, приведенных в работе Р.Дж. Урика. На этой основе получено выражение для спектральной плотности интенсивности шума моря, которое было использовано при вычислении пропускной способности канала. Использование коэффициента затухания Франсуа – Гаррисона позволило связать пропускную способность ГАКС с параметрами морской среды: температурой, соленостью, значением водородного показателя в исследуемом районе.

Расчеты пропускной способности были проведены для случаев умеренного судоходства, спокойного моря и моря с волнением 3 балла. Было установлено, что шумы моря от волнения поверхности моря существенно уменьшают пропускную способность ГАКС.

Рассчитаны зависимости пропускной способности от дальности связи и интенсивности передаваемого сигнала. Показано, что при заданной интенсивности входного сигнала с ростом дальности существенно уменьшается пропускная способность.

Определены нижняя и верхняя частоты оптимального спектра входного сигнала и сам оптимальный спектр. Показано, что с ростом дальности связи ширина оптимального спектра уменьшается. Отмечается значительное влияние шума от волнения моря на форму оптимального спектра и значения его граничных частот.

Определена зависимость коэффициента использования полосы частот от интенсивности входного сигнала для разных значений дальности связи. Установлено, что возможны случаи, когда коэффициент использования полосы частот увеличивается с ростом дальности при заданной интенсивности входного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stojanovic M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. 2007;11(4):34–43. <https://doi.org/10.1145/1347364.1347373>
2. Lucani D.E., Stojanovic M., Medard M. On the relationship between transmission power and capacity of an underwater acoustic communication channel. In: *Proceedings of OCEANS Conference*. 2008. 6 p. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2008.4531073>
3. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009;47(1):84–89.
4. Matarneh A.M. Thorough investigation of BER simulation of DPSK in underwater acoustic channel. *JJEE*. 2016;2(2):160–171.
5. Урик Р.Дж. *Основы гидроакустики*: пер. с англ. Л.: Судостроение; 1978. 445 с.
6. Coates R. *Underwater Acoustic Systems*. New York: Wiley; 1990. 188 p.
7. Сиверс М.А., Басов В.В. Использование технологии MIMO-OFDM в системах гидролокации, гидроакустической связи, навигации и управления. В сб.: *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXIII международной научной конференции*: в 2 ч. Часть 2. Санкт-Петербург; 2020. С. 177–183.
8. Ерошенко С.В., Кранц В.З., Сечин В.В. Об использовании параллельных каналов для повышения скорости передачи информации в системе гидроакустической связи со сложными сигналами. *Гидроакустика*. 2020;42(2):23–28.

REFERENCES

1. Stojanovic M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. 2007;11(4):34–43. <https://doi.org/10.1145/1347364.1347373>
2. Lucani D.E., Stojanovic M., Medard M. On the relationship between transmission power and capacity of an underwater acoustic communication channel. In: *Proceedings of OCEANS Conference*. 2008. 6 p. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2008.4531073>
3. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009;47(1):84–89.
4. Matarneh A.M. Thorough investigation of BER simulation of DPSK in underwater acoustic channel. *JJEE*. 2016;2(2):160–171.
5. Urik R.J. *Osnovy gidroakustiki (Principles of Underwater Sound)*. Leningrad: Sudostroenie; 1978. 445 p. (in Russ.). [Urik R.J. *Principles of Underwater Sound*. NY: McGraw-Hill, Book Company; 1975. 445 p.]
6. Coates R. *Underwater Acoustic Systems*. New York: Wiley; 1990. 188 p.
7. Sivers M.A., Basov V.V. The use of MIMO-OFDM technology in systems of the hydrolocation, hydroacoustic communication, navigation and management. In: *Wave Electronics and Infocommunication Systems: Proceedings of the 23rd International Scientific Conference*. In 2 v. V. 2. St. Petersburg; 2020. P. 177–183 (in Russ.).
8. Eroshenko S.V., Krants V.Z., Sechin V.V. On the use of parallel channels to increase information rate in hydroacoustic communication system with compound signals. *Gidroakustika = Hydroacoustics*. 2020;42(2): 21–28 (in Russ.).

9. Родионов А.Ю., Унру П.П., Кулик С.Ю., Голов А.А. Оценки применения многочастотных сигналов с постоянной огибающей в гидроакустических системах связи. *Подводные исследования и робототехника*. 2019;3(29):30–38. <https://doi.org/10.25808/24094609.2019.29.3.004>
10. Клей К., Медвин Г. *Акустическая океанография*: пер. с англ. М.: Мир; 1980. 580 с.
11. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. *Теоретические основы акустики океана*. Л.: Гидрометеиздат; 1982. 264 с.
12. Андреева И.Б. *Физические основы распространения звука в океане*. Л.: Гидрометеиздат; 1975. 190 с.
13. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982;72(3): 896–907. <https://doi.org/10.1121/1.388170>
14. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982;72(6):1879–1890. <https://doi.org/10.1121/1.388673>
15. Kibblewhite A.C., Hampton L.D. A review of deep ocean sound attenuation data at very low frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980;67(1):147–157. <https://doi.org/10.1121/1.384473>
16. Гийес Л., Сабате П. *Основы акустики моря*: пер. с фр. Л.: Гидрометеиздат; 1967. 212 с.
17. Галагер Р. *Теория информации и надежная связь*: пер. с англ. М.: Сов. Радио; 1974. 720 с.
9. Rodionov A.Yu., Unru P.P., Kulik S.Yu., Golov A.A. Application of multi-frequency signals with constant envelope in underwater communication systems. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Investigations and Robotics*. 2019;3(29):30–38 (in Russ.). <https://doi.org/10.25808/24094609.2019.29.3.004>
10. Klei K., Medvin G. *Akusticheskaya okeanografiya (Acoustical Oceanography)*: trans. from Eng. Moscow: Mir; 1980. 580 p. (in Russ.). [Clay C.S., Medwin H. *Acoustical Oceanography*. New York: Wiley; 1977. 544 p.]
11. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. *Teoreticheskie osnovy akustiki okeana (Theoretical Foundations of Ocean Acoustics)*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1982. 264 p. (in Russ.).
12. Andreeva I.B. *Fizicheskie osnovy rasprostraneniya zvuka v okeane (Physical Foundations of Sound Propagation in the Ocean)*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. 190 p. (in Russ.).
13. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982;72(3): 896–907. <https://doi.org/10.1121/1.388170>
14. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982;72(6):1879–1890. <https://doi.org/10.1121/1.388673>
15. Kibblewhite A.C., Hampton L.D. A review of deep ocean sound attenuation data at very low frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980;67(1):147–157. <https://doi.org/10.1121/1.384473>
16. Guies L., Sabate P. *Osnovy akustiki morya (Fundamentals of acoustics of the sea)*: trans. from Franc. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1967. 212 p. (in Russ.).
17. Galager R. *Teoriya informatsii i nadezhnaya svyaz' (Information Theory and Reliable Communication)*: trans. from Eng. Moscow: Sovetskoe Radio; 1974. 720 p. (in Russ.). [Gallager R.G. *Information Theory and Reliable Communication*. NY: J. Wiley; 1968. 603 p.]

Об авторе

Денисов Валерий Евгеньевич, старший преподаватель кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФБГОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: denisov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 1190-9380, <https://orcid.org/0000-0002-5824-8741>

About the author

Valery E. Denisov, Senior Lecturer, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: denisov@mirea.ru. RCSI SPIN-code 1190-9380, <https://orcid.org/0000-0002-5824-8741>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391.072
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-41-50>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оптимальный прием многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи

Г.В. Куликов ^{1, ©},
Ч.Т. До ¹,
А.А. Лелюх ²,
В.З. Нгуен ³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Московский научно-исследовательский институт радиосвязи, Москва, 109029 Россия

³ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

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

Резюме

Цели. Проведенный в работах многих исследователей анализ помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов с фазовой (М-ФМ) и квадратурной амплитудной модуляцией (М-КАМ) показал, что качество приема дискретной информации существенно снижается при наличии кроме шумовой помехи еще и нефлуктуационных помех разных видов в канале радиосвязи. Одной из наиболее опасных является прицельная гармоническая помеха, поэтому разработка алгоритмов компенсации влияния такой помехи является актуальной задачей. Существуют различные методы борьбы с такого рода мешающими воздействиями, обладающие большей или меньшей эффективностью. Целью настоящей работы является синтез и анализ оптимального алгоритма приема многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи.

Методы. Использованы методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерное моделирование.

Результаты. Выполнен синтез и анализ оптимального алгоритма приема многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи. Показано, что кроме вычисления корреляционных интегралов в приемнике необходимо формировать весовые коэффициенты, величина которых зависит от степени корреляции помехового колебания, выделенного из принимаемой смеси, с копией помехи, хранящейся в приемнике. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум, расстройки помехи и неточности установки частоты и уровня копии помехи в приемнике. Показано, что выигрыш в помехоустойчивости приема тем выше, чем больше интенсивность гармонической помехи.

Выводы. Синтезированная схема приемника позволяет достаточно эффективно бороться с гармонической помехой. Эффективность ее работы зависит от расстройки гармонической помехи относительно центральной частоты спектра полезного сигнала. Схема некогерентной обработки гармонической помехи сохраняет работоспособность и при небольших (в пределах $\pm 10\%$) неточностях установки частоты и уровня копии помехи в приемнике.

Ключевые слова: многопозиционная фазовая модуляция, квадратурная амплитудная модуляция, гармоническая помеха, оптимальный прием, помехоустойчивость

• Поступила: 02.03.2022 • Доработана: 05.05.2022 • Принята к опубликованию: 24.10.2022

Для цитирования: Куликов Г.В., До Ч.Т., Лелюх А.А., Нгуен В.З. Оптимальный прием многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-41-50>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Optimal reception of multiple phase shift keying and quadrature amplitude modulation signals with non-coherent processing of harmonic interference

Gennady V. Kulikov ^{1, @},
Trung T. Do ¹,
Andrey A. Lelyukh ²,
Van D. Nguyen ³

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Moscow Research Institute of Radio Communications, Moscow, 109029 Russia

³ Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

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

Abstract

Objectives. Analysis of the reception noise immunity of multiple phase shift keying (M-PSK) and quadrature amplitude modulation (M-QAM) signals has demonstrated a significant reduction in the quality of reception of discrete information due to the presence of various types of non-fluctuating interference in a radio communication channel including targeted harmonic interference. Therefore, the development of algorithms for compensating the influence of such forms of interference is an urgent task. While various methods for combatting this kind of interference, these vary in terms of their effectiveness. The aim of the present work is to synthesize and analyze the optimal algorithm for the reception of M-PSK and M-QAM signals with incoherent processing of harmonic interference.

Methods. Various statistical radio engineering and computer simulation methods were used in accordance with optimal signal reception theory.

Results. Synthesis and analysis of the optimal algorithm for receiving M-PSK and M-QAM signals with incoherent processing of harmonic interference were carried out. In addition to calculating the correlation integrals in the receiver, it is necessary to form weight coefficients, whose value depends on the correlation of the interference oscillation (extracted from the received mixture) with a sample of the interference stored in the receiver. The dependences of the bit error probability on the signal-to-noise ratio, interference detuning, and inaccuracy in setting the frequency and level of the interference sample in the receiver were obtained. It is shown that the higher the gain in the noise immunity of reception, the greater the intensity of the harmonic interference.

Conclusions. The synthesized receiver circuit effectively compensates for harmonic interference. However, the efficiency of its operation depends on the detuning of the harmonic interference relative to the center frequency of the spectrum of the useful signal. The scheme for incoherent processing of harmonic interference remains operational even with small (within $\pm 10\%$) inaccuracies in setting the frequency and the level of the interference copy in the receiver.

Keywords: multiple phase shift keying, quadrature amplitude modulation, harmonic interference, optimal reception, noise immunity

• Submitted: 02.03.2022 • Revised: 05.05.2022 • Accepted: 24.10.2022

For citation: Kulikov G.V., Do T.T., Lelyukh A.A., Nguyen V.D. Optimal reception of multiple phase shift keying and quadrature amplitude modulation signals with non-coherent processing of harmonic interference. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-41-50>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов с фазовой (М-ФМ) и квадратурной амплитудной модуляцией (М-КАМ) показывает, что качество приема дискретной информации существенно ухудшается, вплоть до полного разрушения связи, при наличии в канале связи кроме шумовой помехи еще и нефлуктуационных помех разных видов [1–10]. Особенно это касается случаев, когда такая помеха является сигналоподобной, например, гармонической [5–7].

Существуют различные методы борьбы с такого рода помехами, обладающие большей или меньшей эффективностью, например, разработанные в [1, 11–14]. Их техническая реализация может быть очень сложной, как в случае синтеза оптимальных алгоритмов [1], или более простой, как в [12, 14], но менее эффективной. Целью настоящей работы является синтез и анализ оптимального алгоритма приема многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи.

1. АЛГОРИТМ ПРИЕМА СИГНАЛОВ М-ФМ И М-КАМ С НЕКОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКОЙ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ

Рассмотрим оптимальный прием сигналов М-ФМ и М-КАМ на фоне белого гауссовского шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью мощности N_0 и гармонической помехи

$$s_{\text{п}}(t, \varphi_{\text{п}}) = \mu A_0 \cos(\omega_{\text{п}} t + \varphi_{\text{п}}), \quad (1)$$

с относительной интенсивностью μ , частотой $\omega_{\text{п}} = 2\pi f_{\text{п}}$, близкой к частоте полезного сигнала, и случайной начальной фазой $\varphi_{\text{п}}$. При этом полагаем, что начальная фаза полезного сигнала известна точно, а распределение случайной величины $\varphi_{\text{п}}$ является равномерным в диапазоне $(-\pi, \pi]$. В этом случае можно говорить о некогерентной обработке помехи.

Процесс, поступающий на вход приемника,

$$x(t) = s_i(t) + s_{\text{п}}(t, \varphi_{\text{п}}) + n(t)$$

представляет собой аддитивную смесь помехи, шума и сигнала М-ФМ

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i),$$

$$\varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

или М-КАМ

$$s_i(t) = A_{\text{ср}}(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), \\ t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (2')$$

где $A_0 = A_{\text{ср}} = \sqrt{2E_s / T_s}$ – амплитуда сигнала; $E_s = kE_b$ – энергия канального символа; E_b – энергия, приходящаяся на один бит информации; $k = \log_2 M$; I_i и Q_i – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала; ω_0 – несущая частота. В случае М-КАМ следует говорить о средних по ансамблю сигналов энергиях и амплитуде.

Обозначим для упрощения дальнейших записей сумму сигнала и помехи:

$$s_{\text{п}}(t, C_i, \varphi_{\text{п}}) = s_i(t) + s_{\text{п}}(t, \varphi_{\text{п}}). \quad (3)$$

Определим апостериорную вероятность реализации этого процесса, а, следовательно, и совместную апостериорную вероятность канального символа C_i и фазы $\varphi_{\text{п}}$ следующим образом [15, 16]:

$$P_{\text{ps}}[s_{\text{сн}}(t, C_i, \varphi_{\text{п}})] = P_{\text{ps}}(C_i, \varphi_{\text{п}}) = K p_{\text{пр}}(C_i) p_{\text{пр}}(\varphi_{\text{п}}) \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{N_0} \int_0^{T_s} s_{\text{сн}}^2(t, C_i, \varphi_{\text{п}}) dt + \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\text{сн}}(t, C_i, \varphi_{\text{п}}) dt\right].$$

Здесь символом K обозначен нормировочный коэффициент, в котором учтены все составляющие, не содержащие информации о полезном сигнале и нефлуктуационной помехе; $p_{\text{пр}}(C_i)$ – априорная вероятность канального символа C_i , а $p_{\text{пр}}(\varphi_{\text{п}}) = 1/2\pi$.

$$\int_0^{T_s} s_{\text{сн}}^2(t, C_i, \varphi_{\text{п}}) dt = \\ = \int_0^{T_s} s_i^2(t, C_i) dt + \int_0^{T_s} s_{\text{п}}^2(t, \varphi_{\text{п}}) dt + 2 \int_0^{T_s} s_i(t, C_i) s_{\text{п}}(t, \varphi_{\text{п}}) dt = \\ = E_s + E_{\text{п}} + 2R_i(\varphi_{\text{п}}),$$

где $E_{\text{п}}$ – энергия помехи длительности T_s , $R_i(\varphi_{\text{п}})$ – коэффициент корреляции между сигналом и помехой.

Следовательно,

$$\begin{aligned}
 p_{ps}(C_i, \varphi_{\Pi}) &= \\
 &= K p_{pr}(C_i) \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{N_0}(E_i + E_{\Pi} + 2R_i(\varphi_{\Pi}))\right] \times \\
 &\quad \times \exp\left[\frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\text{сн}}(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt\right] = \\
 &= K_1 \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{2}{N_0} R_i(\varphi_{\Pi})\right] \exp\left[\frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\text{сн}}(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt\right].
 \end{aligned}$$

В коэффициент K_1 включены члены, не зависящие от значения символа C_i и от фазы φ_{Π} .

Для получения апостериорной вероятности дискретного символа C_i нужно усреднить величину $p_{ps}(C_i, \varphi_{\Pi})$ по всем возможным значениям фазы φ_{Π} . Тогда получим:

$$\begin{aligned}
 p_{ps}(C_i) &= K_1 \frac{1}{2\pi} \times \\
 &\times \int_{-\pi}^{\pi} \left(\exp\left[-\frac{2}{N_0} R_i(\varphi_{\Pi})\right] \exp\left[\frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\text{сн}}(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt\right] \right) d\varphi_{\Pi}.
 \end{aligned}$$

Введем обозначения для интегралов, описывающих степень корреляции между принимаемым процессом $x(t)$ и копиями сигналов при различных значениях канальных символов C_i :

$$\begin{aligned}
 J_0 &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_i(t, C_i = 0) dt, \\
 &\dots \\
 J_{M-1} &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_i(t, C_i = M-1) dt.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Если предположить, что в приемнике имеется копия помехи $s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi})$, то следующие интегралы, по сути, определяют степень корреляции между ней и образцом принимаемой помехи, сформированным путем вычитания копий сигнала из принимаемого процесса $x(t)$:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} [x(t) - s_i(t, C_i = 0)] s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) dt, \\
 &\dots \\
 a_{M-1} &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} [x(t) - s_i(t, C_i = M-1)] s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) dt.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Тогда с учетом (1), (3)–(5) алгоритм принятия решения о значении канального символа C_i

можно записать с использованием модифицированных функций Бесселя $I_0(\cdot)$ следующим образом:

$$\begin{aligned}
 C_i &\Rightarrow \max \{ p_{ps}(C_i) \} = \\
 &= \max \left\{ \exp(J_i) \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(a_i) d\varphi_{\Pi} \right\} = \max \{ \exp(J_i) I_0(U_i) \}, \\
 p_{ps}(C_i = 0) &> \left\{ p_{ps}(C_j \neq 0) \right\}_{j \neq i}, \quad i, j = 0, \dots, M-1. \tag{6}
 \end{aligned}$$

Последнее выражение можно записать по-другому:

$$\exp(J_i) I_0(U_i) > \{ \exp(J_j) I_0(U_j) \}_{j \neq i} \tag{7}$$

или

$$J_i + \ln(I_0(U_i)) > \{ J_j + \ln(I_0(U_j)) \}_{j \neq i}, \quad i, j = 0, \dots, M-1.$$

В случае М-КАМ при сравнении величин для нахождения максимума $\max\{\cdot\}$ необходимо учитывать, что пороги принятия решения не нулевые, а равны полуразности энергий соответствующих посылок сигнала.

Аргументы функций Бесселя формируются с помощью квадратурных составляющих величин, описываемых выражением (5), например:

$$\begin{aligned}
 U_i &= \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}, \\
 X_i &= \frac{2\mu A_0}{N_0} \int_0^{T_s} [x(t) - s_i(t, C_i)] \cos \omega_{\Pi} t dt, \\
 Y_i &= \frac{2\mu A_0}{N_0} \int_0^{T_s} [x(t) - s_i(t, C_i)] \sin \omega_{\Pi} t dt.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Правило принятия решения о канальном символе при наличии в канале связи дополнительно к шумовой еще и гармонической помехи со случайной начальной фазой в основном совпадает с решающим правилом для приемника сигналов М-ФМ и М-КАМ на фоне только белого гауссовского шума. Однако, кроме вычисления корреляционных интегралов, необходимо формировать и весовые коэффициенты для этих интегралов (в виде бесселевых функций), величина которых зависит от степени корреляции помехового колебания, выделенного из принимаемой смеси $x(t)$, с копией помехи, хранящейся в приемнике. Соответствующая структурная схема приемника приведена на рис. 1, где обозначено: 1 – фазовращатель на 90° , 2 – интегратор, 3 – блок вычисления экспоненты, 4 – блок возведения в квадрат, 5 – блок вычисления модуля, 6 – формирователь весовых коэффициентов, 7 – блок выбора максимума, 8 – схема оценки канального символа, 9 – схема формирования весовых коэффициентов, 10 – генератор копии помехи, 11 – блок формирования опорных колебаний.

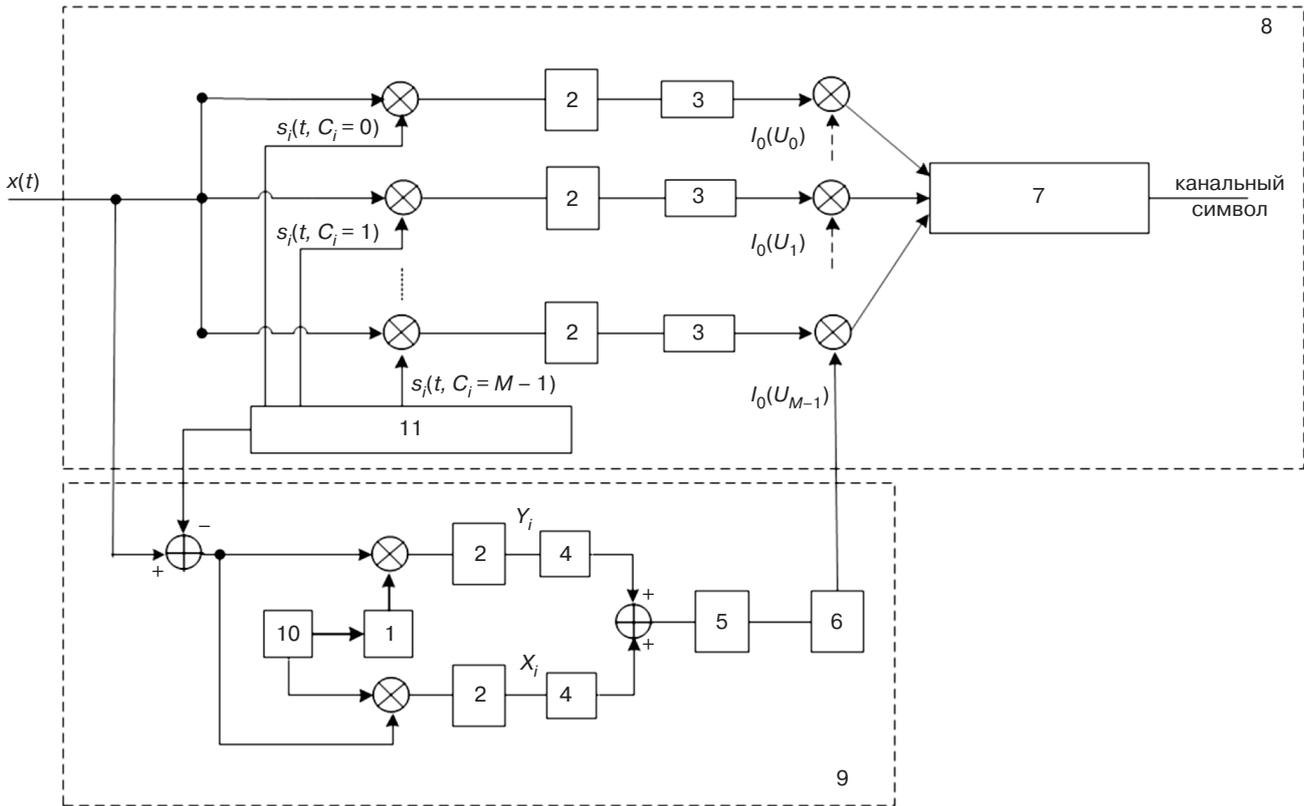


Рис. 1. Структурная схема оптимального приемника сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи

Для примера на рисунке показан один дополнительный канал, остальные строятся аналогично.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки эффективности схемы некогерентной обработки гармонической помехи было проведено моделирование приема для сигналов 2-ФМ, 4-ФМ (4-КАМ), 8-ФМ и 16-КАМ. Определялась вероятность битовой ошибки $P_{\text{об}}$ в зависимости от параметров помехи и настроек приемника.

А. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстройки помехи

Моделирование оптимальных приемников сигналов М-ФМ и М-КАМ показало, что эффективность работы схемы некогерентной обработки помехи зависит от расстройки $\Delta f_{\text{п}}$ частоты помехи относительно центральной частоты спектра полезного сигнала. Рис. 2 иллюстрирует зависимость вероятности битовой ошибки $P_{\text{об}}$ от расстройки помехи $\Delta f_{\text{п}} T_s$ при $\mu = 0.5$ и отношении сигнал/шум $SNR = E_b/N_0 = 7\text{дБ}$. Видно, что наибольший выигрыш по помехоустойчивости наблюдается при расстройке $\Delta f_{\text{п}} T_s = 0.5$. Так, для 2-ФМ вероятность ошибки снижается в 1.3 раза, для 4-ФМ (4-КАМ) – в 2.5 раза, для 8-ФМ – в 2.7 раза и для 16-КАМ – в 2.8 раза. При прицельной помехе

($\Delta f_{\text{п}} T_s = 0$) схема оказывается неэффективной, а при $\Delta f_{\text{п}} T_s = 1$ выигрыш отсутствует в связи с тем, что частота помехи совпадает с частотой первого нуля спектра сигнала, и такая помеха не влияет на помехоустойчивость приема.

Рассмотрим более подробно случай, когда частота помехи не совпадает с центральной частотой спектра полезного сигнала, и, как следует из рис. 2, схема некогерентной обработки помехи дает выигрыш в помехоустойчивости.

Б. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

На рис. 3 показаны зависимости вероятности битовой ошибки $P_{\text{об}}$ от отношения сигнал/шум SNR (дБ) при $\Delta f_{\text{п}} T_s = 0.5$. Штриховые линии соответствуют случаю включенной схемы некогерентной обработки помехи. Для сравнения сплошными линиями даны кривые, полученные без обработки помехи.

Наглядно виден положительный эффект такой обработки – вероятность битовой ошибки значительно снижается. Особенно это заметно при больших значениях интенсивности помехи $\mu = 0.5$ и 0.9 . Так при $\mu = 0.5$ и $P_{\text{об}} = 10^{-2}$ для 2-ФМ включение схемы некогерентной обработки помехи дает энергетический выигрыш не более 0.5 дБ, для 4-ФМ (4-КАМ) – около 2 дБ и для 8-ФМ и 16-КАМ – более 5 дБ.

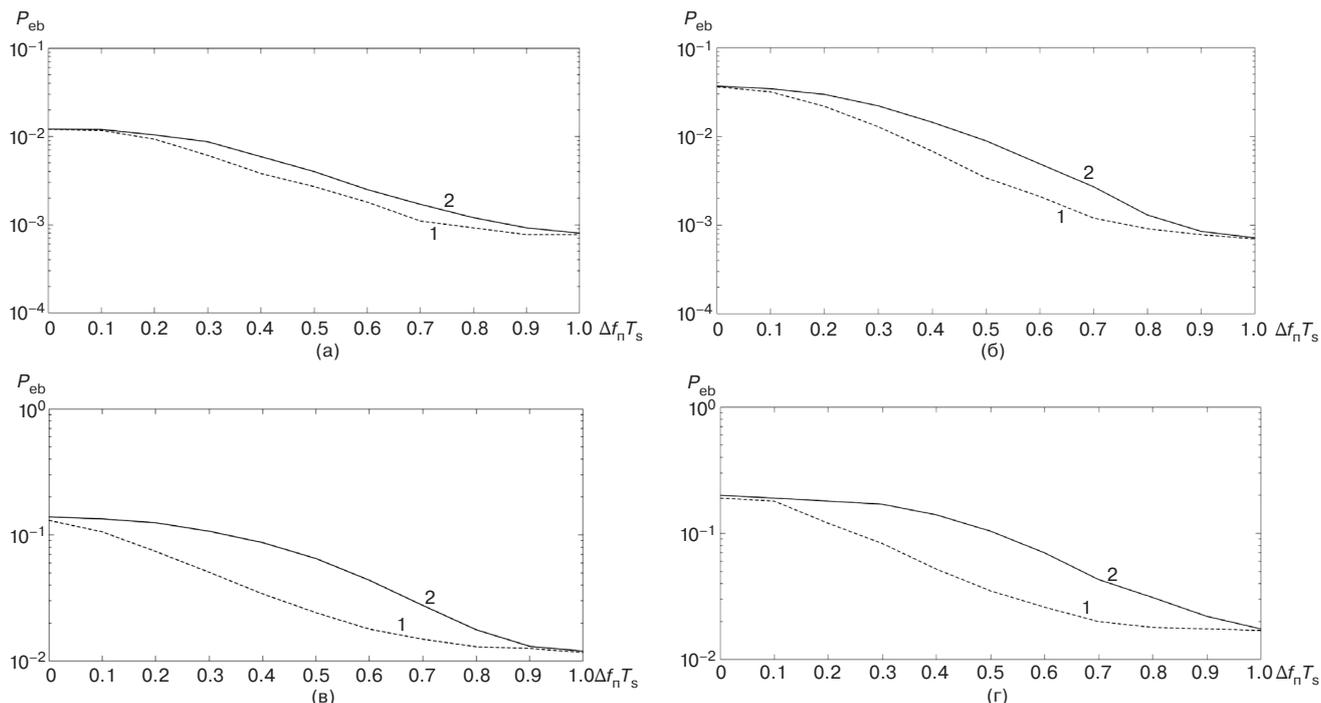


Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки от расстройки помехи с обработкой (1) и без обработки помехи (2): (а) 2-ФМ, (б) 4-ФМ (4-КАМ), (в) 8-ФМ, (г) 16-КАМ

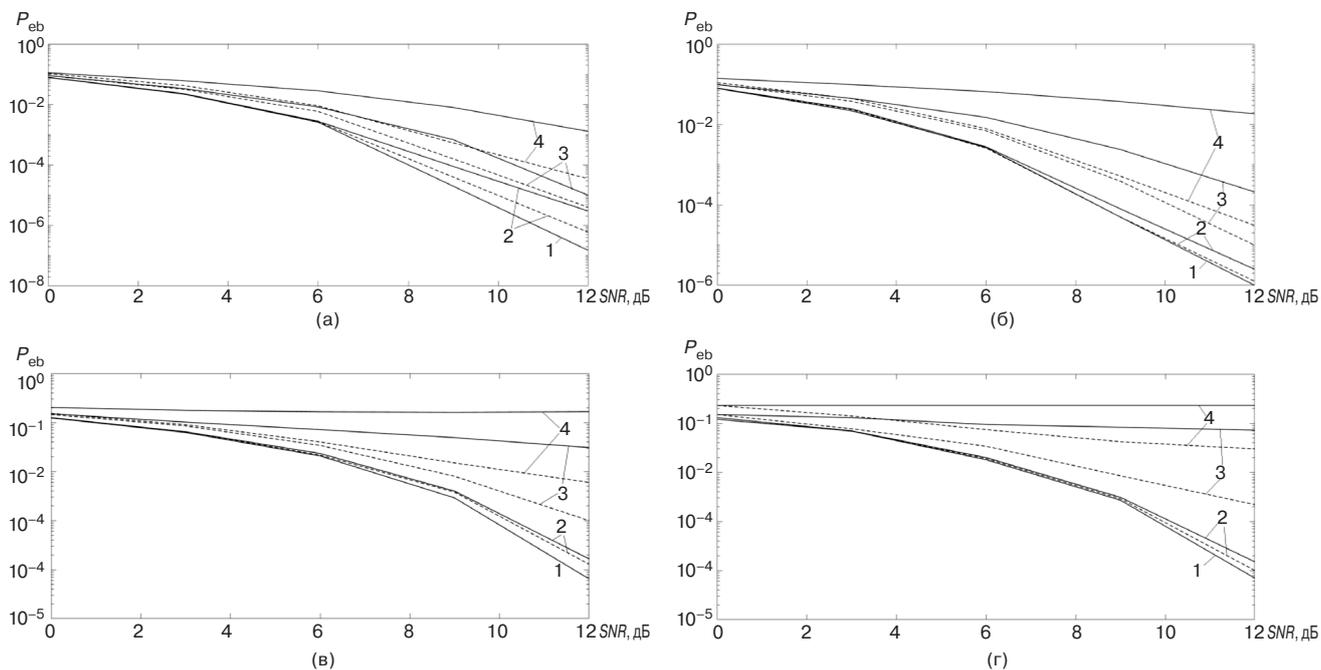


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при $\mu = 0$ (1), $\mu = 0.1$ (2), $\mu = 0.5$ (3), $\mu = 0.9$ (4): (а) 2-ФМ, (б) 4-ФМ (4-КАМ), (в) 8-ФМ, (г) 16-КАМ

Сравнение эффективности синтезированного алгоритма с адаптивным алгоритмом, примененным в [12, 17], показало, что оптимальная обработка сигнала и помехи обеспечивает наилучшие параметры помехоустойчивости во всем диапазоне изменений уровня помехи.

В. Влияние неточности установки в приемнике частоты копии помехи

Алгоритм (7) предполагает знание в приемнике частоты помехи, как образца. Естественно, что это предположение часто не выполняется. Рассмотрим, как влияет отклонение частоты копии помехи $\Delta f_{\text{ппр}}$,

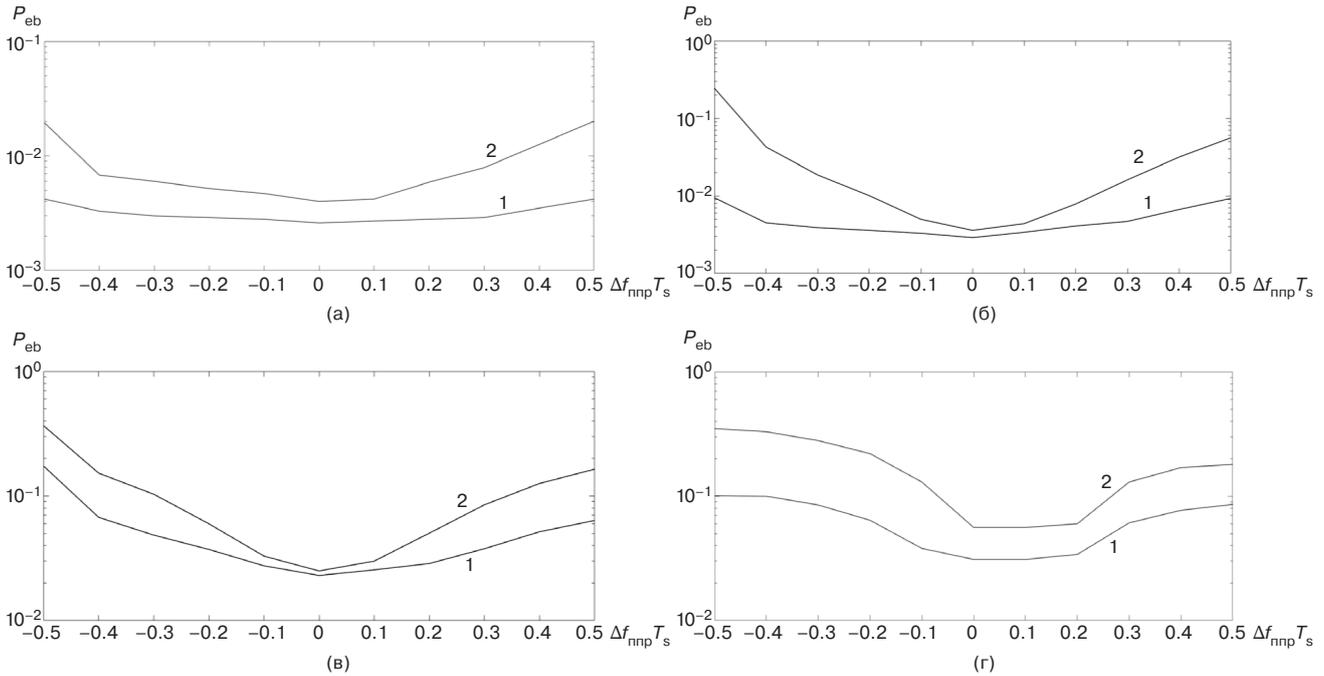


Рис. 4. Влияние неточности установки в приемнике частоты копии помехи при $\mu = 0.5$ (1), $\mu = 0.9$ (2): (а) 2-ФМ, (б) 4-ФМ (4-КАМ), (в) 8-ФМ, (г) 16-КАМ

установленной в приемнике, на величину вероятности ошибки P_{eb} . На рис. 4 представлены графики, иллюстрирующие эту зависимость для разных сигналов при $SNR = 7$ дБ. Здесь по оси абсцисс отложена величина $\Delta f_{ппр} T_s$, нормированная к символьной скорости передачи полезного сигнала.

Естественно, что обработка помехи является наиболее эффективной, когда в приемнике точно известна частота помехи $\Delta f_{ппр} T_s = 0$. Небольшие неточности установки в приемнике частоты копии помехи $\Delta f_{ппр} T_s = \pm 0.1$ незначительно снижают помехоустойчивость приема сигнала, причем это снижение тем сильнее, чем больше интенсивность помехи, но при $\mu = 0.9$ и расстройке $\Delta f_{ппр} T_s = \pm 0.5$ для 2-ФМ вероятность ошибки увеличивается уже в 5 раз, а для 8-ФМ – в 7–10 раз.

Г. Влияние неточности установки в приемнике уровня копии помехи

Алгоритм (7) предполагает знание в приемнике также и уровня помехи. Рассмотрим, как влияет отклонение уровня копии помехи $\Delta \mu_{ппр}$, установленного в приемнике, на величину вероятности ошибки P_{eb} . На рис. 5 представлены графики, иллюстрирующие эту зависимость для разных сигналов при $SNR = 7$ дБ и номинальной интенсивности помехи $\mu = 0.9$.

Из рис. 5 видно, что величина вероятности ошибки минимальна при отклонении интенсивности $\Delta \mu_{ппр} = 0$. Небольшие неточности установки в приемнике уровня копии помехи $\Delta \mu_{ппр} = \pm 0.1$ незначительно снижают помехоустойчивость приема

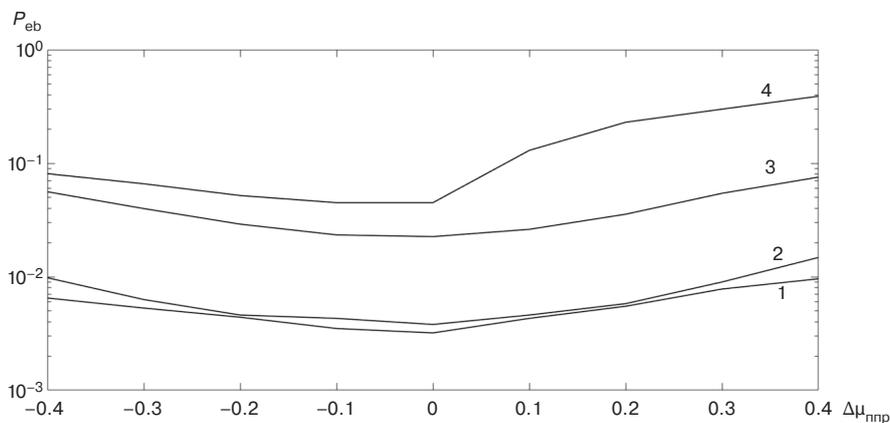


Рис. 5. Влияние неточности установки в приемнике уровня копии помехи для 2-ФМ (1), 4-ФМ (4-КАМ) (2), 8-ФМ (3), 16-КАМ (4)

сигнала, но при $\Delta\mu_{\text{ппр}} = \pm 0.4$ для всех сигналов наблюдается почти одинаковое (в 2–3 раза) увеличение вероятности битовой ошибки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальная некогерентная обработка гармонической помехи повышает помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ за счет использования дополнительной схемы коррекции порогов в блоке принятия решения приемника.
2. Эффективность работы схемы зависит от расстройки частоты гармонической помехи относительно центральной частоты спектра полезного сигнала. Наибольший выигрыш в помехоустойчивости наблюдается при расстройке $\Delta f_{\text{п}} T_s = 0.5$ (энергетический выигрыш от 0.5 дБ для 2-ФМ до более 5 дБ для 8-ФМ и 16-КАМ при $\mu = 0.5$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савватеев Ю.И., Назаров О.В. (ред.). *Помехозащитность приема дискретных сигналов*. М.: Радиотехника; 2015. 584 с. ISBN 978-5-93108-094-9
2. Петров А.В., Белобородов Д.А. Воздействие фазоманипулированной помехи на канал передачи данных с многопозиционной фазовой манипуляцией. *Специальная техника*. 2016;3:2–10.
3. Бучинский Д.И., Вознюк В.В., Фомин А.В. Исследование помехоустойчивости приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией к воздействию помех с различной структурой. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2019;671:120–127.
4. Петров А.В. Вероятность ошибочного приема символа в канале с квадратурной амплитудной манипуляцией под воздействием манипулированной по фазе помехи. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2018;5:47–53.
5. Ложкин К.Ю., Петров А.В., Прожеторко С.С. Аналитические зависимости средней вероятности искажения бита М-КАМ сигнала на фоне гармонической или фазоманипулированной помех. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2018;23(5):32–41.
6. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Наукоёмкие технологии*. 2018;19(11):32–38.
7. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;11:2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>

3. Выигрыш в помехоустойчивости приема тем выше, чем больше интенсивность гармонической помехи.
4. Схема некогерентной обработки гармонической помехи сохраняет работоспособность и при небольших неточностях установки частоты ($\Delta f_{\text{ппр}} T_s = \pm 0.1$) и уровня ($\Delta\mu_{\text{ппр}} = \pm 0.1$) копии помехи в приемнике.

Вклад авторов

Г.В. Куликов – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Ч.Т. До – синтез и анализ приемника сигналов М-ФМ.

А.А. Лелюх – синтез и анализ приемника сигналов М-КАМ.

В.З. Нгуен – проведение компьютерного моделирования.

Authors' contributions

G.V. Kulikov – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

T.T. Do – synthesis and analysis of the M-PSK signal receiver.

A.A. Lelyukh – synthesis and analysis of the M-QAM signal receiver.

V.D. Nguyen – computer simulation.

REFERENCES

1. Savvateev Yu.I., Nazarov O.V. (Eds.). *Pomekhozashchishchennost' priema diskretnykh signalov* (Noise immunity of reception of discrete signals). Moscow: Radiotekhnika; 2015. 584 p. (in Russ.). ISBN 978-5-93108-094-9
2. Petrov A.V., Beloborodov D.A. Impact of phase-shift keyed noise signal on data transmission channel with multiple phase-shift keying. *Spetsial'naya tekhnika = Special Technique*. 2016;3:2–10 (in Russ.).
3. Buchinskii D.I., Voznyuk V.V., Fomin A.V. Research of noise stability of the receiver with M-PSK modulation under the interference with different structure. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaitskogo = Proceedings of the Mozhaitsky Military Space Academy*. 2019;671:120–127 (in Russ.).
4. Petrov A.V. Symbol error rate in channel, using quadrature amplitude modulation, under the impact of phase-shift keyed jamming. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and Control Systems*. 2018;(5):47–53 (in Russ.).
5. Lozhkin K.Yu., Petrov A.V., Prozhertorko S.S. Analytical dependences of bit distortion average probability M-QAM of a signal against harmonic or PSK interference. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2018;23(5):32–41 (in Russ.).
6. Kulikov G.V., Nguyen V.D., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2018;19(11):32–38 (in Russ.).

8. Ложкин К.Ю., Петров А.В., Миронов В.А., Михалёв В.В., Прожеторко С.С. Аналитические зависимости средней вероятности искажения бита М-КАМ-сигнала на фоне гармонической или фазоманипулированной помех с учетом замираний. *Радиотехника*. 2020;84(4–8):27–35.
9. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В., Кузленков П.И. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.10>
10. Nandi M. Symbol error probability of coherent PSK system in the presence of two path interference. *Int. J. Phys. Appl. (IIPA)*. 2013;5(2):133–137. URL: http://www.irphouse.com/ijpa/ijpav5n2_10.pdf
11. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive signal processing*. Prentice-Hall; 1985. 474 p.
12. Куликов Г.В., До Чунг Тиен. Эффективность фазового алгоритма адаптивной фильтрации при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;4:1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.9>
13. Прилепский А.В., Прилепский В.В., Каменский С.А. Оптимизация спектров сложных фазоманипулированных сигналов при приеме на фоне узкополосных помех и шума. *Теория и техника радиосвязи*. 2005;1:44–47.
14. Поборчая Н.Е., Смердова Е.О. Вариационный алгоритм компенсации искажений КАМ сигнала на фоне квазидетерминированной полосовой помехи и аддитивного белого шума. *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2014;5(4):141–147.
15. Тихонов В.И. *Оптимальный прием сигналов*. М.: Радио и связь; 1983. 320 с.
16. Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь; 1982. 624 с.
17. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Адаптивная фильтрация гармонической помехи при приеме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Журнал радиоэлектроники*. 2021;8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.13>
7. Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Interference immunity of reception of signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of harmonic interference. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2018;11:2 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
8. Lozhkin K.Yu., Petrov A.V., Mironov V.A., Mikhalev V.V., Prozhertorko S.S. Analytical dependences of bit distortion average probability M-QAM of a signal against harmonic or PSK jamming subject to fading. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2020;84(4,8):27–35 (in Russ.).
9. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Batalov E.V., Kuzelenkov P.I. Noise immunity of reception of signals with quadrature amplitude modulation in the presence of interference phase-shift keying. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics* 2019;7 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.10>
10. Nandi M. Symbol error probability of coherent PSK system in the presence of two path interference. *Int. J. Phys. Appl. (IIPA)*. 2013;5(2):133–137. Available from URL: http://www.irphouse.com/ijpa/ijpav5n2_10.pdf
11. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive signal processing*. Prentice-Hall; 1985. 474 p.
12. Kulikov G.V., Do T.T. Efficiency of the phase algorithm of adaptive filtering for receiving signals with multiposition phase shift keying. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2020;4:1 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.9>
13. Prilepskii A.V., Prilepskii V.V., Kamenskii S.A. Optimization of the spectra of complex phase-shift keyed signals when received against the background of narrow-band interference and noise. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi = Radio Communication Theory and technology*. 2005;1:44–47 (in Russ.).
14. Poborchaya N.E., Smerdova E.O. Variational algorithm for compensating QAM signal distortion against the background of quasi-deterministic band interference and additive white noise. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov = Systems of Signal Synchronization, Generation and Processing*. 2014;5(4):141–147 (in Russ.).
15. Tikhonov V.I. *Optimal'nyi priem signalov (Optimal Signal Reception)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1983. 320 p. (in Russ.).
16. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika (Statistical Radio Engineering)*: 2nd ed. Moscow: Radio i svyaz'; 1982. 624 p. (in Russ.).
17. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Adaptive filtering of harmonic interference when receiving signals with quadrature amplitude modulation. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2021;8 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.13>

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

До Чунг Тиен, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dotrungtien1993@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-9596-5440>

Лелюх Андрей Александрович, заместитель начальника технического центра специальной аппаратуры АО «Московский научно-исследовательский институт радиосвязи» (109029, Россия, Москва, Нижегородская ул., д. 32). E-mail: a.lel@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 1021-5094.

Нгуен Ван Зунг, ассистент, Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона (Вьетнам, Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, 236). E-mail: codonmimai92@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2810-1204>

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Trung T. Do, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dotrungtien1993@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-9596-5440>

Andrey A. Lelyukh, Deputy Head of the Technical Center of Special Equipment of JSC “Moscow Research Institute of Radio Communications” (32, Nizhegorodskaya ul., Moscow, 109029 Russia). E-mail: a.lel@mail.ru. RSCI SPIN-code 1021-5094.

Van D. Nguyen, Assistant, Le Quy Don Technical University, (236 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam). E-mail: codonmimai92@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2810-1204>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.49
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутника связи

Т.Э. Гельфман[®],
А.П. Пирхавка,
В.О. Скрипачев

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

Резюме

Цели. Повышение качества и долговечности работы спутниковых систем связи с момента начала их практического использования развивается в направлении увеличения надежности бортовых ретрансляторов. Это достигается применением методов резервирования и использованием элементной базы с меньшей интенсивностью отказов. Наряду с резервированием большие перспективы в этом плане открывает создание новых технологий и материалов. Весьма актуальной является проблема эффективного сочетания методов резервирования и способов уменьшения интенсивности отказов элементов. Испытания на долговечность сложных систем могут продолжаться несколько лет. Цель работы – анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутниковой связи на основании предложенной методики определения показателя долговечности по математической модели вероятности безотказной работы.

Методы. Для описания структуры сложной системы, в данном случае бортового ретранслятора системы спутниковой связи, используется логико-вероятностный метод, в котором зависимость показателей надежности системы от показателей надежности элементов формулируется в виде логической функции работоспособности. Эта функция дает возможность создавать различные математические модели надежности систем и построить их логические схемы надежности, в т.ч. для резервированных систем. Для сравнения различных систем применяются графоаналитические методы.

Результаты. Рассмотрено влияние различных методов резервирования устройств ретранслятора и применения более надежной элементной базы на показатели безотказности и долговечности. Представлена методика определения показателя долговечности – гамма-процентного ресурса – по построенным математическим моделям вероятности безотказной работы. Проведен сравнительный анализ мероприятий по увеличению гамма-процентного ресурса ретранслятора.

Выводы. Рассмотренная методика определения показателя долговечности по математической модели вероятности безотказной работы позволяет определить интервал времени, в пределах которого резервирование дает выигрыш по вероятности безотказной работы по сравнению с уменьшением интенсивности отказов элементов. Таким образом возможно обеспечить эффективное сочетание методов резервирования и способов уменьшения интенсивности отказов элементов.

Ключевые слова: надежность, спутниковая связь, бортовой ретранслятор, резервирование, гамма-процентный ресурс

• Поступила: 08.07.2022 • Доработана: 29.09.2022 • Принята к опубликованию: 08.11.2022

Для цитирования: Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П., Скрипачев В.О. Анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутника связи. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):51–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analysis of the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder

Tatyana E. Gelfman[@],
Alexey P. Pirkhavka,
Vladimir O. Skripachev

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Since the launch of satellite communication systems in practical use, approaches towards enhancing their operational quality and durability have been developing in the direction of increased reliability of airborne transponders. This is mainly achieved by increasing redundancy and using components with a lower failure rate. In this regard, the creation of new technologies and new materials is a particularly promising direction. However, since durability testing of complex systems can take several years, the problem of ensuring an effective combination of redundancy methods and elements having a reduced failure rate remains challenging. The purpose of the work is to analyze the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder based on a proposed methodology for determining the durability index using a mathematical model of the probability of failure-free operation.

Methods. In order to describe the complex structure of a satellite communication system transponder, a logical-probabilistic method is used, in which the dependence of the system reliability indicators on the reliability indicators of the transponder elements is formulated as a logical function of operability. Mathematical models of system reliability are created on this basis including for redundant systems. Graphs and analytical methods are used to compare different systems.

Results. The influence of various methods for ensuring the redundancy of transponder devices and the use of more reliable components on the reliability and durability indicators is considered. A gamma-percentage resource-based technique for determining the durability indicator based on the constructed mathematical models of the probability of failure-free operation is presented along with a comparative analysis of measures to increase the gamma-percentage resource of the transponder.

Conclusions. The presented method for determining the durability index using a mathematical model of the probability of no-failure operation can be used to determine the time interval within which redundancy increases the probability of no-failure operation as compared with a decrease in the failure rate of elements. On this basis, the most effective combination of redundancy methods and approaches for reducing the failure rate of elements can be identified.

Keywords: reliability, satellite communication, airborne transponder, redundancy, gamma-percentage resource

• Submitted: 08.07.2022 • Revised: 29.09.2022 • Accepted: 08.11.2022

For citation: Gelfman T.E., Pirkhavka A.P., Skripachev V.O. Analysis of the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):51–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>

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

Надежность спутниковых систем связи определяют их характеристики: эффективность, долговечность, готовность и риск [1]. Для обеспечения высоких показателей надежности необходимо, чтобы спутниковая система удовлетворяла требованиям по множеству критериев, таких как вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, гамма-процентный ресурс и коэффициент оперативной готовности [2]. Повышение надежности спутниковых систем связи с момента начала их практического использования развивается в направлении увеличения вероятности безотказной работы бортовых ретрансляторов [3–7]. Срок службы современных спутниковых ретрансляторов достигает 15 лет [4, 8], что обеспечивается применением методов резервирования и использованием элементной базы с меньшей интенсивностью отказов. Для достижения требуемых значений показателей надежности используются разные методы резервирования [1, 9–11]. Например, в [1] показано, что при раздельном резервировании замещением с ненагруженным резервом обеспечивается больший выигрыш по средней наработке до отказа и гамма-процентному ресурсу, а при постоянном резервировании обеспечивается больший выигрыш по вероятности безотказной работы. Кроме того, реализация постоянного резервирования менее затратна. Применение резервирования ведет к усложнению ретрансляторов и, следовательно, к увеличению энергопотребления, массогабаритных и стоимостных показателей систем. Поэтому часто приходится искать оптимальное решение, позволяющее получить заданный показатель надежности при минимальных затратах, либо максимальную надежность при заданных показателях качества [8, 12–14]. Например, в [15] выполнена оценка эффективности оптимального резервирования замещением и показано, что ненагруженный резерв, по сравнению с нагруженным, обеспечивает больший выигрыш по вероятности безотказной работы для любых наработок и по средней наработке до отказа. К тому же стоимость ретранслятора с нагруженным резервом выше, т.к. увеличены массогабаритные и энергетические показатели.

Методы снижения интенсивности отказов элементов базируются на новых технологиях и принципах

проектирования [3, 8], а также на нагрузочном резервировании, связанном с облегчением электрических, тепловых, механических и других режимов работы элементов [1, 9]. Рост надежности элементной базы характеризуется закономерностями, имеющими ярко выраженные участки «насыщения», определяемые тем, что после начального периода достаточно эффективного воздействия на надежность дальнейшие действия и материальные вложения в совершенствование процессов разработки и изготовления элементов не оказывают существенного влияния на рост надежности. Это происходит по причине достижения физических ограничений, присущих каждому классу элементной базы. Смена поколений элементной базы позволяет скачкообразно увеличивать ее уровни надежности.

Очевидно, что выбор методов обеспечения надежности бортовых ретрансляторов значительно влияет на их массогабаритные, энергетические и стоимостные показатели.

Цель работы – проанализировать эффективность сочетания методов резервирования и уменьшения интенсивности отказов элементов на основе определения показателя долговечности – гамма-процентного ресурса – по математической модели вероятности безотказной работы.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Пусть логическая схема надежности бортового ретранслятора имеет вид, представленный на рис. 1. Схема ретранслятора состоит из трех участков.

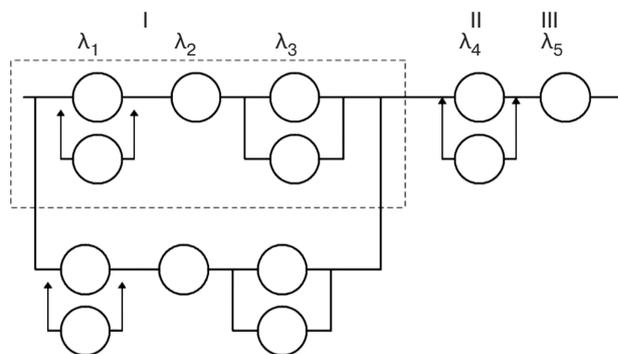


Рис. 1. Логическая схема надежности бортового ретранслятора

Вероятность безотказной работы всего ретранслятора $P_{\text{ртр}}$ равна произведению вероятностей безотказной работы каждого участка схемы:

$$P_{\text{ртр}} = P_{\text{I}}P_{\text{II}}P_{\text{III}} \quad (1)$$

Участок I представляет собой основное приемное устройство (выделено на рис. 1 штриховой линией), состоящее из трех последовательно соединенных элементов, первый из которых имеет интенсивность отказов λ_1 и резервирован замещением (резерв ненагруженный), второй элемент с интенсивностью отказов λ_2 не резервирован, третий элемент с интенсивностью отказов λ_3 имеет постоянное резервирование.

Вероятность безотказной работы основного приемного устройства равна произведению вероятностей безотказной работы каждого из этих трех элементов с учетом их резервирования:

$$P_{\text{прм}} = P_1P_2P_3. \quad (2)$$

Для первого элемента, резервированного замещением,

$$P_1 = e^{-\lambda_1 t} (1 + \lambda_1 t). \quad (3)$$

Второй элемент не резервирован, поэтому

$$P_2 = e^{-\lambda_2 t}. \quad (4)$$

Для третьего элемента с постоянным резервированием

$$P_3 = 1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2. \quad (5)$$

Подставив (3)–(5) в (2), получим:

$$P_{\text{прм}} = e^{-\lambda_1 t} (1 + \lambda_1 t) e^{-\lambda_2 t} \left(1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2 \right).$$

Когда приемное устройство дублировано, вероятность безотказной работы первого участка схемы рис. 1 определяется выражением:

$$P_{\text{I}} = 1 - (1 - P_{\text{прм}})^2. \quad (6)$$

Участок II состоит из одного передающего устройства с интенсивностью отказов λ_4 , резервированного замещением (резерв ненагруженный). Вероятность безотказной работы этого участка определяется выражением:

$$P_{\text{II}} = e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t). \quad (7)$$

Участок III состоит из одного нерезервированного устройства – антенно-фидерного устройства ретранслятора. Вероятность безотказной работы участка

$$P_{\text{III}} = e^{-\lambda_5 t}, \quad (8)$$

где λ_5 – интенсивность отказов антенно-фидерного устройства.

Подставим (6)–(8) в (1) и получим выражение для вероятности безотказной работы бортового ретранслятора спутника связи для случая дублирования приемного устройства и резервирования замещением передатчика, а также при резервировании замещением первого элемента и постоянного резервирования третьего элемента приемного устройства:

$$P_{\text{ртр}} = \left(1 - (1 - P_{\text{прм}})^2 \right) e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t) e^{-\lambda_5 t}.$$

В случае отсутствия дублирования приемного устройства в целом, а также без резервирования первого и третьего элементов приемного устройства, вероятность безотказной работы ретранслятора описывается формулой:

$$P_{\text{ртр}} = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} e^{-\lambda_3 t} e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t) e^{-\lambda_5 t}.$$

Для варианта резервирования замещением первого элемента и постоянного резервирования третьего элемента приемного устройства, но при отсутствии дублирования приемного устройства в целом, вероятность безотказной работы ретранслятора описывается формулой:

$$P_{\text{ртр}} = e^{-\lambda_1 t} (1 + \lambda_1 t) e^{-\lambda_2 t} \left(1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2 \right) e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t) e^{-\lambda_5 t}.$$

ВЛИЯНИЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Рассмотрим влияние методов резервирования на вероятность безотказной работы и долговечность ретранслятора при изменении интенсивности отказов приемного устройства, передатчика и антенно-фидерного устройства. В качестве показателя долговечности используем гамма-процентный ресурс, который определяется по графикам зависимости вероятности безотказной работы ретранслятора от времени при $P_{\text{ртр}} = 0.9$.

Графики зависимости вероятности безотказной работы ретранслятора от времени для трех методов резервирования приведены на рис. 2–4 при разных интенсивностях отказов элементов (каскадов).

Метод 1. Дублирование приемного устройства и резервирование замещением передатчика, а также резервирование замещением первого элемента и постоянное резервирование третьего элемента приемного устройства. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени представлены на рис. 2. В табл. 1 приведены параметры графиков и результаты расчета гамма-процентного ресурса.

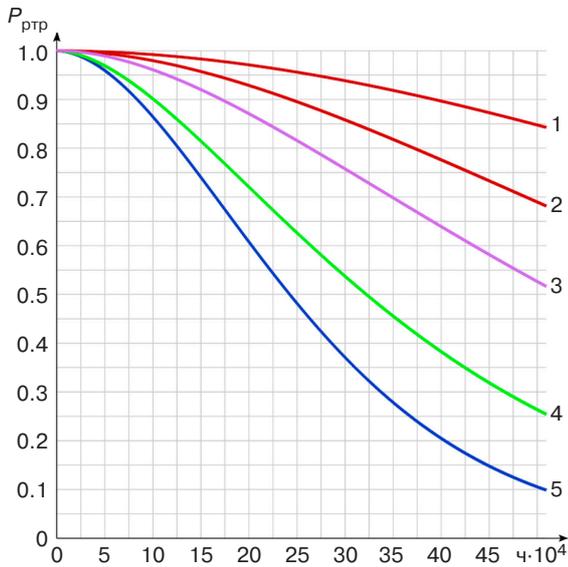


Рис. 2. Зависимости вероятности безотказной работы от времени для первого метода резервирования

Таблица 1. Параметры графиков и результаты расчетов (рис. 2)

| № кривой | Интенсивность отказов элементов схемы, $10^{-8}/ч$ | | | | | Гамма-процентный ресурс, $ч \cdot 10^4$ |
|----------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 | |
| 1 | 20 | 50 | 50 | 100 | 1 | 38.8 |
| 2 | 20 | 50 | 50 | 200 | 1 | 24.0 |
| 3 | 20 | 50 | 50 | 300 | 1 | 16.9 |
| 4 | 20 | 50 | 50 | 500 | 1 | 9.8 |
| 5 | 100 | 200 | 200 | 500 | 1 | 8.2 |

Как и следовало ожидать, гамма-процентный ресурс растет с уменьшением интенсивности отказов элементов. Так, например, при уменьшении интенсивности отказов передатчика в 2, 3 и 5 раз гамма-процентный ресурс увеличивается соответственно в 1.6, 2.3 и 4 раза.

Метод 2. Резервирование замещением передатчика, без резервирования приемного устройства и его элементов. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени представлены на рис. 3. В табл. 2 приведены параметры графиков и результаты расчета гамма-процентного ресурса.

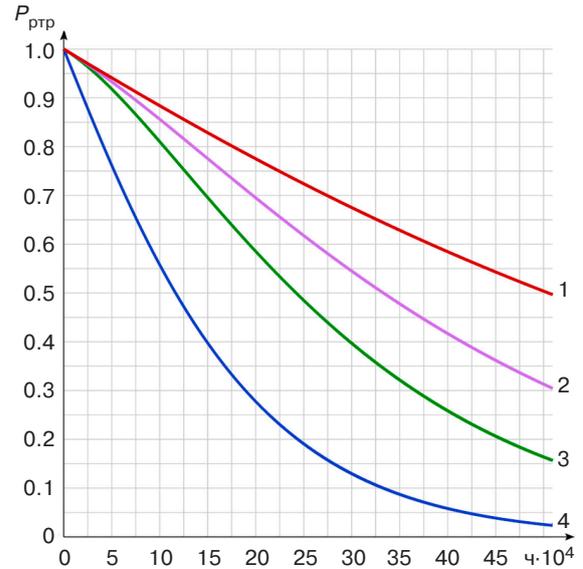


Рис. 3. Зависимости вероятности безотказной работы ретранслятора от времени для второго метода резервирования

Таблица 2. Параметры графиков и результаты расчетов (рис. 3)

| № кривой | Интенсивность отказов элементов схемы, $10^{-8}/ч$ | | | | | Гамма-процентный ресурс, $ч \cdot 10^4$ |
|----------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 | |
| 1 | 20 | 50 | 50 | 100 | 1 | 8.4 |
| 2 | 20 | 50 | 50 | 300 | 1 | 7.1 |
| 3 | 20 | 50 | 50 | 500 | 1 | 5.7 |
| 4 | 100 | 20 | 20 | 500 | 1 | 2.1 |

Анализ графиков рис. 2 и 3 и данных табл. 1 и 2 показывают, что без резервирования приемного устройства при одинаковых интенсивностях отказов элементов гамма-процентный ресурс снижается более, чем в 4 раза. Однако при более надежных элементах в отсутствие резервирования приемного устройства наблюдается не такое существенное уменьшение гамма-процентного ресурса и его снижение не превышает в рассматриваемых случаях 1.7 раза.

Метод 3. Общее дублирование приемного устройства отсутствует, реализуется резервирование передатчика, первого и третьего элементов приемного устройства. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени представлены на рис. 4. Результаты расчета гамма-процентного ресурса и параметры графиков представлены в табл. 3.

Анализ графиков рис. 4 и данных табл. 3 показывает, что имеющее наиболее высокую надежность антенно-фидерное устройство практически не влияет на гамма-процентный ресурс: в рассматриваемом случае при увеличении интенсивности отказов λ_5 в 10 раз гамма-процентный ресурс снижается менее, чем на 5%.

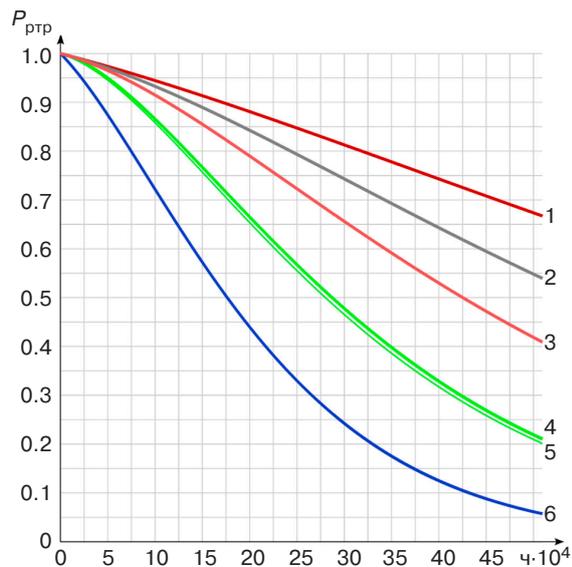


Рис. 4. Зависимости вероятности безотказной работы ретранслятора от времени для третьего метода резервирования

Таблица 3. Параметры графиков и результаты расчетов (рис. 4)

| № кривой | Интенсивность отказов элементов схемы, $10^{-8}/ч$ | | | | | Гамма-процентный ресурс, $ч \cdot 10^4$ |
|----------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 | |
| 1 | 20 | 50 | 50 | 100 | 1 | 16.9 |
| 2 | 20 | 50 | 50 | 200 | 1 | 13.6 |
| 3 | 20 | 50 | 50 | 300 | 1 | 11.1 |
| 4 | 20 | 50 | 50 | 500 | 1 | 8.0 |
| 5 | 20 | 50 | 50 | 500 | 10 | 7.6 |
| 6 | 100 | 200 | 200 | 500 | 1 | 4.0 |

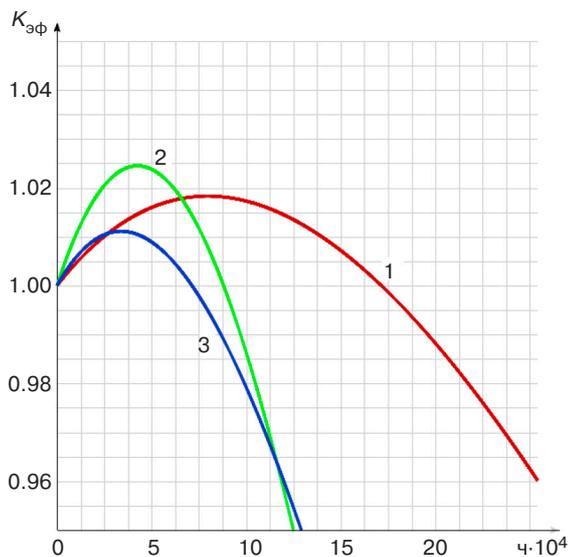


Рис. 5. Коэффициент эффективности резервирования

Обратим внимание на варианты резервирования различными методами, у которых значения гамма-процентного ресурса отличаются незначительно. Оценим эффективность методов резервирования ретранслятора для указанных случаев по вероятности безотказной работы путем определения коэффициента эффективности метода резервирования $K_{эф}$ как соотношения вероятностей безотказной работы вариантов с одинаковыми значениями гамма-процентного ресурса. На рис. 5 приведены зависимости от времени коэффициентов эффективности резервирования сравниваемых вариантов. В табл. 4 приведены параметры графиков и результаты определения эффективности методов резервирования.

Из графиков рис. 5 можно сделать важный для практики вывод: существует пороговое значение времени, до которого резервирование дает выигрыш по вероятности безотказной работы ретранслятора по сравнению с уменьшением интенсивности отказов элементов. Например, первый метод резервирования обеспечивает выигрыш по сравнению с третьим методом в интервале времени от 0 до $1.69 \cdot 10^5$ ч даже при увеличении интенсивности отказов передатчика в 3 раза, а также преимущество, по сравнению со вторым методом, в интервале времени от 0 до $8.7 \cdot 10^4$ ч даже в случае увеличения интенсивностей отказов первого и четвертого элементов в 5 раз, второго и третьего элементов – в 4 раза.

Третий метод резервирования обеспечивает выигрыш по сравнению со вторым методом в интервале времени от 0 до $7.1 \cdot 10^4$ ч даже при увеличении интенсивности отказов передатчика в 5 раз.

При превышении порогового значения времени выигрыша от резервирования нет и надежность элементов ретранслятора является фактором, определяющим вероятности безотказной работы.

Таблица 4. Параметры графиков (рис. 5) и результаты определения эффективности методов резервирования

| № кривой | Сравниваемые методы резервирования | Интенсивность отказов элементов схемы, $10^{-8}/ч$ | | | | | Пороговое время, $ч \cdot 10^4$ | Максимальное значение $K_{эф}$ |
|----------|------------------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 | | |
| 1 | 1 | 20 | 50 | 50 | 300 | 1 | 16.9 | 1.018 |
| | 3 | 20 | 50 | 50 | 100 | 1 | | |
| 2 | 1 | 100 | 200 | 200 | 500 | 1 | 8.7 | 1.025 |
| | 2 | 20 | 50 | 50 | 100 | 1 | | |
| 3 | 3 | 20 | 50 | 50 | 500 | 1 | 7.1 | 1.011 |
| | 2 | 20 | 50 | 50 | 100 | 1 | | |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гамма-процентный ресурс ретранслятора растет с уменьшением интенсивности отказов элементов. При отсутствии резервирования приемника и его элементов этот показатель долговечности снижается, но при более надежных элементах это снижение не так существенно. Предложенная методика расчета гамма-процентного ресурса по математическим моделям вероятности безотказной работы позволяет определить интервал времени, в пределах которого резервирование дает выигрыш по вероятности безотказной работы по сравнению с повышением надежности элементов. Таким образом можно обеспечить эффективное сочетание методов резервирования и способов уменьшения интенсивности отказов элементов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора № 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022 г.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (FASIE), Contract No. 94C2/MOL/73887, dated March 25, 2022.

Вклад авторов

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

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

В.О. Скрипачев – анализ литературы, подготовка графических материалов, редактирование текста статьи.

Authors' contributions

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

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

V.O. Skripachev – analysis of literature, preparation of graphic materials, editing of the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половко А.М., Гуров С.В. *Основы теории надежности*. СПб.: БХВ-Петербург; 2008. 704 с. ISBN 978-5-94157-541-1
2. Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Коэффициент оперативной готовности спутниковых сетей связи. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):35–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-35-40>
3. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. *Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации*. Томск: ТГУ; 2015. 266 с. ISBN 978-5-94621-460-5
4. Maral G., Bousquet M., Sun Zh. *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*. 6th ed. Wiley & Sons Ltd; 2020. 792 p. ISBN 978-1-119-38208-9
5. Verma A.S., Jaiswal A.K., Kumar M., Nigam G., Srivastava S.K. Measurement of reliability and availability of satellite communication links: Progress and challenges. In: *2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP)*. 2013:268–271. <https://doi.org/10.1109/ISSP.2013.6526916>
6. Elbert B.R. *Introduction to Satellite Communication*. 3rd ed. Artech House Publishers; 2008. 447 p. ISBN 978-1-59693-210-4
7. Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. *IEEE Systems Journal*. 2021;15(1):791–801. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.2980760>

REFERENCES

1. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti (Fundamentals of Reliability Theory)*. St. Petersburg: BKHV-Petersburg; 2008. 704 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94157-541-1
2. Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. The operational readiness factor of satellite communication networks. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):35–40 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-35-40>
3. Sevastyanov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami ehkspluatatsii (Fundamentals of Reliability Management of Spacecraft with Long Service Life)*. Tomsk: TGU; 2015. 266 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94621-460-5
4. Maral G., Bousquet M., Sun Zh. *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*. 6th ed. Wiley & Sons Ltd; 2020. 792 p. ISBN 978-1-119-38208-9
5. Verma A.S., Jaiswal A.K., Kumar M., Nigam G., Srivastava S.K. Measurement of reliability and availability of satellite communication links: Progress and challenges. In: *2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP)*. 2013:268–271. <https://doi.org/10.1109/ISSP.2013.6526916>
6. Elbert B.R. *Introduction to Satellite Communication*. 3rd ed. Artech House Publishers; 2008. 447 p. ISBN 978-1-59693-210-4

8. Mehmet N., Selman D., Hasan H.E., Cenk S. Reliability and cost focused optimization approach for a communication satellite payload redundancy allocation problem. *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*. 2018;11.0(5). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316576>
9. Антонов А.В., Никулин М.С. *Статистические модели в теории надежности*. М.: Абрис; 2012. 390 с. ISBN 978-5-4372-0009-4
10. Гельфман Т.Э., Гнучев О.Е., Лобынцев Р.Ю. Методы резервирования спутниковых систем связи. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком – 2017»*. Сб. научных трудов III Международной научно-практической конференции. Московский технологический университет (МИРЭА). 2017. С. 366–374.
11. Ямпурин Н.П., Баранова А.В. *Основы надежности электронных средств*. М.: Академия; 2010. 240 с. ISBN 978-5-7695-5908-2
12. Bouwmeester J., Menicucci A., Gill E.K.A. Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing? *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022;220:108288. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108288>
13. Castet J.F., Saleh J.H. Satellite and satellite subsystems reliability: Statistical data analysis and modeling. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2009;94(11):1718–1728. <https://doi.org/10.1016/j.res.2009.05.004>
14. Кислаев А.Г., Хропов А.Н. Оптимальное резервирование, как метод повышения надежности систем космической связи. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2010»*. 2010;10(1–3):109–112.
15. Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Оптимальное резервирование ретранслятора спутника связи. В сб.: *Труды международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий», РЭУС-2015*. М.: 2015. Вып. LXX. С. 217–220.
7. Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. *IEEE Systems Journal*. 2021;15(1):791–801. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.2980760>
8. Mehmet N., Selman D., Hasan H.E., Cenk S. Reliability and cost focused optimization approach for a communication satellite payload redundancy allocation problem. *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*. 2018;11.0(5). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316576>
9. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti (Statistical Models in Reliability Theory)*. Moscow: Abris; 2012. 390 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4372-0009-4
10. Gelfman T.E., Gnuchev O.E., Lobyntsev R.Yu. Reservation methods satellite communication systems. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radioengineering and Infocommunication Systems. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*. Moscow: Technological University (MIREA); 2017. P. 366–374 (in Russ.).
11. Yampurin N.P., Baranova A.V. *Osnovy nadezhnosti elektronnykh sredstv (Fundamentals of Reliability of Electronic Means)*. Moscow: Akademiya; 2010. 240 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7695-5908-2
12. Bouwmeester J., Menicucci A., Gill E.K.A. Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing? *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022;220:108288. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108288>
13. Castet J.F., Saleh J.H. Satellite and satellite subsystems reliability: Statistical data analysis and modeling. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2009;94(11):1718–1728. <https://doi.org/10.1016/j.res.2009.05.004>
14. Kislav A.G., Khropov A.N. Optimal redundancy as a method for improving the reliability of space communication systems. In: *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «INTERMATIC 2010.»* 2010;10(3):109–112 (in Russ.).
15. Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. Optimal redundancy of a communications satellite transponder. In: *Proceedings of the International conference «Radio Electronic Devices and Systems for Infocommunication Technologies,» REDS 2015*. Moscow: 2015. Issue LXX. P. 217–220 (in Russ.).

Об авторах

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

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

Скрипачев Владимир Олегович, к.т.н., начальник отдела радиомониторинга и дистанционного зондирования Земли, доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: skripachev@mirea.ru. Scopus Author ID 35105951000, ResearcherID M-9770-2015, SPIN-код РИНЦ 8322-7260, <https://orcid.org/0000-0003-3538-5943>

About the authors

Tatyana E. Gelfman, Associate Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: gelfman@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8302-6999>

Alexey P. Pirkhavka, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pirkhavka@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2460-7507>

Vladimir O. Skripachev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Radiomonitoring and Remote Sensing of Earth, Associate Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: skripachev@mirea.ru. Scopus Author ID 35105951000, ResearcherID M-9770-2015, RSCI SPIN-code 8322-7260, <https://orcid.org/0000-0003-3538-5943>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 004.021: 65.012.26
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Алгоритм поиска подкритических путей на сетевых графиках

М.А. Анфёров[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: anfyorov@inbox.ru

Резюме

Цели. Информационная поддержка процессов планирования и управления проектами использует в качестве модели сетевые графики, помогающие в формировании структуры планируемых работ и расчете характеристик эффективности проекта. С целью оптимизации и выравнивания ресурсов, используемых в проектах, возникает необходимость нахождения на этих моделях не только критического пути максимальной взвешенной длины, но и ближайших к нему подкритических путей с меньшей по отношению к нему длиной. Цель работы – синтез и анализ алгоритма поиска k -кратчайших путей между вершинами входа и выхода сети, позволяющего идентифицировать вышеназванные подкритические пути.

Методы. Использованы положения теории графов и теории групп, а также метод динамического программирования.

Результаты. Разработан алгоритм поиска k -кратчайших путей на ориентированных графах без контуров с отношением строгого порядка. С использованием теории групп на графах были определены абстрактные элементы – p -контур, между которыми была установлена многоуровневая структура отношений, позволившая реализовать необходимый поиск путей. В рамках обоснования работоспособности построенного алгоритма доказана справедливость основных положений: во-первых, многоуровневая система отношений является исчерпывающей; во-вторых, не происходит потерь в окончательном решении в процессе работы алгоритма; в-третьих, пути, найденные в результате работы алгоритма, удовлетворяют основному требуемому соотношению между ними. Численно алгоритм реализован методом динамического программирования, который был расширен за счет использования дополнительного функционального соотношения, предполагающего наличие подоптимальных политик.

Выводы. Проведенная серия вычислительных экспериментов подтвердила работоспособность и эффективность программно реализованного алгоритма. Выполненный анализ показал хорошие характеристики сходимости предложенного алгоритма в сравнении с алгоритмами данного класса, применяемыми к сетевым графикам. Это позволяет рекомендовать его к практическому использованию в информационных системах управления проектами.

Ключевые слова: управление проектами, сетевой график, критический путь, алгоритм, вычислительный эксперимент

• Поступила: 27.03.2022 • Доработана: 06.06.2022 • Принята к опубликованию: 24.10.2022

Для цитирования: Анфёров М.А. Алгоритм поиска подкритических путей на сетевых графиках. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Algorithm for finding subcritical paths on network diagrams

Mikhail A. Anfyorov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: anfyorov@inbox.ru

Abstract

Objectives. Network diagrams are used as an information support element in planning and project management processes for structuring planned work and calculating project efficiency characteristics. In order to optimize and balance resources used in projects, it becomes necessary to locate in these models not only the critical path of the maximum weighted length, but also the subcritical paths closest to it having a shorter length in relation to it. The aim of the work is to synthesize and analyze an algorithm for finding k -shortest paths between the input and output network vertices, on which basis the above-mentioned subcritical paths can be identified.

Methods. The provisions of graph theory and group theory, as well as the method of dynamic programming, were used.

Results. An algorithm for finding k -shortest paths in contourless directed graphs having a strict order relation was developed. Abstract elements were defined according to group theory in graphs as p -contours, between which a multilevel structure of relations for implementing the necessary search of paths was then established. For substantiating the efficiency of the constructed algorithm, the validity of the main provisions was demonstrated as follows: firstly, the multilevel system of relations is exhaustive; secondly, there is no loss in the final solution during the operation of the algorithm; thirdly, the paths obtained as a result of the work of the algorithm satisfy the main required relation between them. Numerically, the algorithm was implemented by the dynamic programming method extended by means of an additional functional relationship, implying the presence of suboptimal policies.

Conclusions. The conducted runs of computational experiments confirmed the operability and efficiency of the software-implemented algorithm. The performed analysis demonstrated the good convergence characteristics of the proposed algorithm as compared with other algorithms of this class applied to network diagrams. On this basis, it can be recommended for practical use in project management information systems.

Keywords: project management, network diagram, critical path, algorithm, computational experiment

• Submitted: 27.03.2022 • Revised: 06.06.2022 • Accepted: 24.10.2022

For citation: Anfyorov M.A. Algorithm for finding subcritical paths on network diagrams. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>

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

Как известно, проектный менеджмент в качестве основной модели, отображающей структуру взаимной зависимости работ проекта и используемой для расчета временных характеристик этих работ и всего проекта в целом, использует сетевой ориентированный граф без контуров [1–3]. Данная модель в технологии сетевого планирования и управления получила название сетевого графика, построенного по одному из двух принципов. В первом случае работы в модели отображаются дугами графа (принцип «события-работы»), что характерно для методологии PERT

(Project Evaluation and Review Technique), во втором – вершинами графа (принцип «работы-связи»). Однако любой из этих подходов предполагает определение на сетевом графике критического пути, имеющего максимальную взвешенную длину и соединяющего всякую вершину с тупиковой, которые соответствуют началу и окончанию проекта. При этом длина рассчитывается, исходя из значения времени выполнения критических работ, отображаемых активными элементами пути (дугами или вершинами). Использование критического пути является неотъемлемой частью технологии сетевого планирования и управления проектами, что отражено в исследованиях на этапе

ее теоретического становления (обширная библиография данного периода представлена в [4]) и последующего развития [5–8].

Что касается реальных проектов в различных предметных областях, то они реализуются в условиях ограничения материальных, трудовых и финансовых ресурсов. Это предполагает развитие теории проектного менеджмента в направлении оптимизации структуры проекта по критерию минимальной его стоимости при определенных ресурсных ограничениях [7–12]. В этом случае встает вопрос о необходимости поиска на сетевом графике не только критического, но и подкритических путей для осуществления вышеупомянутой оптимизации и выравнивания ресурсов. Если критический путь Ω_0 можно определить как

$$\Omega_0 : L(\Omega_0) = \max_{\Omega_j \in \Omega} \{L(\Omega_j)\}, \quad (1)$$

где $L(\Omega_0)$ – длина критического пути, а Ω – множество всех полных путей на сетевом графике, то подкритические пути составят упорядоченное множество полных путей графа $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots\}$, характеризуемое следующим образом:

$$L(\Omega_0) \geq L(\Omega_1); L(\Omega_j) \geq L(\Omega_{j+1}). \quad (2)$$

Для нахождения критического пути достаточно использовать любой из алгоритмов для поиска кратчайшего взвешенного пути между вершинами, отображающими начало и окончание проекта на сетевом графике, предварительно поменяв значения весов его активных элементов (времени выполнения работ) на отрицательные. Это могут быть алгоритмы, традиционно использующие динамическое программирование [13, 14], либо эвристические методы [15]. Что касается нахождения подкритических путей, то для этого используются так называемые алгоритмы поиска k -кратчайших путей между вершинами графа. Это могут быть алгоритмы, опять-таки использующие динамическое программирование непосредственно [16–22] либо с многократным применением алгоритма поиска кратчайшего пути [23–25], или использующие другие современные подходы [26–28], а также подходы, ориентированные на более сложные конструкции сетей [29–32].

В данной работе описывается алгоритм поиска k -кратчайших путей на сетевых графиках, основанный на выделении в них элементов более высокого порядка и структуризации отношений между ними.

СТРУКТУРИЗАЦИЯ ОТНОШЕНИЙ НА ГРАФАХ

Выполненные исследования ориентированы на применение сетевых графиков типа «работы-связи», использующих в качестве модели сетевые

ориентированные графы $G(X, U)$ (X – множество вершин, U – множество дуг) без контуров с отношением строгого порядка с разбивкой на слои [33] (рис. 1).

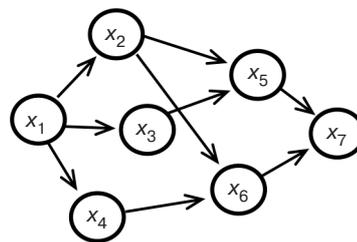


Рис. 1. Сетевой график

Построим свободную абелеву группу $P(U)$ над порождающим множеством U всех дуг графа $G = (X, U)$ следующим образом. В качестве элементов $P(U)$ будем рассматривать множество формальных линейных комбинаций элементов из U с целыми

коэффициентами вида $p_j = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot u_i)$, $p_j \in P(U)$; $u_i \in U$; $\gamma_i = 0, \pm 1, \dots$, где n – количество дуг графа.

В качестве бинарной аддитивной операции определим сумму элементов из множества $P(U)$ формулой

$$p_j = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot u_i) + \sum_{i=1}^n (\gamma'_i \cdot u_i) = \sum_{i=1}^n (\gamma_i + \gamma'_i) \cdot u_i.$$

Аналогично построим группу $H(X)$ над множеством X всех вершин графа, определив ее элементы

$$\text{как } h_j = \sum_{i=1}^m (\gamma_i \cdot x_i), h_j \in H(X); x_i \in X; \gamma_i = 0, \pm 1, \dots,$$

где m – количество вершин. В дальнейшем при записи элементов групп $P(U)$ и $H(X)$ будем опускать составляющие их элементы, имеющие нулевые коэффициенты.

Определение 1. Дифференциалом d группы $P(U)$ называется гомоморфизм $d: P(U) \rightarrow H(X)$, определенный следующим образом:

- 1) если $u_t = (x_i, x_j)$, то $du_t = x_j - x_i$;
 - 2) если $p_q = \sum \gamma_t u_t$, то $dp_q = \sum \gamma_t du_t$
- при $p_q \in P(U)$; $u_t \in U$; $x_i, x_j \in X$.

Определение 2. Элемент $r \in P(U)$ называется p -контуром, если $dr = 0$. Подгруппа $R = Ker d \subset P(U)$ называется подгруппой p -контуров.

Лемма 1. Сумма нескольких p -контуров есть p -контур.

Доказательство. Во-первых, сумма $\sum r_i$ есть элемент группы $P(U)$ как результат аддитивного сложения ее элементов. Во-вторых, дистрибутивность отображения d согласно определению 1 позволяет записать $d\sum r_i = \sum dr_i = 0$. Утверждение леммы доказано.

Используя общепринятое понятие пути на графе как связанной конечной последовательности дуг, будем обозначать его

$$\Omega = \{u_1, u_2, \dots, u_w\}. \quad (3)$$

При этом, если $u = (x_1, x_2)$, то $x_1 = u^-$, $x_2 = u^+$. Длину этого пути будем определять через вышеупомянутые численные весовые оценки вершин $\varepsilon(x)$ выражением

$$L(\Omega) = \varepsilon(u_1^-) + \sum_{i=1}^w \varepsilon(u_i^+). \quad (4)$$

Если путь соединяет вершину входа x' с вершиной выхода x'' сети, то будем называть такой путь полным.

Зададим отображение φ следующим образом:

$$\varphi(\{\gamma_1 u_1, \gamma_2 u_2, \dots, \gamma_n u_n\}) = \sum_{i=1}^n \gamma_i u_i, \gamma_i > 0, \quad (5)$$

а также обратное ему

$$\varphi' \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i u_i \right) = \{|\gamma_1| u_1, |\gamma_2| u_2, \dots, |\gamma_n| u_n\}. \quad (6)$$

Определение 3. Образом пути $\Omega \subset \mathbf{U}$ на графе $\mathbf{G} = (\mathbf{X}, \mathbf{U})$ называется отображение $\varphi(\Omega)$.

Лемма 2. Дифференциал образа любого полного пути на сетевом графе определится как $d\varphi(\Omega) = x'' - x'$.

Доказательство. Поскольку полный путь Ω на рассматриваемых графах является простым путем, не имеющим кратных дуг, то его образ, с учетом (3), можно записать как $\varphi(\Omega) = u_1 + u_2 + \dots + u_w$. В соответствии с определением 1 получим $d\varphi(\Omega) = du_1 + du_2 + \dots + du_w$ или $d\varphi(\Omega) = (u_1^+ - u_1^-) + (u_2^+ - u_2^-) + \dots + (u_w^+ - u_w^-)$ или

$$d\varphi(\Omega) = -u_1^- + (u_1^+ - u_2^-) + \dots + (u_{w-1}^+ - u_w^-) + u_w^+. \quad (7)$$

Свойство инцидентности дуг пути предполагает $u_i^+ = u_{i+1}^-$, $i \in [1, w-1]$. Следовательно, выражение (7) запишется в виде $d\varphi(\Omega) = u_w^+ - u_1^-$ или $d\varphi(\Omega) = x'' - x'$.

Лемма 3. Разность образов двух полных путей на сетевом графе есть p -контур.

Доказательство. Разность образов полных путей $\varphi(\Omega_i)$ и $\varphi(\Omega_j)$, являясь результатом аддитивной функции сложения двух элементов группы $\mathbf{P}(\mathbf{U})$, также принадлежит этой группе. С другой стороны, дифференциал этой разности определится как $d[\varphi(\Omega_i) - \varphi(\Omega_j)] = d\varphi(\Omega_i) - d\varphi(\Omega_j)$. Однако в силу утверждения леммы 2 $d\varphi(\Omega_i) = d\varphi(\Omega_j)$. Следовательно, $d[\varphi(\Omega_i) - \varphi(\Omega_j)] = 0$, что доказывает утверждение леммы.

Зададим отображение α следующим образом:

$$\alpha(p) = \sum_{u_i \in p} \gamma_i \cdot \varepsilon(u_i^+). \quad (8)$$

Определение 4. Значением p -контура r называется величина $\alpha(r)$.

Лемма 4. Разность длин двух полных путей на сетевом графе равна значению p -контура, образованного разностью их образов.

Доказательство. Пусть $\Omega_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iw}\}$ и $\Omega_j = \{u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{js}\}$ – два любых полных пути графа. Тогда их длины, в соответствии с (4), можно записать как $L(\Omega_i) = \varepsilon(x') + \sum_{t=1}^w \varepsilon(u_{it}^+)$, $L(\Omega_j) = \varepsilon(x') + \sum_{t=1}^s \varepsilon(u_{jt}^+)$, а разность длин как

$$L(\Omega_i) - L(\Omega_j) = \sum_{t=1}^w \varepsilon(u_{it}^+) - \sum_{t=1}^s \varepsilon(u_{jt}^+). \quad (9)$$

С другой стороны, в соответствии с леммой 3, p -контур, определяемый образами этих полных путей, запишется с учетом выражения (5) в виде $r = \varphi(\Omega_i) - \varphi(\Omega_j) = u_{i1} + u_{i2} + \dots + u_{iw} - u_{j1} - u_{j2} - \dots - u_{js}$, а значение этого p -контура, с учетом (8), как

$$\alpha(r) = \sum_{t=1}^w \varepsilon(u_{it}^+) - \sum_{t=1}^s \varepsilon(u_{jt}^+). \quad (10)$$

Сравнивая выражения (9) и (10), приходим к утверждению леммы.

Определение 5. Элементарным p -контуром $g^{(ab)}$ относительно дуги графа $u = (a, b) \in \mathbf{U}$ назовем элемент группы $\mathbf{P}(\mathbf{U})$, определяемый в виде суммы этой дуги с разностью между образами кратчайших взвешенных путей, соединяющих вершины x' и a , а также вершины x' и b (см. рис. 2). При этом элементарные p -контуров ориентированы на кратчайшие пути ввиду того, что основной целью является поиск k -кратчайших путей графа.

Определение 6. Дуга u_i называется инцидентной пути Ω_0 в вершине b , если выполняются следующие условия:

- 1) $u_i \notin \Omega_0$;
- 2) $\exists u_i \in \Omega_0, u_i^+ = u_j^+ = b$.

Вершина b называется при этом вершиной сечения пути Ω_0 (рис. 2).

Определение 7. Элементарный p -контур относительно дуги, инцидентной пути Ω в вершине сечения $b \in \mathbf{X}$, называется базисующимся по этому пути и обозначается как r^b (рис. 2).

В привязке к рассмотрению полных путей графа в рамках задачи сетевого планирования базисующийся по пути Ω_0 p -контур, позволяющий

¹ Следует иметь ввиду, что по вершине b может базироваться несколько элементарных контуров при наличии нескольких инцидентных дуг. [Several elementary contours can be based on the vertex b in the presence of several incident arcs.]

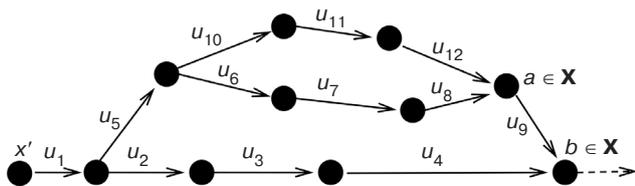


Рис. 2. Графическое пояснение к определениям.

$\{u_1, u_5, u_6, u_7, u_8\}$ – кратчайший путь между вершинами x' и a ;

$\{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ – кратчайший путь между вершинами x' и b ;

$\{u_5 + u_6 + u_7 + u_8 + u_9 - u_2 - u_3 - u_4\}$ – элементарный p -контур ($g^{(ab)}$), базирующийся по пути $\{u_1, u_2, u_3, u_4, \dots\}$ по инцидентной дуге u_9 в вершине сечения b : $g^{(ab)} \equiv r^{bi}$

определить другой полный путь Ω_s назовем производящим. На основании лемм 3 и 4 запишем соотношения

$$\varphi(\Omega') = \varphi(\Omega_0) + r^b, L(\Omega') = L(\Omega_0) + \alpha(r^b), \quad (11)$$

которые в дальнейшем используются в алгоритме поиска k -кратчайших путей графа.

Введенные математические объекты позволяют строить упорядоченную структуру отношений между полными путями сетевого графа. Это позволяет эффективно решать численные задачи на данных моделях.

Применительно к разработке описываемого алгоритма рассматривается задача поиска упорядоченного множества полных путей

$$\{\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_k\}, L(\Omega_i) \leq L(\Omega_{i+1}), i \in [0, k-1]. \quad (12)$$

Система отношений между путями строится относительно полного пути Ω_0 , имеющего минимальную длину $\Omega_0 : L(\Omega_0) = \min_{\Omega_j \in \Omega} \{L(\Omega_j)\}$, который может

быть легко найден одним из известных алгоритмов, например [13, 14]. Данная система описывается иерархической многоуровневой структурой производящих p -контуров кратчайшего пути Ω_0 в виде графа $\mathbf{G} = (\mathbf{R}_0, \mathbf{V})$, $\mathbf{V} = \mathbf{R}_0 \times \mathbf{R}_0$. Здесь \mathbf{R}_0 – полное множество производящих p -контуров, а \mathbf{V} – множество отношений между ними, связывающих производящие p -контур смежных уровней. Так для верхнего 0-го уровня связь p -контуров² $\mathbf{R}_{00} = \{r_0^b\}$ с p -контурами следующего 1-го уровня \mathbf{R}_{01} представлена соотношением

$$r_1^{be} = r_0^b + r^e; \alpha(r_1^{be}) = \alpha(r_0^b) + \alpha(r^e), \quad (13)$$

где b – вершина сечения пути Ω_0 ; e – вершина сечения пути, образованного p -контуром r_0^b (11),

² Дополнительный нижний индекс введен для обозначения номера уровня в системе производящих p -контуров. [An additional subscript is introduced to denote the level number in the system of generating p -contours.]

расположенная на этом пути левее вершины b (т.е. $e < b$)³. Объединение по уровням определяет все множество производящих p -контуров $\mathbf{R}_0 = \bigcup_Z \mathbf{R}_{0Z}$.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Ниже приведен алгоритм в менее компактном виде, исключающем циклы, с целью наглядного показа конечности числа выполняемых шагов.

Шаг 1. Найти полный путь Ω_0 , имеющий минимальную длину.

Шаг 2. Упорядочить множество $\mathbf{R}_{00} = \{r_1, r_2, r_3, \dots\}$ производящих p -контуров 0-го уровня в порядке возрастания их значений⁴ и исключить из дальнейшего рассмотрения p -контур, стоящие в полученной последовательности ниже k -го места; $\bar{\mathbf{R}} = \mathbf{R}_{00}$. Найти полный путь Ω_1 через соотношения (11), используя p -контур r_1 , стоящий в последовательности первым.

Шаг 3. Включить в множество $\bar{\mathbf{R}}$ p -контур следующего уровня, определяемые p -контуром r_1 через соотношения (13) по всем вершинам сечения, исключив сам p -контур r_1 . Упорядочить множество $\bar{\mathbf{R}}$ согласно соотношению $\alpha(r_i) \leq \alpha(r_{i+1})$ и исключить из дальнейшего рассмотрения p -контур, стоящие в полученной последовательности ниже $(k-1)$ места.

Найти полный путь Ω_2 через соотношения (11), используя p -контур r_1 .

.....

Шаг (s). Включить в множество $\bar{\mathbf{R}}$ p -контур следующего уровня, определяемые p -контуром r_1 через соотношения (13) по всем вершинам сечения, исключив сам p -контур r_1 . Упорядочить множество $\bar{\mathbf{R}}$ согласно соотношению $\alpha(r_i) \leq \alpha(r_{i+1})$ и исключить из дальнейшего рассмотрения p -контур, стоящие в полученной последовательности ниже $[k - (s - 2)]$ места⁵.

³ Это условие связано с ориентацией на вершину входа x' при построении элементарных p -контуров (см. *определение 5*). [This condition is related to the orientation to the input vertex x' when constructing elementary p -contours (see *Definition 5*).]

⁴ Упрощенное обозначение производящих контуров введено с целью лучшего понимания работы алгоритма. Нижний индекс показывает место контура в упорядоченном множестве. [A simplified designation of generating contours was introduced in order to better understand the operation of the algorithm. The subscript shows the place of the contour in the ordered set.]

⁵ Случай, когда количество элементов множества \mathbf{R}_0 меньше $[k - (i - 2)]$ является частным. В этом случае не происходит исключения контуров из множества, что не влияет на ход всех рассуждений и на конечный результат. [The particular case is when the number of elements of the set \mathbf{R}_0 is less than $[k - (i - 2)]$. In this case, contours are not excluded from the set, which does not affect the course of all reasoning and the final result.]

Найти полный путь Ω_{s-1} через соотношения (11), используя p -контур r_1 .

.....

Шаг $(k + 1)$. Включить в множество $\bar{\mathbf{R}}$ p -контур следующего уровня, определяемые p -контуром r_1 через соотношения (13) по всем вершинам сечения, исключив сам p -контур r_1 . Упорядочить множество $\bar{\mathbf{R}}$ согласно соотношению $\alpha(r_i) \leq \alpha(r_{i+1})$ и исключить из дальнейшего рассмотрения p -контур, стоящие в полученной последовательности ниже $[k - (k - 1)] = 1$ места.

Найти полный путь Ω_k через соотношения (11), используя p -контур r_1 .

Реализация алгоритма опирается на поиск производящих p -контуров и полного пути Ω_0 , имеющего минимальную длину. Данная задача эффективно решается методом динамического программирования. Основное рекуррентное функциональное соотношение Беллмана для задачи поиска кратчайшего пути⁶ Ω_{\min}^{lt} , соединяющего вершину входа (x_1) с любой вершиной x_t , запишется в виде

$$L(\Omega_{\min}^{lt}) = \min_i \{ \varepsilon(x_i) + L(\Omega_{\min}^{li}) \}, i \in \mathbf{I}_t, \quad (14)$$

где \mathbf{I}_t – подмножество номеров вершин графа, определяемое условием $\forall x_i (i \in \mathbf{I}_t) \exists u_y$ такая, что $x_i = u_y^-, x_t = u_y^+$. Элемент из \mathbf{I}_t , являющийся оптимальной политикой, определяемой (14), обозначим как i_0 .

Для поиска производящих p -контуров, базирующихся по вершине сечения t необходимо задать еще одно функциональное соотношение в виде

$$L(\Omega_j^{lt}) = \varepsilon(x_t) + L(\Omega_{\min}^{lj}), j \in \mathbf{J}_t, \mathbf{J}_t = \mathbf{I}_t / i_0, \quad (15)$$

где Ω_j^{lt} – путь, соединяющий вершины x_1 и x_t и проходящий через вершину x_j (рис. 3).

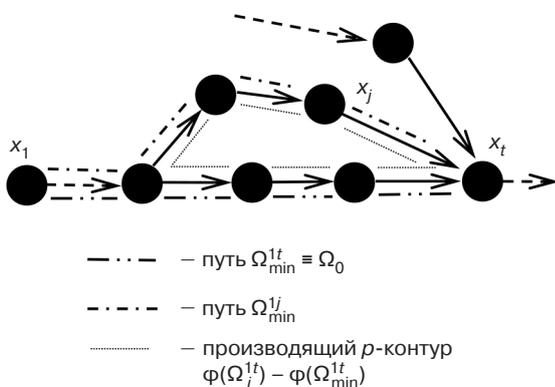


Рис. 3. Графическое пояснение к приведенным выкладкам

⁶ Верхние индексы показывают номера соединяемых вершин. [The superscripts show the numbers of connected vertices.]

Соотношение (15) предполагает наличие в методе динамического программирования подоптимальных политик, наличие которых было показано в свое время Р. Беллманом [34]. Данное соотношение определяет множество инцидентных дуг $\{(x_j, x_t)\}$, $j \in \mathbf{J}_t$ в вершине сечения x_t и соответствующих им производящих p -контуров через знание путей Ω_{\min}^{lj} (см. определение 5).

В результате была выполнена программная реализация алгоритма на языке программирования Delphi. Выполненное тестирование программы подтвердило работоспособность и эффективность представленного алгоритма.

ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА

Для доказательства работоспособности построенного алгоритма необходимо убедиться в справедливости следующих положений:

- во-первых, любой производящий p -контур полного пути Ω_0 описывается системой $\mathbf{G} = (\mathbf{R}_0, \mathbf{V})$;
- во-вторых, не происходит потерь в окончательном решении в процессе работы алгоритма;
- в-третьих, пути, найденные в результате работы алгоритма, удовлетворяют условию (12).

Справедливость первого положения подтверждается следующей теоремой.

Теорема 1. Любой производящий p -контур полного пути Ω_0 описывается системой $\mathbf{G} = (\mathbf{R}_0, \mathbf{V})$.

Доказательство. Пусть r_x – произвольно выбранный производящий p -контур пути Ω_0 . Покажем, что этот p -контур описывается одним из уровней системы $\mathbf{G} = (\mathbf{R}_0, \mathbf{V})$.

Обязательно существует такая дуга u_0 , инцидентная пути Ω_0 с вершиной сечения b_0 , что $u_0 \in \varphi(r_x)$. Этой дуге соответствует базирующийся по Ω_0 элементарный p -контур $g^{u_0} = r^{b_0}$.

Если $r^{b_0} = r_x$, то p -контур r_x описывается системой $\mathbf{G} = (\mathbf{R}_0, \mathbf{V})$ на 0-м уровне. Если равенство не выдерживается, тогда $\alpha(r^{b_0}) \leq \alpha(r_x)$, что следует из определения 5, а следовательно справедливо неравенство $L(\Omega_1) \leq L(\Omega_x)$, где Ω_1 и Ω_x – полные пути, определяемые p -контуром r^{b_0} и r_x через соотношения (11), т.е.

$$\varphi(\Omega_1) = \varphi(\Omega_0) + r^{b_0}, L(\Omega_1) = L(\Omega_0) + \alpha(r^{b_0}), \quad (16)$$

$$\varphi(\Omega_x) = \varphi(\Omega_0) + r_x, L(\Omega_x) = L(\Omega_0) + \alpha(r_x). \quad (17)$$

Вычитая почленно равенства (16) и (17) и преобразовывая, получим $\varphi(\Omega_x) = \varphi(\Omega_1) + (r_x - r^{b_0})$, где $(r_x - r^{b_0})$ – производящий p -контур пути Ω_1 . Причем его значение (получается тем же вычитанием равенств (16) и (17)) равно $\alpha(r_x) - \alpha(r^{b_0}) \geq 0$.

Так как $u_0 \in \Omega_1$, то вершина сечения b_1 p -контура $(r_x - r^{b_0})$ находится левее b_0 .

Переходим к следующему аналогичному шагу рассуждений. Существует такая дуга u_1 , инцидентная пути Ω_1 с вершиной сечения b_1 , что $u_1 \in \varphi'(r_x - r^{b_0})$. Этой дуге соответствует базирующийся по Ω_0 элементарный p -контур $g^{u_1} = r^{b_1}$.

Если $r^{b_1} = r_x - r^{b_0}$, тогда p -контур $r_x = r^{b_0} + r^{b_1}$, т.е. описывается системой $\mathbf{G} = (\mathbf{R}_0, \mathbf{V})$ на 1-м уровне. Если равенство не выдерживается, тогда $\alpha(r^{b_1}) \leq \alpha(r_x - r^{b_0})$ или $\alpha(r_x) \geq \alpha(r^{b_0}) + \alpha(r^{b_1})$, а, следовательно, $L(\Omega_2) \leq L(\Omega_x)$, где Ω_2 – полный путь, определяемый p -контуром r^{b_1} через соотношение (11) как $\varphi(\Omega_2) = \varphi(\Omega_1) + r^{b_1}$ или с учетом (16)

$$\begin{aligned} \varphi(\Omega_2) &= \varphi(\Omega_0) + r^{b_0} + r^{b_1}, \\ L(\Omega_2) &= L(\Omega_0) + \alpha(r^{b_0} + r^{b_1}). \end{aligned} \quad (18)$$

Вследствие этого по аналогии существует производящий p -контур пути Ω_2 в виде $(r_x - r^{b_0} - r^{b_1})$, $\alpha(r_x - r^{b_0}) - \alpha(r^{b_1}) \geq 0$.

Таким образом, на любом N -м шаге рассуждений невыполнение условия равенства

$$r^{b_N} = r_x - r^{b_0} - r^{b_1} - \dots - r^{b_{N-1}} \quad (19)$$

влечет переход к следующему шагу. Но, поскольку количество шагов ограничено, то на определенном шаге равенство (19) будет выдержано (т.е. r^{b_N} будет элементарным p -контуром). Это означает, что p -контур r_x пути Ω_0 опишется системой $\mathbf{G} = (\mathbf{R}_0, \mathbf{V})$ на $(N - 1)$ уровне.

Ограниченность числа шагов подтверждается следующими соображениями. Во-первых, выбираемая на любом шаге инцидентная дуга принадлежит пути Ω_x , а, во-вторых, вершина сечения, как было отмечено выше, находится левее выбранной на предыдущем шаге. Поскольку количество дуг пути Ω_x ограничено, то и ограничено количество шагов основного рассуждения.

Поскольку p -контур r_x был выбран произвольным, то условие теоремы можно считать доказанным.

Для проверки второго положения введем в рассмотрение вектор $\mathbf{Q}_j = [\alpha(r_{1j}), \alpha(r_{2j}), \dots, \alpha(r_{(k+1)j})]$, элементами которого являются значения p -контуров, составляющих множество $\bar{\mathbf{R}}$ при работе алгоритма на этапе определения пути Ω_j (номер пути определяет второй нижний индекс в обозначении этих p -контуров). Напомним, что элементы вектора \mathbf{Q}_j образуют неубывающую последовательность.

Введем также вектор $\mathbf{W} = [\alpha(r_{k1}), \alpha(r_{(k-1)2}), \dots, \alpha(r_{1k})]$ (смысловое значение индексов соответствует вектору \mathbf{Q}_j), элементы которого $\alpha(r_{(k+1)j})$ – значения p -контуров, стоящих на последнем месте во множестве $\bar{\mathbf{R}}$ на этапе определения пути Ω_j .

Теорема 2. Элементы вектора \mathbf{W} образуют невозрастающую последовательность.

Доказательство. Рассмотрим произвольно выбранный j -й элемент вектора \mathbf{W} , т.е. $\alpha(r_{(k+1)j})$, который одновременно является последним элементом вектора \mathbf{Q}_j . Нас интересует процесс перехода при работе алгоритма от вектора \mathbf{Q}_j к вектору \mathbf{Q}_{j+1} с точки зрения появления нового элемента $\alpha(r_{(k-j)(j+1)})$ вектора \mathbf{W} . Он состоит из следующих этапов:

- исключается первый элемент вектора \mathbf{Q}_j ;
- к оставшимся элементам добавляются новые, соответствующие включаемым в рассмотрение p -контурам нижнего уровня;
- упорядочение полученного множества;
- исключение из дальнейшего рассмотрения лишних p -контуров.

Исключение первого элемента вектора \mathbf{Q}_j не может повлиять на выбор элемента $\alpha(r_{(k-j)(j+1)})$.

Результат работы последующих процедур не изменится, если их производить несколько в ином порядке. К оставшимся элементам вектора \mathbf{Q}_j (их количество теперь соответствует необходимому количеству элементов вектора \mathbf{Q}_{j+1}) будем добавлять по одному элементу нового множества значений p -контуров. После каждого такого добавления будем осуществлять упорядочение множества $\bar{\mathbf{R}}$ и исключение лишнего элемента.

Элементы вектора \mathbf{Q}_{j+1} перед добавлением новых элементов определяются следующим образом: $\alpha(r_{1(j+1)}) = \alpha(r_{2j})$, $\alpha(r_{2(j+1)}) = \alpha(r_{3j})$, ..., $\alpha(r_{(k-j)(j+1)}) = \alpha(r_{(k+1)j})$. Для добавляемого элемента $\alpha(r_y)$ существуют две альтернативы: либо $\alpha(r_y) \geq \alpha(r_{(k+1)j})$, либо $\alpha(r_{(t+1)j}) \geq \alpha(r_y) \geq \alpha(r_{tj})$, $t \in [2, k-j]$. В первом случае исключается из дальнейшего рассмотрения именно элемент $\alpha(r_y)$, что не изменит упорядоченного положения оставшихся элементов вектора \mathbf{Q}_j . Во втором случае после упорядочения элемент $\alpha(r_y)$ займет место $\alpha(r_{(t+1)j})$, элемент $\alpha(r_{(t+1)j})$ – место $\alpha(r_{(t+2)j})$ и т.д.

В конечном счете, элемент $\alpha(r_{(k-j)j})$ займет место элемента $\alpha(r_{(k+1)j})$, который будет удален. Но, поскольку $\alpha(r_{(k-j)j}) \leq \alpha(r_{(k+1)j})$ (в силу определения вектора \mathbf{Q}_j), то и в этом случае не произойдет увеличения значения последнего элемента, т.е. элемент $\alpha(r_{(k-j)(j+1)})$ не может быть больше элемента $\alpha(r_{(k+1)j})$.

Так как в качестве j -го был выбран произвольный элемент вектора \mathbf{W} , то утверждение теоремы можно считать доказанным.

С помощью теоремы 2 нетрудно доказать, что не происходит потерь в окончательном решении при

работе алгоритма. В самом деле, потери могут произойти только в процедуре исключения из дальнейшего рассмотрения p -контуров после их упорядочения на каждом шаге⁷. Однако на любом шаге работы алгоритма значения исключаемых p -контуров не меньше элемента $\alpha(r_{(k+1-j)_j})$ вектора \mathbf{Q}_j . На основании *теоремы 2* можно заключить, что эти значения также заведомо не меньше последующих элементов вектора \mathbf{W} : $\alpha(r_{(k-j)(j+1)})$, $\alpha(r_{(k-j-1)(j+2)})$, ..., $\alpha(r_{1k})$, т.е. они не должны подлежать рассмотрению на оставшихся шагах работы алгоритма и не могут входить в окончательное решение.

Для проверки последнего положения введем в рассмотрение вектор, состоящий из первых элементов векторов $\mathbf{Q}_j, j \in [1, k]$: $\bar{\mathbf{W}} = [\alpha(r_{11}), \alpha(r_{12}), \dots, \alpha(r_{1k})]$, участвующих в формировании окончательного решения через соотношения (11). Тогда справедливость выполнения условия (12) подтверждает следующая теорема.

Теорема 3. Элементы вектора $\bar{\mathbf{W}}$ образуют убывающую последовательность.

Доказательство. Рассмотрим произвольно выбранный j -й элемент вектора $\bar{\mathbf{W}}$ – $\alpha(r_{1j})$. Этот элемент одновременно является первым элементом вектора \mathbf{Q}_j . В процессе перехода от вектора \mathbf{Q}_j к вектору \mathbf{Q}_{j+1} добавляемое новое множество p -контуров характеризуется тем, что их значения заведомо не меньше $\alpha(r_{1j})$, т.к. они находятся на следующем уровне после p -контура r_{1j} и определяются этим p -контуром через соотношения (13).

После упорядочения множества $\bar{\mathbf{R}}$ элементом $\alpha(r_{1(j+1)})$ станет либо элемент $\alpha(r_{2j})$, либо наименьший из добавляемого множества $\alpha_{\min}(r_{\text{add}})$, т.е. $\alpha(r_{1(j+1)}) = \min\{\alpha(r_{2j}), \alpha_{\min}(r_{\text{add}})\}$. Но, так как $\alpha(r_{2j}) \geq \alpha(r_{1j})$, $\alpha_{\min}(r_{\text{add}}) \geq \alpha(r_{1j})$, то $\alpha(r_{1(j+1)}) \geq \alpha(r_{1j})$.

Так как в качестве j -го был выбран любой элемент вектора $\bar{\mathbf{W}}$, то последнее неравенство *доказывает справедливость утверждения теоремы*.

Оценка производительности алгоритма проводилась в сравнении с алгоритмом двойного поиска («double sweep»), по которому автором данного алгоритма были проведены серьезные вычислительные эксперименты [35]. Причем аналитическая оценка производительности по алгоритмам данной категории далека от реальных результатов, т.к. время вычислений сильно зависит от конфигурации используемых сетей, а выполняемые обобщенные операции при

⁷ Исключение контура, стоящего первым, не приводит к потерям, поскольку с одной стороны он используется для получения решения, а с другой – в рассмотрение попадают все порождаемые им контуры нижнего уровня. [The exclusion of the contour that is the first does not lead to losses, since on the one hand it is used to obtain a solution, and on the other hand, all lower-level contours generated by it fall into consideration.]

выполнении алгоритма не совсем однозначно отображаются в элементарные операции сложения и сравнения. Так для упомянутого алгоритма, который относится к классу наиболее производительных алгоритмов данной категории, при аналитической оценке время вычислений имеет порядок $O(kN^3)$ [19, 20], в то время как вычислительные эксперименты показывают другие результаты [35] – вместо линейной наблюдается полиномиальная зависимость времени вычислений τ от количества кратчайших путей k :

$$\tau = 0.8457 + 0.1616 k + 0.0260 k^2.$$

При этом следует заметить, что исследования [35] проводились не на сетевых графиках, а на ориентированных графах, вершины которых образовывали решетчатую структуру с наличием контуров. Размерность графов учитывалась через размеры и конфигурацию решетки, образованной вершинами. Веса дуг генерировались случайными целыми числами в диапазоне до 100. Кроме того, значительно было ограничено значение k .

Поэтому применительно к поиску подкритических путей на сетевых графиках для сравнения полученного в работе алгоритма с алгоритмом двойного поиска была проведена серия вычислительных экспериментов на микропроцессоре Intel с тактовой частотой 1.7 ГГц. Результаты зависимости времени вычислений (t) от количества подкритических путей (k) и размерной характеристики сетевых графиков (z) показаны на рис. 4. Размерная характеристика

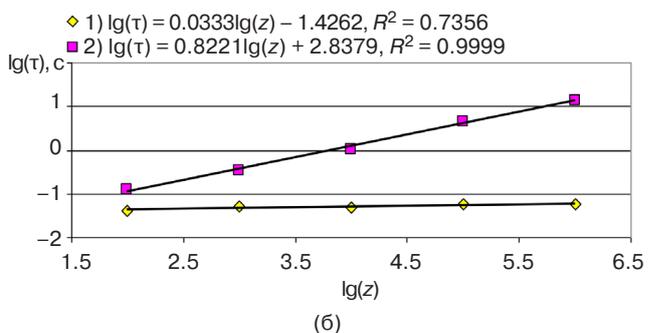
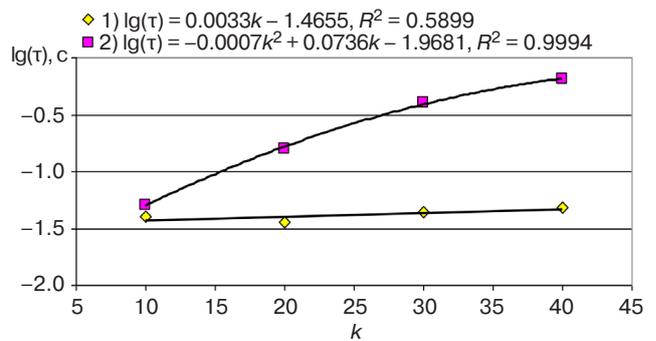


Рис. 4. Сравнительный анализ алгоритмов:
(а) $z = 1600$; (б) $k = 40$.

1 – описываемый алгоритм; 2 – алгоритм двойного поиска

представляет собой произведение общего количества дуг графа на количество дуг в пути максимальной длины, соединяющем вершины входа и выхода сети.

Более высокая производительность представленного в работе алгоритма объясняется его специальной ориентацией на рассматриваемый класс сетевых графов, в то время как другие алгоритмы, в т.ч. и двойного поиска, являются более универсальными в отношении просчитываемых графов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен алгоритм, реализующий поиск k -кратчайших путей на ориентированных графах без контуров с отношением строгого порядка, используемых в качестве моделей (так называемых сетевых графиков) в задачах сетевого планирования и управления проектами. Это позволяет находить подкритические пути на данных моделях с целью выравнивания и оптимизации используемых в проекте ресурсов.

Вышеназванные особенности используемых графов позволили выстроить многоуровневую структуру отношений между специально введенными абстракциями (p -контурами), отображающими структурные элементы графов. Это послужило основой для разработки алгоритма, который был численно реализован методом динамического программирования, расширенного за счет использования дополнительного функционального соотношения.

Узкая направленность алгоритма на графы, используемые в управлении проектами, определила его высокую производительность, подтвержденную серией сравнительных вычислительных экспериментов. Эффективность алгоритма устойчива к размерам просчитываемых графов и количеству подкритических путей. Это позволяет рекомендовать его к практическому использованию в информационных системах управления проектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Hagstrom J.N. Computing the probability distribution of project duration in a PERT network. *Networks*. 1990; 20(2):231–244. <https://doi.org/10.1002/net.3230200208>
2. Kamburowski J., Michael D.J., Stallmann M.F.M. Minimizing the complexity of an activity network. *Networks*. 2000;36(1):47–52. [https://doi.org/10.1002/1097-0037\(200008\)36:1%3C47::AID-NET5%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1097-0037(200008)36:1%3C47::AID-NET5%3E3.0.CO;2-Q)
3. Bianco L., Caramia M. A new formulation of the resource-unconstrained project scheduling problem with generalized precedence relations to minimize the completion time. *Networks*. 2010;56(4):263–271. <https://doi.org/10.1002/net.20388>
4. Brennan M. *PERT and CPM: a selected bibliography*. Monticello, Ill.: Council of Planning Librarians, 1968. 11 p.
5. Alagheband A., Soukhakian M.A. An efficient algorithm for calculating the exact overall time distribution function of a project with uncertain task durations. *Indian Journal of Science and Technology*. 2012;5(9):3310–3316. <https://doi.org/10.17485/ijst/2012/v5i9.20>
6. Damci A., Polat G., Akin F.D., et al. Use of float consumption rate in resource leveling of construction projects. *Front. Eng. Manag.* 2022;9:135–147. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0118-0>
7. Willis R.J. Critical path analysis and resource constrained project scheduling – Theory and practice. *Eur. J. Oper. Res.* 1985;21(2):149–155. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(85\)90026-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90026-8)
8. Bowers J.A. Criticality in resource constrained networks. *J. Oper. Res. Soc.* 1995;46(1):80–91. <https://doi.org/10.1057/jors.1995.9>
9. Shtub A. The trade-off between the net present cost of a project and the probability to complete it on schedule. *J. Oper. Manag.* 1986;6(3–4):461–470. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(86\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0272-6963(86)90017-3)
10. Shtub A. The integration of CPM and material management in project management. *Constr. Manag. Econ.* 1988;6(4):261–272. <https://doi.org/10.1080/01446198800000023>
11. Ananthanarayanan P.S. Project Technology and Management. In: S. Seetharaman (Ed.). *Treatise on Process Metallurgy*. V. 3. *Industrial Processes*. Elsevier; 2014. P. 1145–1191. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00038-9>
12. García-Heredia D., Molina E., Laguna M., et al. A solution method for the shared resource-constrained multi-shortest path problem. *Expert Systems with Applications*. 2021;182:115193. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115193>
13. Fulkerson D.R. Expected critical path lengths in PERT networks. *Oper. Res.* 1962;10(6):745–912. <https://doi.org/10.1287/opre.10.6.808>
14. Bellman R. On a routing problem. *Quart. Appl. Math.* 1958;16(1):87–90. <https://doi.org/10.1090/qam/102435>
15. Stern R., Goldenberg M., Saffidine A., et al. Heuristic search for one-to-many shortest path queries. *Ann. Math. Artif. Intell.* 2021;89:1175–1214. <https://doi.org/10.1007/s10472-021-09775-x>
16. Dreyfus S.E. An appraisal of some shortest-path algorithms. *Operations Research*. 1969;17(3):395–412. <https://doi.org/10.1287/opre.17.3.395>
17. Clarke S., Krikorian A., Rausan J. Computing the N best loopless paths in a network. *J. Soc. Indust. Appl. Math.* 1963;11(4):1096–1102. <https://doi.org/10.1137/0111081>
18. Pollack M. Solutions of the k th best route through a network – A review. *J. Math. Anal. Appl.* 1961;3(3): 547–559. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(61\)90076-2](https://doi.org/10.1016/0022-247X(61)90076-2)
19. Shier D.R. Iterative methods for determining the k shortest paths in a network. *Networks*. 1976;6(3):205–229. <https://doi.org/10.1002/net.3230060303>
20. Shier D.R. On algorithms for finding the k shortest paths in a network. *Networks*. 1979;9(3):195–214. <https://doi.org/10.1002/net.3230090303>

21. Minięka E., Shier D.R. A note on an algebra for the k best routes in a network. *IMA J. Appl. Math.* 1973;11(2): 145–149. <https://doi.org/10.1093/imamat/11.2.145>
22. Eppstein D. Finding the k shortest paths. *SIAM J. Comput.* 1999;28(2):652–673. <https://doi.org/10.1137/S0097539795290477>
23. Yen J.Y. Finding the K shortest loopless paths in a network. *Manag. Sci.* 1971;17(11–Theory Series):712–716. Available from URL: <http://www.jstor.org/stable/2629312>
24. Hershberger J., Maxel M., Suri S. Finding the k shortest simple paths: A new algorithm and its implementation. *ACM Trans. Algor.* 2007;3(4): Art. 45(19 p.) <https://doi.org/10.1145/1290672.1290682>
25. Chen B.Y., Chen X.-W., Chen H.-P., et al. A fast algorithm for finding K shortest paths using generalized spur path reuse technique. *Transactions in GIS.* 2021;25(1): 516–533. <https://doi.org/10.1111/tgis.12699>
26. Hu X.-B., Zhang C., Zhang G.-P., et al. Finding the k shortest paths by ripple-spreading algorithms. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2020;87:Art.103229. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.023>
27. Hamed A.Y. A genetic algorithm for finding the k shortest paths in a network. *Egypt. Inform. J.* 2010;11(2):75–79. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2010.10.004>
28. Hu X.-B., Zhou J., Li H., et al. Finding the k shortest paths for co-evolutionary path optimization. In: *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence.* November 18–21, 2018; Bangalore, India. P. 1906–1912. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2018.8628928>
29. Liu G., Qiu Z., Chen W. An iterative algorithm for single-pair K shortest paths computation. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications.* 2015;12(Art. 30):305–314. Available from URL: <https://wseas.org/wseas/cms.action?id=10185>
30. Guo J., Jia L. A new algorithm for finding the K shortest paths in a time-schedule network with constraints on arcs. *J. Algorithms Comput. Technol.* 2017;11(2):170–177. <https://doi.org/10.1177/1748301816680470>
31. Xu W., He S., Song R., et al. Finding the K shortest paths in a schedule-based transit network. *Comput. Oper. Res.* 2012;39(8):1812–1826. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.02.005>
32. Jin W., Chen S., Jiang H. Finding the K shortest paths in a time-schedule network with constraints on arcs. *Comput. Oper. Res.* 2013;40(12):2975–2982. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.07.005>
33. Kaufmann A., Debazeille G. *La méthode du chemin critique.* Paris: Dunod; 1964. 170 p.
34. Bellman R., Kalaba R. On k th best policies. *J. Soc. Ind. Appl. Math.* 1960;8(4)582–588. Available from URL: <https://www.jstor.org/stable/2099049>
35. Shier D.R. Computational Experience with an algorithm for finding the k shortest paths in a network. *J. Res. Natl. Bureau Stand.* 1974;78B(3)139–165. <https://doi.org/10.6028/JRES.078B.020>

Об авторе

Анфёров Михаил Анисимович, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Предметно-ориентированные информационные системы» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anfyorov@inbox.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2853-6184>

About the author

Mikhail A. Anfyorov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Domain-Specific Information Systems Department, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anfyorov@inbox.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2853-6184>

УДК 004.685.5
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-70-80>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Логико-семантическое определение цифрового двойника производственного процесса

А.В. Речкалов ¹,
А.В. Артюхов ¹,
Г.Г. Куликов ²,[@]

¹ Объединенная двигателестроительная корпорация, Москва, 109147 Россия

² Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 450008 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: gennadyg_98@yahoo.com

Резюме

Цели. В настоящее время активно развивается методология обобщения и представления знаний об исследуемых предметно-ориентированных областях (ПОО) на базе «модельной гипотезы» определения выделяемых объектов и их связей. Такие системные модели определяют знания о ПОО в любой информационной системе. Методы системной инженерии уже сегодня позволяют создавать информационные модели реальных объектов, дополненные виртуальными составляющими, и наоборот, модели виртуальных объектов, дополненные реальными составляющими. Так, например, наличие информационных моделей технологических и производственных объектов и их связей с реальным оборудованием позволит создавать и управлять реально-виртуальными производственными процессами (ПП) в соответствии с методологией Industry 4. В теоретическом аспекте в основе разработки системных моделей объектов и их связей в ПОО лежит проблема формального непротиворечивого описания (грамматического исчисления) функциональных закономерностей данного множества объектов и их связей. Цель исследования – разработать подход и принципы методологии системного моделирования производственных объектов и их связей для замкнутого управления (прогнозирования, планирования, учета, регулирования и др.) в производственной среде машиностроительного предприятия в форме их цифровых двойников (ЦД).

Методы. Используются базовые положения теории множеств, теории графов, и, в частности, положения теории категорий множеств, положения теории формальной логики, теории управления. Применены методы теории системной инженерии, методы организации и управления машиностроительным производством.

Результаты. Обоснован подход к формированию метаструктуры цифрового двойника производственного процесса (ЦД ПП) на основе моделей производственных объектов и их связей, разработаны порядок и правила построения системной модели ЦД ПП, разработан подход к структурно-параметрической идентификации моделей ЦД с учетом логико-семантических ограничений.

Выводы. Представлен пример идентификации базового множества объектов ЦД организации ПП на основе логико-семантического анализа производственной деятельности и положений единых стандартов Единой системы технологической подготовки производства для машиностроительного производства как исследуемой предметной области, подтверждающий основные положения предлагаемой методологии построения ЦД ПП.

Ключевые слова: системные модели, производственные процессы, информационные системы, цифровой двойник, digital twin, система поддержки принятия решения, smart factory, система планирования

• Поступила: 08.07.2022 • Доработана: 19.09.2022 • Принята к опубликованию: 14.11.2022

Для цитирования: Речкалов А.В., Артюхов А.В., Куликов Г.Г. Логико-семантическое определение цифрового двойника производственного процесса. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):70–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-70-80>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Logical-semantic definition of a production process digital twin

Alexander V. Rechkalov ¹,
Alexander V. Artyukhov ¹,
Gennady G. Kulikov ², @

¹ *United Engine Corporation, Moscow, 109147 Russia*

² *Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008 Russia*

@ *Corresponding author, e-mail: gennadyg_98@yahoo.com*

Abstract

Objectives. A methodology currently being developed for generalizing and presenting knowledge about studied subject-oriented areas is based on a “model hypothesis” for determining the distinguished objects and their relationships. Such system models can be used in any information system to define the knowledge about subject-oriented areas. Systems engineering methods already make it possible to create information models of real objects supplemented by virtual components, and vice versa, i.e., models of virtual objects supplemented by real components. So, for example, the availability of information models of technological and production facilities and their connections with real equipment allow the creation and management of real-virtual production processes (PP) in accordance with Industry 4.0 methodologies. From a theoretical aspect, the development of system models of objects and their connections in subject-oriented areas is based on the problem of a formal consistent description (grammatical calculus) of the functional regularities of a given set of objects and their relationships. The purpose of the study is to develop an approach and principles of methodology for system modeling of production facilities and their connections to provide closed-loop control (forecasting, planning, accounting, regulation, etc.) in the production environments of machinery enterprises taking the form of their digital twins (DTs).

Methods. The basic provisions of the theory of sets and graph theory—in particular, the provisions of the theory of categories of sets—are used according to the formal logic and control theories. System Engineering methods are also applied in the organization and management of machinery production.

Results. The approach to the formation of a metastructure of production process digital twin (PPDT) based on the models of production facilities and their relationships is substantiated. The procedure and rules for constructing a PPDT system model are developed along with an approach to the structural and parametric identification of DT models, taking logical and semantic restrictions into account.

Conclusions. A presented example for identifying the basic set of objects of the organization of the PPDT based on the logical-semantic analysis of production activities and the provisions of the unified standards of the unified system for technological preparation of production of machinery production as a researched subject area confirms the main provisions of the proposed methodology for constructing the PPDT.

Keywords: system models, production processes, information systems, digital twin, decision support system, smart factory, planning system

• Submitted: 08.07.2022 • Revised: 19.09.2022 • Accepted: 14.11.2022

For citation: Rechkalov A.V., Artyukhov A.V., Kulikov G.G. Logical-semantic definition of a production process digital twin. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):70–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-70-80>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общество находится в процессе кардинальных изменений, определяемых требованиями четвертой промышленной революции, которая требует активной трансформации существующих систем индустриального производства, управления технологиями, транспортировкой и поставками ресурсов и др.¹. Основой и главной инфраструктурой нового уклада жизнеустройства, как отмечается в [1], становятся информационные технологии (ИТ). Принципиальное значение в рамках формирования нового уклада при этом приобретает комплексное, интегрированное представление о том, как технологии изменят нашу жизнь, как они преобразуют среду нашего понимания². Согласно результатам исследований аналитической компании IDC, к 2025 г. доля цифровой экономики вырастет до 58.2% в общем объеме мировой экономики [2].

В условиях постоянно усложняющихся индустриальных технологий, усиления конкуренции, ускорения освоения новой техники, внедрение новых методов координации и взаимодействия как во внешней среде, так и в рамках отдельных предприятий становится не только насущной необходимостью, но и ключом к жизненно важной трансформации индустриальных моделей [3]. Цифровые технологии существенно расширяют возможности взаимодействия, повышают эффективность производства и поставок, улучшают распределение и использование ресурсов, реализуют новые методы управления запасами. Появляется возможность широкой системной оптимизации управления производственными процессами и использованием ресурсов.

В последние годы развитие ИТ все больше ориентируется на формирование технологий разработки и применения цифрового двойника (digital twin).

¹ Артюхов А.В. *Методы и модели организации производственного процесса многономенклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления*: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Самара; 2017. 20 с. [Artyukhov A.V. *Methods and models of the organization of the production process of a multi-product machinery enterprise as a control object*: Cand. Sci. Thesis (Eng.). Samara; 2017. 20 p. (in Russ.).]

² Хузмиев И.К. Информационные технологии – инфраструктура четвертой промышленной революции. *Россия: тенденции и перспективы развития*. 2017;12(3):274–277. [Khuzmiev I.K. Information technology is the infrastructure of the fourth industrial revolution. *Russia: trends and development prospects*. 2017;12(3):274–277 (in Russ.).]

Система цифровых двойников (ЦД), в отличие от традиционных решений, ориентированных на периодические пересчеты планов, может учитывать самые разные нештатные ситуации, которые удастся предсказать, анализируя огромный поток данных. Возможность обработки и анализа данных о текущем состоянии производства в соответствии с планами в режиме реального времени позволяет оперативно реагировать на отклонения в производстве и устранять возникающие проблемы.

Таким образом, система ЦД позволит смоделировать не только состояние производственного процесса³, но и его динамику. Основная задача системы ЦД – в реальном времени обеспечить управление всеми факторами, влияющими на производственный процесс.

1. ПОНЯТИЕ ЦД ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Понятие цифрового двойника в науке и практике машиностроительного производства достаточно новое и еще не имеет устоявшейся терминологии [4]. Например, в статье «Цифровой двойник Digital Twin of Organization, DTO»⁴ приводятся несколько вариантов формулирования понятия ЦД:

- программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды;
- виртуальный прототип реальных производственных активов – скважины, турбины, ветроэлектрической установки и т.д.;
- цифровое представление объекта, достаточное для удовлетворения требований набора вариантов использования;
- цифровая модель конкретного физического элемента или процесса с подключениями к данным, которая обеспечивает конвергенцию между

³ В рамках данной статьи имеется в виду процесс производства продукции. [Within the framework of this article, we mean the production process.]

⁴ Цифровой двойник Digital Twin of Organization, DTO. [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_\(Digital_Twin_of_Organization,_DTO\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin_of_Organization,_DTO)). Дата обращения 23.09.2022. [Digital Twin of Organization, DTO. [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_\(Digital_Twin_of_Organization,_DTO\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin_of_Organization,_DTO)). Accessed September 23, 2022 (in Russ.).]

физическим и виртуальным состояниями с соответствующей скоростью;

- модель, максимально точно описывающая реальные причинно-следственные зависимости между производственными, экономическими, финансовыми и организационными показателями компании.

Можно привести более общую формулировку: «Цифровой двойник – это цифровое представление объекта или системы реального мира»⁵. Если определить понятие цифрового двойника полно (рефлексивно), то цифровой двойник – это цифровое системное представление реального объекта, процесса или системы в виртуальной среде.

Считается, что первоначально концепция ЦД в менеджменте была озвучена Майклом Гривзом на PLM (Product Lifecycle Management) форуме в Мичиганском университете в начале 2002 г. Концепция основывалась на взаимном соответствии и взаимодействии физической системы и ее виртуального отображения на основе виртуальной взаимосвязи [5].

Если первоначально появляются «цифровые двойники» (Digital Twin) изделий, ассоциативно определяющие в виртуальном пространстве предприятия средства и предметы труда, то при формировании интеллектуального предприятия (Smart Factory) или ЦД производственной системы (ЦД ПС) возникает необходимость формализации ЦД производственного процесса (ЦД ПП) [6]. При этом, производственный процесс может быть представлен как процесс взаимодействия средств труда (СТ), предметов труда (ПТ) и трудовых ресурсов (ТР) в пространстве и времени с целью получения результата процесса – продукта (ПР)⁶ (рис. 1).

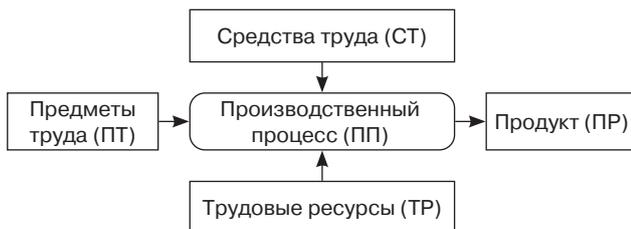


Рис. 1. Взаимодействие элементов производственного процесса

Предметы труда как элементы производственного процесса представляют собой материалы,

⁵ Digital Twin. <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin>. Дата обращения 23.09.2022. / Accessed September 23, 2022.

⁶ Артюхов А.В. *Методы и модели организации производственного процесса многоименного машиностроительного предприятия как объекта управления*: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Самара; 2017. 20 с. [Artyukhov A.V. *Methods and models of the organization of the production process of a multi-product machinery enterprise as a control object*: Cand. Sci. Thesis (Eng.). Samara; 2017. 20 p. (in Russ.).]

комплектующие изделия, полуфабрикаты, детали и сборочные единицы, а их модели являются, по существу, цифровыми двойниками-компонентами (Component Twin). Модели оборудования, инструмента, трудовых ресурсов являются ЦД ресурса (Asset Twin). Модели результата производственного процесса являются ЦД продукции (System Unit Twin). Модели процесса взаимодействия этих элементов представляют собой ЦД ПП (Process Twin) [5]. В целом совокупность этих элементов представляет собой ЦД ПС (рис. 2).

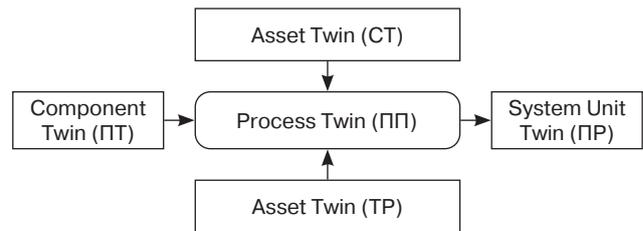


Рис. 2. Взаимодействие элементов ЦД ПС

В итоге можно согласиться с формулировкой понятия ЦД ПС: «Цифровой двойник производственной системы представляет собой цифровую модель, которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления данных о статусе, условиях работы, конфигурации продукта и состоянии ресурсов»⁷. Определение цифрового двойника как программно-аппаратного комплекса, реализующего комплексную динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотехнической системы позволяет представить процесс производства в виде контура управления, где собственно производственный процесс (ПП) выступает как объект управления, а его ЦД – как процесс управления с обратной связью (рис. 3).



Рис. 3. Процесс производства как контур управления

Исходя из этого положения можно сформулировать принципы формирования ЦД ПП на основе моделей традиционных систем АСУ: ЦД должен отражать текущее состояние производственного

⁷ ПНСТ 429-2020. *Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения*. М.: Стандартинформ; 2020. 8 с. [PNST 429-2020. *Smart manufacturing. Production digital twins. Part 1. General provisions*. Moscow: Standartinform; 2020. 8 p. (in Russ.).]

процесса и осуществлять прогноз этого состояния в форме фазовых траекторий (в пространстве состояний) планов на основе детального анализа возмущающих воздействий; вырабатывать варианты поведения системы и формировать рекомендации для принятия решений. При этом все действия совершаются в режиме реального времени.

В то же время отмечается, что для практической реализации концепции ЦД наиболее сложной является модель ЦД ПП, реализующая ряд принципиальных функций [6, 7]:

- отображение в режиме реального времени производственных процессов, протекающих в производственной системе;
- проведение расчетов для принятия управленческих решений;
- реализация процессов поддержки принятия решений, например, «что если» на основе моделирования поведения производственных процессов.

2. СТРУКТУРА ЦД ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

ЦД ПП, определяемый как отражение процесса взаимодействия СТ, ПТ и ТР с целью получения ПР, в основе содержит пять групп моделей:

- группа моделей продукции, включающая состав и взаимосвязи предметов труда в рамках продукта, в т.ч. количественные, временные, стоимостные и качественные характеристики, определяющие потребительную стоимость результата производственного процесса;
- группа моделей предметов труда, включающая модели используемых в процессе производства материалов, полуфабрикатов, покупных комплектующих изделий, а также находящихся в процессе производства деталей и сборочных единиц, полностью овеществляющихся в продукте;
- группа моделей средств труда, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного ресурса в рамках участия ресурсов в технологической операции;
- группа моделей трудовых ресурсов, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного ресурса, определяющих участие ресурсов в технологической операции;
- группа моделей технологических процессов как совокупности или последовательности технологических операций, включая количественные, временные, стоимостные и качественные характеристики взаимосвязи предметов труда и ресурсов.

Учитывая, что в данном случае модели СТ, ПТ, ТР и ПР содержат данные, только необходимые для реализации ПП, эти модели являются отражением технологического процесса, который определяет статическую (структурную) организацию производственного

процесса. Понятие «статический» в данном случае носит относительный характер. Безусловно, все приведенные модели поддерживают изменения, свойственные соответствующим физическим объектам, но эти изменения в рамках ЦД ПП отражаются, в основном, вне зависимости от его динамических характеристик. Соответственно, формулировка понятия технологического процесса как комплекса моделей технологического процесса, содержащих информацию о технологических процессах как целенаправленных действиях по изменению и (или) определению состояния предмета труда, которые могут быть отнесены к готовому изделию, его составной части или к методам обработки, формообразования и сборки⁸, соответствует содержанию статической модели ПП или цифровому двойнику организации производственного процесса (ЦД ОПП).

В общем виде модели определяются как статические, описывающие объекты в стационарных режимах их работы, и динамические, описывающие переходные процессы. Динамический характер модели ЦД ПП отражается в стандарте: «Цифровой двойник производства позволяет контролировать производство в режиме реального времени с целью динамического управления объемом производства и соответствия производственному плану»⁹. В данном случае потребности продукта во времени представляют собой входные переменные, потребности в остальных ресурсах – выходные переменные, а модель описывает неустановившийся режим производственного процесса.

Количественные и временные характеристики взаимодействия ресурсов в процессе производства, определяемые спросом на готовую продукцию, формируют исходные данные для модели планирования или ЦД планирования производственного процесса.

Структура модели планирования прежде всего зависит от структуры исходных данных, формируемых по результатам планирования спроса. Анализ моделей планирования и управления, основанный на описаниях MRP-алгоритмов¹⁰ и ERP-систем¹¹, позволяет выделить два типа данных спроса: объемно-календарный и позаказный, а также определить комплекс моделей управления ПП. Соответственно, ЦД планирования ПП может быть

⁸ ГОСТ 3.1109-82. *Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий*. М.: Издательство стандартов; 1981. 15 с. [GOST 3.1109-82. *Interstate standard. Unified system of technological documentation. Terms and definitions of basic concepts*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1981. 15 p. (in Russ.).]

⁹ ПНСТ 429-2020. *Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения*. М.: Стандартинформ; 2020. 8 с. [PNST 429-2020. *Smart manufacturing. Twins of digital production. Part 1. General provisions*. Moscow: Standartinform; 2020. 8 p. (in Russ.).]

¹⁰ MRP – manufacturing resource planning.

¹¹ ERP – enterprise resource planning.

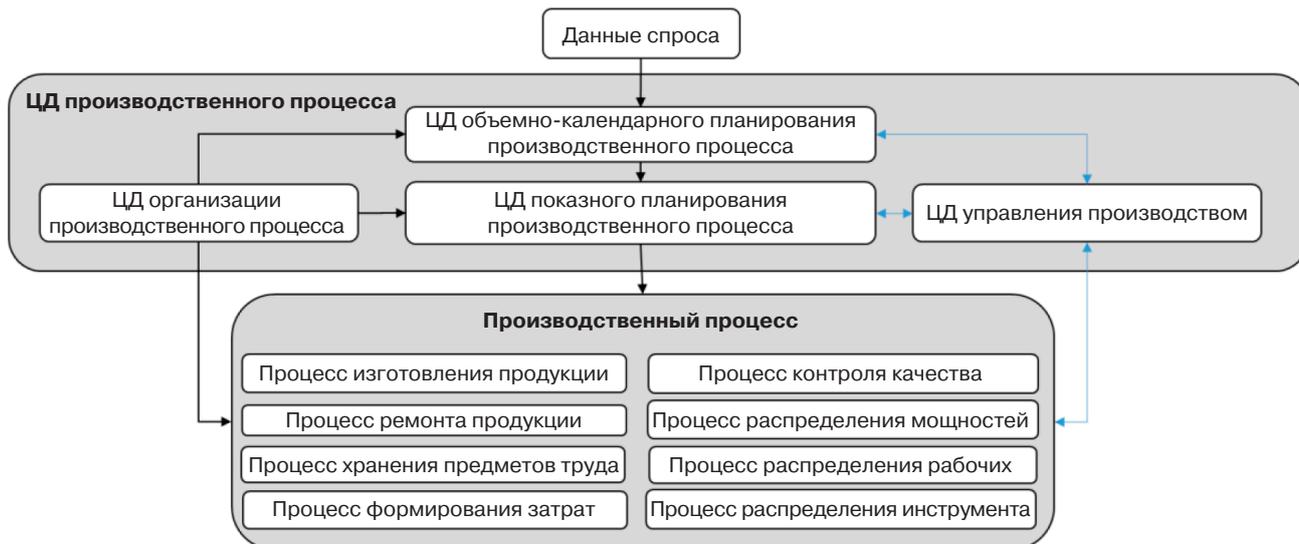


Рис. 4. Развернутая верхнеуровневая структура ЦД ПП

представлен двумя связанными ЦД: ЦД объемно-календарного планирования ПП и ЦД позаказного планирования ПП, а комплекс моделей обратной связи и управляющего воздействия – ЦД управления ПП [8].

ЦД объемно-календарного планирования реализует следующие основные функции:

- укрупненное планирование производственных мощностей;
- укрупненное планирование закупаемых изделий и материалов;
- составление главного календарного плана производства.

ЦД позаказного планирования реализует следующие основные функции:

- планирование производственных заказов;
- планирование распределения мощностей;
- планирование заказов на ремонт изделий;
- планирование заказов на хранение и распределение;
- планирование заказов на закупку.

ЦД управления производством реализует следующие основные функции:

- учет производства;
- поддержка принятия решений;
- управление прямыми производственными затратами;
- управление контролем качества;
- управление распределением инструмента.

Анализ ERP-систем позволяет также дифференцировать производственный процесс как объект управления в виде совокупности однородных по внутренней структуре, относительно самостоятельных, но взаимосвязанных процессов:

- процесс изготовления продукции;
- процесс ремонта продукции;
- процесс хранения предметов труда;
- процесс формирования затрат;
- процесс контроля качества;

- процесс распределения мощностей;
- процесс распределения рабочих;
- процесс распределения инструмента.

Соответственно, развернутая модель ЦД ПП приобретает вид совокупности взаимосвязанных контуров управления, которые можно сформулировать как функциональные области (ФО) цифрового двойника (рис. 4).

Таким образом, ЦД ПП представляет собой совокупность ЦД:

- организации производственного процесса;
- объемно-календарного планирования производства;
- позаказного планирования производства;
- управления производством.

Каждый цифровой двойник состоит из контуров управления соответствующих функциональных областей (ФО). Каждая ФО в рамках детального описания моделей может содержать трехуровневую структуру: процессы, процедуры, шаги. Соответственно, ЦД ПП представляет собой совокупность моделей, сформированную на основе состава функций каждого ЦД, соответствующих ФО и иерархического описания моделей (рис. 5).

Представленная на рис. 5 обобщенная структура ЦД ПП может быть положена в основу идентификации и построения конкретных функциональных и информационных моделей функциональных областей ЦД ПП.

3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЦД ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

В соответствии с законом о необходимом разнообразии Эшби [9] оптимальное управление достигается при условии соответствия разнообразия управляющего воздействия разнообразию управляемого. Данное свойство обеспечивается двумя факторами: полным знанием поведения управляемой системы со стороны управляющей системы и способностью



Рис. 5. Обобщенная структура ЦД ПП

превратить это знание в адекватное отражение в рамках цифрового двойника, т.е. обеспечить формируемые модели требованиям идентифицируемости и прослеживаемости. Идентифицируемость – это свойство, которому модель должна удовлетворять, чтобы была возможность получить точный вывод¹². Модель идентифицируема, если теоретически возможно узнать истинные значения основных параметров этой модели после получения из нее бесконечного числа наблюдений. Обычно модель идентифицируема только при определенных технических ограничениях, и в этом случае набор этих требований называется условиями идентификации

Понятие идентификации систем можно определить как совокупность методов для построения математических моделей динамической системы по данным наблюдений¹³. Другое определение: идентификация – это процесс построения моделей объектов различной природы. При этом процесс идентификации складывается из двух взаимосвязанных этапов: идентификации структуры моделей и идентификации параметров в моделях выбранной структуры. При построении структуры модели (или набора конкурирующих либо взаимодополняющих структур) используется априорная информация об объекте. Для каждого класса объектов формируются банки структур с сопутствующей информацией¹⁴.

¹² Идентифицируемость. Википедия. <https://ru.wikibrief.org/wiki/Identifiability>. Дата обращения 23.09.2022. [Identifiability. Wikipedia. <https://ru.wikibrief.org/wiki/Identifiability>. Accessed September 09, 2022 (in Russ.).]

¹³ Идентификация систем. Википедия. https://ru.wikipedia.org/wiki/Идентификация_систем. Дата обращения 23.09.2022. [Systems identification. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/System_identification. Accessed September 09, 2022.]

¹⁴ Бойко Р.С. О моделировании дискретно-непрерывных процессов. *Молодой ученый*. 2010;4(15):93–98. [Boiko R.S. On modeling discrete-continuous processes. *Young scientist*. 2010;4(15):93–98 (in Russ.).]

Исходя из особенностей содержания ЦД, процесс идентификации должен основываться на следующих принципиальных положениях:

- *Идентификация ЦД организации производства*, как содержащего статическую модель производственного процесса, основывается на анализе структуры и параметров технологического процесса, документированных в стандартах Единой системы технологической документации (ЕСТД).
- *Идентификация ЦД процесса объемно-календарного планирования и ЦД процесса позаказного планирования* основывается на структуре процессов, определенных в международных стандартах производственного планирования и управления APICS¹⁵, методологии MRP/ERP и параметрах, определяемых на основе анализа совокупности производственных процессов.
- *Идентификация ЦД процессов управления производством* в части процессов учета производства, анализа и принятия решений основывается на принципах Эшби [9], предполагающих обеспечение максимальной детализации планово-учетных характеристик производственного процесса, определяющих поддержание гомеостаза производственной системы.

Таким образом, для обеспечения идентифицируемости моделей ЦД ПП необходимо определить структуру и набор параметров, определяющих идентифицируемость каждого вида объектов ПП (СТ, ПТ, ТР, ПР), процессов их взаимодействия и перечень технических ограничений, определяющих условия идентификации.

Подход к идентификации структуры ЦД ПП на основе положений теории множеств, и, в частности, положений теории категорий, а также положений

¹⁵ APICS – American Production and Inventory Control Society.

формальной логики позволит сформировать методы идентификации метаструктуры ЦД на основе формализации экспертных знаний. При этом важно отметить, что концептуальной схемой верхнего уровня представления структуры ЦД, как правило, являются семантические атрибутивные описания в форме гипертекстовых и продукционных баз знаний, составляющих основу структуры экспертных систем производственного управления.

4. ПОДХОД К ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦД НА ПРИМЕРЕ ЦД ОРГАНИЗАЦИИ ПП

Рассмотрим подход к идентификации ЦД ОПП на основе формализации знаний, сформулированных в стандартах Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП)^{16, 17} путем определения семантических границ исследуемой предметной области (ПО) ПП по текстовым документам с помощью графоаналитического представления объектов ПП. В данном случае СТ (*Ctr*), ПТ (*Ptr*), ТР (*Trr*), ПР (*Pro*) представляют собой множества объектов, а ПП – множества (связей) морфизмов. При этом, если мы исключаем из рассмотрения динамические характеристики ПП (количество и время), то формируем графическое представление ЦД ОПП или граф онтологической модели, который определяет границы предметной области (ПО) и структуру ЦД ОПП. Для более корректного представления структуры объектов в составе СТ выделяем мощности (оборудование, склады, производственные площади) (*Msch*) и инструменты (инструменты и приспособления) (*Ins*) (рис. 6).

На первом этапе анализируется текстовое и табличное представление данных множеств объектов, отраженных в стандартах ЕСТД. Например, множество технологических методов $Tmt = \{tmt_1, tmt_2, \dots, tmt_n\}$ представляет собой перечень элементов структуры и характеристики методов взаимодействия предметов труда *Ptr*; множество спецификаций $Spc = (spc_1, spc_2, \dots, spc_n)$ представляет собой взаимосвязанный перечень предметов труда $Ptr = (Ptr_1, Ptr_2, \dots, Ptr_n)$ – закупаемых материалов, полуфабрикатов, покупных заготовок,

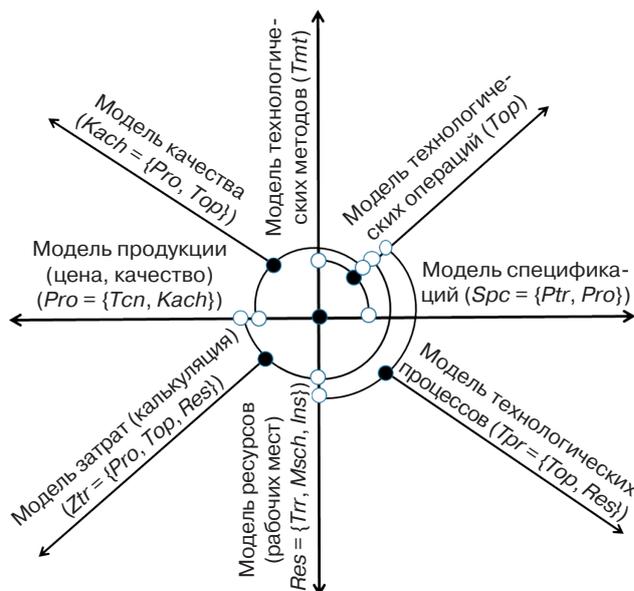


Рис. 6. Графическое представление структуры ЦД организации ПП

а также изготавливаемых деталей и сборочных единиц, находящихся на операциях¹⁸. При этом, для каждой пары элементов множества *Spc* и множества *Tmt* формируется множество морфизмов – технологических операций $Top = \{top_1, top_2, \dots, top_n\}$, т.е. $Tmt \subset Top$ и $Spc \subset Top$.

Множество производственных рабочих с указанием профессий и квалификационных характеристик $Trr = \{trr_1, trr_2, \dots, trr_n\}$, множество мощностей $Msch = \{msch_1, msch_2, \dots, msch_n\}$, множество инструментов $Ins = \{ins_1, ins_2, \dots, ins_n\}$ входят в множество ресурсов (рабочих мест) $Trr \subset Res$, $Msch \subset Res$, $Ins \subset Res$. Аналогичным образом формируются другие множества представленной структуры ЦД ОПП.

На следующем этапе на основе графоаналитического и синтаксического анализа документов ЕСТПП формируются характеристики каждого объекта множества. Результатом идентификации моделей ЦД ОПП является формальная структура системной модели ЦД ОПП (табл. 1, 2)¹⁹ [1].

¹⁶ ГОСТ 3.1109-82. Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов; 1981. 15 с. [GOST 3.1109-82. Interstate standard. Unified system for technological documentation. Terms and definitions of main concepts. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1981. 15 p. (in Russ.).]

¹⁷ ГОСТ 14.004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов; 1983. 8 с. [GOST 14.004-83. Technological preparation of production. Terms and definitions of basic concepts. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1983. 8 p. (in Russ.).]

¹⁸ ГОСТ 3.1109-82. Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов; 1981. 15 с. [GOST 3.1109-82. Interstate standard. Unified system for technological documentation. Terms and definitions of main concepts. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1981. 15 p. (in Russ.).]

¹⁹ Артюхов А.В. Методы и модели организации производственного процесса многономенклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Самара; 2017. 20 с. [Artyukhov A.V. Methods and models of the organization of the production process of a multi-product machinery enterprise as a control object: Cand. Sci. Thesis (Eng.). Samara; 2017. 20 p. (in Russ.).]

Модель организации производственного процесса представляет собой метамодель, объединяющую состав элементарных моделей. Представленная в табл. 1, 2 метамодель организации производственного процесса отражает также разнообразие функциональных взаимосвязей элементов

производственного процесса: элементарных предметов труда, элементарных средств труда, элементарных технологических процессов (операций), элементарных межоперационных производственных процессов, определяющих состав и содержание ЦД ОПП.

Таблица 1. Структура системной модели ЦД ОПП. Часть 1

| Модели предметов труда | | Состав технологических методов | Модели технологических операций |
|--------------------------------|---|---|--|
| Состав ПТ | Структура ПТ | | |
| Изделие | Идентификация ПТ: А – Анонимный ПТ Н – Номерной ПТ П – Номерная партия ПТ З – Заказной ПТ Тип прослеживаемой входимости: А – А А – П А – Н А – З П – П П – Н П – З Н – Н Н – З З – З | Литье | МТО1 МТО2 МТО3 МТО4 МТО5 МТО6 МТО7 МТО8 МТО9 |
| Материал | | Формование | |
| Основной материал | | Раскрой материала | |
| Вспомогательный материал | | Ковка | |
| Полуфабрикат | | Объемная штамповка | |
| Заготовка | | Листовая штамповка | |
| Исходная заготовка | | Поверхностное пластическое деформирование | |
| Листоштампованное изделие | | Обработка резанием | |
| Отливка | | Обработка термическая | |
| Поковка | | Обработка электрофизическая | |
| Комплекующее изделие | | Обработка электрохимическая | |
| Деталь | | Обработка гальванопластика | |
| Сборочная единица | | Слесарная обработка | |
| Сборочный комплект | | Сборка | |
| Готовое изделие | | Сварка | |
| Агрегат | | Клепка | |
| Отремонтированное изделие | | Пайка | |
| Шихта | | Склеивание | |
| Сплав | | Нанесение покрытия | |
| Блок заготовок | | Технический контроль | |
| Дефектное изделие | Испытания | | |
| Технологические потери | Комплектование | | |
| Вторичные материальные ресурсы | Разукomплектование (разборка) | | |
| Используемые отходы | Транспортирование | | |
| Неиспользуемые отходы | Хранение | | |
| Безвозвратные отходы | Ремонт | | |
| | Переработка отходов | | |

Таблица 2. Структура системной модели ЦД ОПП. Часть 2

| Модель организационной структуры | Модели рабочих мест | | Модели организации операций технологического процесса | Модели межоперационных процессов |
|--|--|--|--|---|
| | Структура рабочего места | Тип рабочего места | | |
| Подразделения: - склады закупаемых ПТ - склады реализуемых ПТ - склады выведенных из производства ПТ - склады находящихся в производстве ПТ - склады законченных обработкой и готовых к сборке ПТ - склады консигнационные собственные - склады консигнационные не собственные - производственные цехи - производственные участки | Группа механизмов Механизм Группа рабочих Рабочий | Простое рабочее место Многостаночное рабочее место Комплексное рабочее место | Модель однопредметного переналаживаемого процесса Модель однопредметного переналаживаемого процесса Модель многопредметного переналаживаемого процесса | Модели формирования производственных партий ПТ Модели формирования передаточных партий ПТ Модели формирования страхового запаса Модели ожидания обработки ПТ |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Сформулированы логико-семантические требования формирования системных моделей логистических, производственных, сервисных и других процессов в форме их ЦД, являющихся необходимыми условиями построения кибернетической модели управления с обратными связями, с требуемыми запасами устойчивости и качеством.
2. На основе формализации результатов логико-семантического анализа производственного процесса и процесса управления разработан подход к формированию структурно-параметрической модели ЦД ПП с учетом существующих внешних ограничений (границ).
3. На основе указанного выше подхода разработана метаструктура ЦД ПП, показано, что существующие структуры производственных объектов и ПП могут быть согласованы (гармонизированы) с учетом требований международных стандартов ISO «Умное производство»²⁰.
4. Показано, что применение основных положений теории множеств, и, в частности, положений теории категорий множеств и положений формальной логики позволяет сформировать подход к идентификации модели ЦД ПП на основе формализации экспертных знаний.
5. Представлен пример идентификации ЦД ОПП, основанный на логико-семантическом анализе положений стандартов ЕСТПП.

Вклад авторов

А.В. Речкалов – предложил подход к цифровой трансформации автоматизированных систем управления производством действующих машиностроительных

предприятий (МП) на основе формализации логико-семантической модели производственного процесса (ПП). Показал, что существующие метаструктуры производственных объектов и ПП могут быть согласованы (гармонизированы) с требованиями международных стандартов ISO «Умное производство».

А.В. Артюхов – разработал методологию и алгоритм проектирования системных моделей плановых, логистических, производственных, сервисных и других процессов МП в форме их цифровых двойников (ЦД) на основе структурно-параметрической идентификации из условия их прослеживаемости и управляемости. Показал, что на основе ЦД ПП МП целесообразно формировать метаструктуру распределенных (параллельных) ПП для МП, объединенных в машиностроительный холдинг. Предложил подход к формированию структуры информационной системы управления с обратными связями.

Г.Г. Куликов – предложил использовать базовые положения теории множеств, и в частности, положения теории категорий множеств и математической логики для формального описания ЦД ПП.

Authors' contributions

A.V. Rechkalov has proposed an approach to the digital transformation of automated production control systems of operating machinery enterprises (ME) based on the formalization of the logical-semantic model of the production process (PP). He showed that the existing metastructures of production facilities and PP can be harmonized with the requirements of ISO "Smart Manufacturing."

A.V. Artyukhov has developed a methodology and algorithm to design system models of planning, logistics, production, service, and other ME processes in the form of their digital twins (DT) based on structural and parametric identification under the condition of their traceability and controllability. He showed that on the basis of ME PPDT it is expedient to form metastructures of the distributed (parallel) PP for ME united in a machinery holding. He proposed an approach to the formation of the structure of an information management system with feedback.

G.G. Kulikov has proposed to use the basic provisions of the theory of sets, in particular, the provisions of the theory of categories of sets and the provisions of mathematical logic for a formal description of the PPDT.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Речкалов А.В., Артюхов А.В., Куликов Г.Г., Новиков В.Н. Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия. *Вестник УГАТУ*. 2022;26(1–95):120–135. https://doi.org/10.54708/19926502_2022_26195120
2. Шваб К. *Четвертая промышленная революция = The Fourth Industrial Revolution*: пер. с англ. М.: Эксмо; 2018. 285 с. ISBN 978-5-699-98379-7
3. Толстых Т.О., Гамидуллаева Л.А., Шкарупета Е.В. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях цифрового производства и индустрии 4.0. *Экономика в промышленности*. 2018;11(1):11–19. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2018-1-11-19>

REFERENCES

1. Rechkalov A.V., Artyukhov A.V., Kulikov G.G., Novikov V.N. The concept of transformation of the model of planning and management processes based on the digital twin of the production system in the industrial model of a machine-building enterprise. *Vestnik UGATU*. 2022;26(1–95):120–135 (in Russ.). https://doi.org/10.54708/19926502_2022_26195120
2. Shvab K. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya = The Fourth Industrial Revolution*: transl. from Eng. Moscow: Eksmo; 2018. 285 p. (in Russ.). ISBN 978-5-699-98379-7 [Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum; 2016. 192 p.]
3. Tolstykh T.O., Gamidullaeva L.A., Shkarupeta E.V. Key factors of development of the industrial enterprises in the conditions of the industry 4.0. *Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*. 2018;11(1):11–19 (in Russ.). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2018-1-11-19>

4. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников? *Автоматизация в промышленности*. 2020;9:3–11 <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.09.01>
5. Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*; под научн. ред. проф. Боровкова А. 1-е изд., исправл. и доп. М.: ООО «Альянс-Принт»; 2020. 401 с. ISBN 978-5-98094-008-9
6. Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун. MES – основа для создания «цифрового двойника» производственной системы. *Вестник МГТУ СТАНКИИ*. 2019;2(49):52–56.
7. Соломенцев Ю.М., Фролов Е.Б. «Цифровой двойник» производственной системы – перспективный инструмент повышения эффективности станочного парка машиностроительного предприятия. *Станочный парк*. 2018;8:36–39.
8. Гаврилов Д.А. *Управление производством на базе стандарта MRP II. Серия: Теория и практика менеджмента*. СПб.: Питер; 2003. 352 с.
9. Эшби У.Р. *Введение в кибернетику*: пер. с англ. М.: Ленанд; 2021. 432 с. ISBN 978-5-453-00197-2
4. Dozortsev V.M. Digital twins in industry: genesis, composition, terminology, technologies, platforms, prospects. Part 1. The emergence and development of digital twins. How do the existing definitions reflect the content and functions of digital twins? *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*. 2020;9:3–11 (in Russ.). <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.09.01>
5. Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoi opyt (Digital twin. Analysis, trends, world experience)*. Prof. Borovkov A. (Sci. Ed.). 1st ed. Moscow: Al'yansPrint; 2020. 401 p. (in Russ.). ISBN 978-5-98094-008-9
6. Frolov E.B., Klimov A.S., Zin Min Khtun. MES – the basis for the creation of a “digital twins” for production systems. *Vestnik MGTU “Stankin.”* 2019;2(49):52–56 (in Russ.).
7. Solomentsev Yu.M., Frolov E.B. “Digital twin” of the production system is a promising tool for improving the efficiency of the machine park of a machine-building enterprise. *Stanochnyi Park*. 2018;8:36–39 (in Russ.).
8. Gavrilov D.A. *Upravlenie proizvodstvom na baze standarta MRP II. Seriya: Teoriya i praktika menedzhmenta (Production Management Based on the MRPII Standard. Series: Theory and Practice of Management)*. St. Petersburg: Peter; 2003. 352 p. (in Russ.).
9. Eshbi U.R. *Vvedenie v kibernetiku (Introduction to Cybernetics)*: transl. from Eng. Moscow: Lenand; 2021. 432 p. (in Russ.). ISBN 978-5-453-00197-2 [Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics*. London: Champan & Hall; 1956.]

Об авторах

Речкалов Александр Васильевич, д.т.н., профессор, эксперт, АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (109147, Россия, Москва, пер. Маяковского, д. 11). E-mail: av@rechkalov.ru. Scopus Author ID 6507553020.

Артюхов Александр Викторович, к.т.н., генеральный директор, АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (109147, Россия, Москва, пер. Маяковского, д. 11). E-mail: artyukhov@uecrus.com. Scopus Author ID 57457052400.

Куликов Геннадий Григорьевич, д.т.н., профессор кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (450008, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. К. Маркса, д. 12). E-mail: gennadyg_98@yahoo.com. Scopus Author ID 7102426624.

About the authors

Alexander V. Rechkalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Expert, United Engine Corporation (11, Mayakovskogo per., Moscow, 109147 Russia). E-mail: av@rechkalov.ru. Scopus Author ID 6507553020.

Alexander V. Artyukhov, Cand. Sci. (Eng.), General Director, United Engine Corporation (11, Mayakovskogo per., Moscow, 109147 Russia). artyukhov@uecrus.com. Scopus Author ID 57457052400.

Gennady G. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dept. of Automated Control Systems, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marksa ul., Ufa, The Republic of Bashkortostan, 450008 Russia). E-mail: gennadyg_98@yahoo.com. Scopus Author ID 7102426624.

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 31.01.2023 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 10.

Тираж 100 экз. Заказ № 20.

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 January 31, 2023.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 10.

100 copies. Order No. 20.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.
Subscription index: **79641**.

